



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

INVESTIGACIÓN DE LA MATERIA PARTICULADA
EMITIDA POR UN MOTOR DE ENCENDIDO POR
COMPRESIÓN ASISTIDO POR CHISPA QUE
TRABAJA CON AMONIACO E HIDRÓGENO

Autor: Vicente Pechuán Marín

Director: William Northrop

Madrid

Julio 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Investigación de la materia particulada emitida por un motor de
encendido por compresión asistido por chispa que trabaja con amoniaco e
hidrógeno
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Vicente Pechuán Marín Fecha: 05/07/2023



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: William Northrop Fecha: 05/07/2023





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

INVESTIGACIÓN DE LA MATERIA PARTICULADA EMITIDA POR UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN ASISTIDO POR CHISPA QUE TRABAJA CON AMONIACO E HIDRÓGENO

Autor: Vicente Pechuán Marín

Director: William Northrop

Madrid

Julio 2022

INVESTIGACIÓN DE LA MATERIA PARTICULADA EMITIDA POR UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN ASISTIDO POR CHISPA QUE TRABAJA CON AMONIACO E HIDRÓGENO

Autor: Pechuán Marín, Vicente

Director: Northrop, William

Entidad Colaboradora: Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Minnesota

RESUMEN DEL PROYECTO

Esta investigación analiza la emisión de materia particulada de un motor que utiliza amoníaco como combustible. Se utiliza un motor monocilíndrico de investigación de encendido por compresión asistido por chispa (SACI). Se probaron distintas condiciones en las que se varió la relación de equivalencia y se suministró como combustible amoníaco puro y amoníaco con una pequeña cantidad de hidrógeno.

Palabras clave: Amoníaco, motor de combustión interna, emisiones, materia particulada, nanopartículas, descarbonización

1. Introducción

El amoníaco anhidro (NH_3) tiene el potencial de reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero y otros contaminantes en la producción de energía debido a que no se produce CO_2 cuando se quema en un motor. Los estudios que se han realizado hasta ahora de la combustión de amoníaco en motores han sido centrados en el rendimiento dinámico y las emisiones de gases que se producen. En esta investigación se analiza la materia particulada emitida cuando se utiliza amoníaco en un motor de combustión interna. Es la fracción de la contaminación del aire que mayor relación tiene con enfermedades en humanos y animales [1,2,3]. Además, los motores y los vehículos de motor son los principales contribuyentes de partículas finas a la atmósfera en áreas urbanas que son las más peligrosas ya que consiguen alcanzar lo más profundo de los pulmones cuando son inhaladas [4].

2. Definición del proyecto

En los experimentos realizados en esta investigación se extraen muestras directamente del escape del motor sin que sean tratadas. Antes de que la muestra sea analizada por los instrumentos de medida se hace pasar a través de un tanque diseñado para reducir las fluctuaciones de presión producidas por el motor. Posteriormente, se analiza la muestra con dos instrumentos de medida de materia particulada y uno de emisión de gases.

Los resultados obtenidos con los instrumentos de medida permiten conocer características específicas de la materia particulada emitida por el motor para determinar tendencias de comportamiento. Además, con los resultados es posible relacionar las emisiones de los distintos gases detectados con las de materia particulada para averiguar si existen correlaciones.

3. Descripción del experimento

El motor utilizado es un Waukesha Cooperative Fuel Research (CFR) diseñado para probar el índice de octano de distintos combustibles. Tiene una relación de compresión variable que permite adaptarlo para que funcione con amoniaco utilizando el valor más alto que se puede alcanzar de 18:1. El motor se conecta a un dinamómetro a través de su cigüeñal con correas en V y se mantiene una velocidad constante de 900 RPM para los experimentos. Se utilizan amoniaco puro y amoniaco mezclado con 5% de hidrógeno como combustibles y también se prueba el motor sin combustible. La adición de hidrógeno ayuda a lograr una mayor eficiencia de combustión debido a que proporciona un aumento de la reactividad del combustible y permite conseguir un funcionamiento estable en el motor. Además, la relación de equivalencia fue variada entre condiciones estequiométricas y ricas.

El primero de los instrumentos de medida de materia particulada es un Ultrafine Condensation Particle Counter (UCPC). Este instrumento mide la concentración de partículas que tienen un diámetro superior a 3 nanómetros presentes en la muestra del escape medida.

El segundo instrumento usado para medir materia particulada es un NSAM (Nanoparticle Surface Area Monitor) que mide el área superficial de materia particulada que se deposita en los pulmones humanos. Utiliza dos modos de medida TB y A que miden el área superficial depositada en la región traqueobronquial y alveolar de sistema respiratorio humano respectivamente.

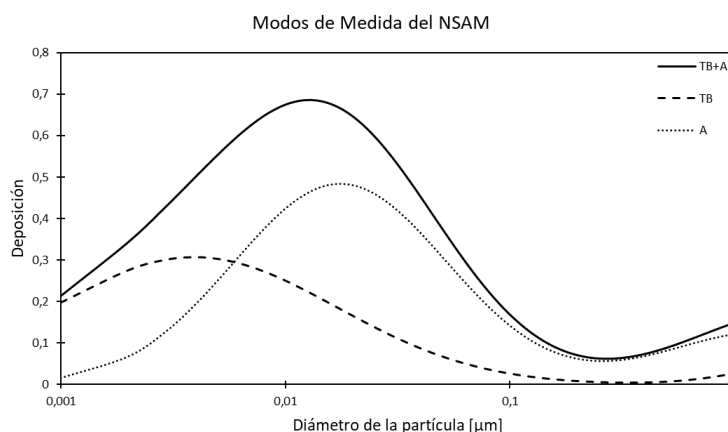


Figura 1: Distribución del diámetro de las partículas detectadas por los distintos modos de medición del NSAM

Para medir las emisiones de gases presentes en el escape se utiliza un banco de emisiones AVL i60 SESAM FT compuesto por un espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y un detector paramagnético de oxígeno (PMD). Con este instrumento se midieron las emisiones de NH_3 , H_2O , NO , NO_2 , H_2 y O_2 .

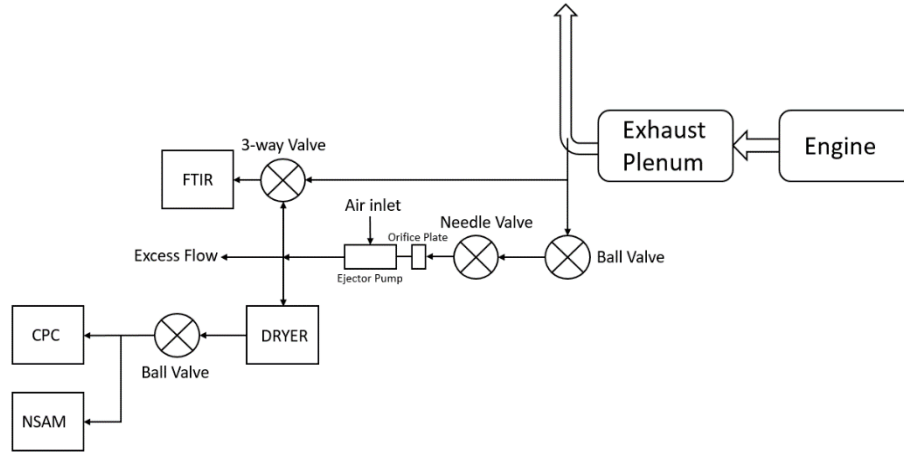


Figura 2: Sistema de muestreo utilizado

La muestra del escape analizada fue diluida y secada para evitar que la alta concentración de amoníaco pudiese dañar los instrumentos de medida. El sistema de muestreo utilizado para los experimentos se muestra en la Figura 2.

4. Resultados

La adición de 5% de hidrógeno al combustible hace que el número de partículas emitidas y la superficie total depositada de las partículas aumente de manera similar con dosado estequiométrico como se puede observar en la Figura 3. En este caso, el número de partículas emitidas aumentó en un factor de 6. Hubo un mayor aumento en el modo de medida A del NSAM lo que quiere decir que se generan más partículas de mayor tamaño. Las emisiones de agua y de amoníaco disminuyeron al contrario que las emisiones de NO_x que aumentaron.

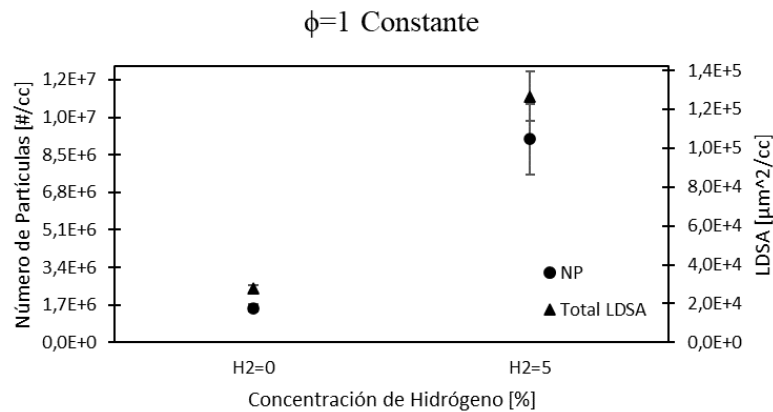


Figura 3: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los dos tipos de combustible usados con dosado estequiométrico

El incremento de la relación de equivalencia hace que aumente el número de partículas en un factor de 15,5 y la superficie depositada total en un factor de 6,5 cuando el combustible solo contiene amoníaco. Por el contrario, con una relación de equivalencia

rica cuando el combustible tenía hidrógeno solo la superficie depositada total aumentó y este aumento fue ligero. Adicionalmente, las emisiones de agua y de amoníaco aumentaron con una relación de equivalencia rica mientras que las de NO_x disminuyeron.

Hubo diferencias notables en las emisiones de materia particulada al operar el motor en condiciones frías frente a calientes cuando no se le suministraba combustible. Para el funcionamiento con el motor caliente se detectaron menos partículas y partículas de menor tamaño.

5. Conclusiones

Las emisiones de materia particulada analizadas en esta investigación son generadas por varias fuentes distintas. Estas son el propio combustible utilizado, las gotas del aceite lubricante del motor y la oxidación dentro del cilindro, los conductos de admisión y de escape. Para poder entender en profundidad el comportamiento de la materia particulada generada por el amoníaco como combustible es necesario analizar su efecto aislado. Para ello, se debe realizar una investigación futura en la que se opere el motor con hidrógeno como combustible de manera que se puedan analizar las emisiones de materia particulada provenientes de fuentes ajenas al combustible. El uso de hidrógeno como combustible es necesario ya que no se emite materia particulada cuando se quema en un motor de combustión interna.

6. Referencias

- [1] Losacco, C.; Perillo, A., '*Particulate matter air pollution and respiratory impact on humans and animals*', Diciembre 2018, Environmental Science and Pollution Research. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30284710/>
- [2] S.A. Galvis-Vizcaíno, '*Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa*', Septiembre 2021, Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1132-62552021000300011
- [3] Wu, W.; Jin, Y.; Carlsten, C., '*Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter*', Marzo 2018, J Allergy Clin Immunol 2018; 141:833-44 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29519450/>
- [4] David B. Kittelson, '*Engines and nanoparticles: a review*', Junio 1998, Journal of Aerosol Science, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850297100374>

INVESTIGATION OF THE PARTICULATE MATTER EMITTED FROM AMMONIA AND HYDROGEN COMBUSTION IN A SPARK-ASSISTED COMPRESSION IGNITION ENGINE

Author: Pechuán Marín, Vicente.

Supervisor: Northrop, William

Collaborating Entity: Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota

ABSTRACT

This research analyzes the particulate matter emissions from an engine that uses ammonia as fuel. A single-cylinder spark-assisted compression ignition (SACI) research engine was used for this purpose. Different conditions were tested, varying the equivalence ratio and supplying pure ammonia as fuel, as well as ammonia with a small amount of hydrogen.

Keywords: Ammonia, internal combustion engine, emissions, particulate matter, nanoparticles, decarbonization

1. Introduction

Anhydrous ammonia (NH_3) has the potential to reduce total greenhouse gas emissions and other pollutants in power generation since it does not produce CO_2 when burned in an engine. Previous studies on ammonia combustion in engines have primarily focused on dynamic performance and gas emissions. However, this research specifically analyzes the particulate matter emitted when ammonia is used in an internal combustion engine. Particulate matter is the air pollution component that is most strongly associated with human and animal health issues [1,2,3]. Furthermore, engines and motor vehicles are the primary contributors to fine particles in the atmosphere in urban areas. Also, the finer the emitted particles are, the more hazardous they are because they can penetrate deeper into the lungs when inhaled [4].

2. Project definition

In the experiments conducted in this research, samples were directly extracted from the engine exhaust without going through any treatment. Before the sample was analyzed by the measuring instruments, it was passed through a tank designed to reduce pressure fluctuations caused by the engine. Subsequently, the sample was analyzed using two particulate matter measuring instruments and an instrument used to measure gas emissions.

The results obtained from the measuring instruments provide insights into specific characteristics of the particulate matter emitted by the engine. This enables the determination of behavioral trends. Additionally, the results allow to correlate the emissions from different detected gases with particulate matter emissions.

3. Project description

The engine used is a Waukesha Cooperative Fuel Research (CFR) engine, designed to test the octane rating of various fuels. It has a variable compression ratio that can be

adjusted to operate with ammonia fuel using the highest achievable value of 18:1. The engine is connected to a dynamometer via its crankshaft using V-belts. A constant speed of 900 RPM is maintained for the experiments. Pure ammonia and ammonia mixed with 5% hydrogen are used as fuels and motoring conditions were also tested. The addition of hydrogen helps achieve higher combustion efficiency by increasing fuel reactivity and enabling stable operation of the engine. Additionally, the equivalence ratio is varied between stoichiometric and rich conditions.

The first of the particulate matter measuring instruments is an Ultrafine Condensation Particle Counter (UCPC). This instrument measures the concentration of particles with a diameter larger than 3 nanometers present in the measured exhaust sample.

The second instrument used to measure particulate matter is an NSAM (Nanoparticle Surface Area Monitor). This instrument measures the surface area of the fraction of particulate matter that is deposited in the human lungs. It utilizes two measurement modes: TB and A, which measure the surface area deposited in the tracheobronchial and alveolar regions of the human respiratory system, respectively.

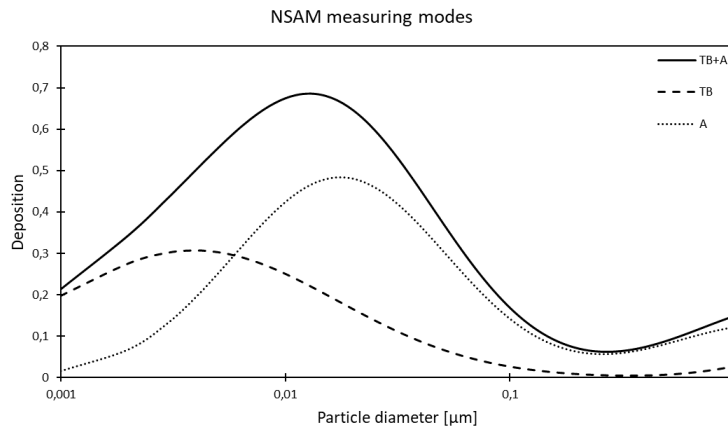


Figure 1: Particle diameter distribution measured by the different modes of the NSAM

To measure the gas emissions present in the exhaust, an AVL i60 SESAM FT emissions bench is used. It consists of a Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) and a Paramagnetic Oxygen Detector (PMD). This instrument measures the emissions of NH_3 , H_2O , NO , NO_2 , H_2 y O_2 .

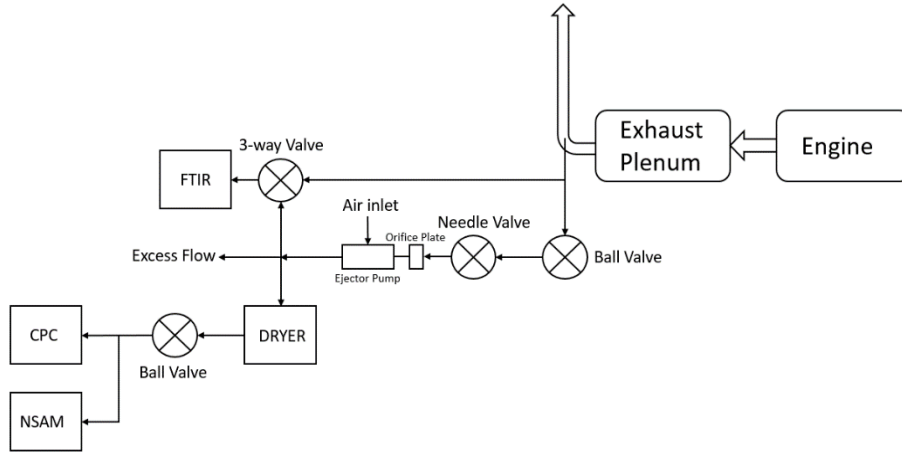


Figure 2: Sampling system used

The exhaust sample was diluted and dried to prevent the high concentration of ammonia from potentially damaging the measuring instruments. The sampling system that was used for the experiments is shown in Figure 2.

4. Results

The addition of 5% hydrogen to the fuel resulted in a similar increase in both the number of emitted particles and the total deposited surface area of the particles under stoichiometric conditions as it is shown in Figure 3. In this case, the number of emitted particles increased by a factor of 6. There was a greater increase observed in the measurement mode A of the NSAM, indicating the generation of larger-sized particles. The emissions of water and ammonia decreased, whereas the emissions of NO_x increased.

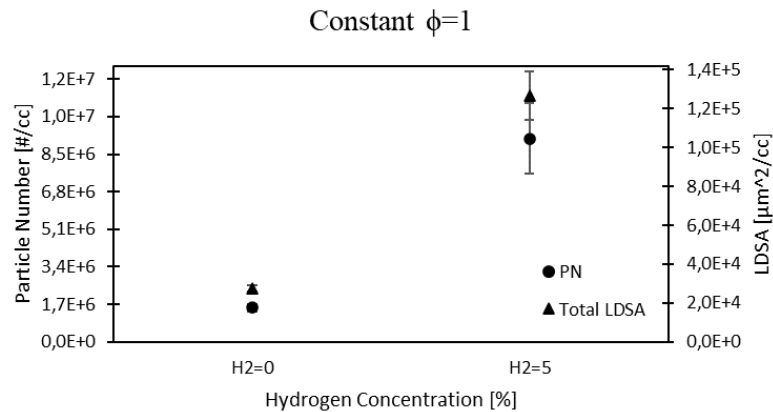


Figure 3: Results from the particulate matter measuring instruments for the two types of fuel used under stoichiometric equivalence ratio

The increase in equivalence ratio leads to an increase by a factor of 15,5 in the number of particles and a by a factor of 6,5 in the total deposited surface area when the fuel contains only ammonia. In contrast, with a rich equivalence ratio and using the fuel composition that contained hydrogen, the total deposited surface area increased, but the

increase was slight. Additionally, the emissions of water and ammonia increased with a rich equivalence ratio, while the emissions of NO_x decreased.

There were notable differences in particulate matter emissions when motoring the engine under cold versus hot conditions. When motoring the engine when it was hot, fewer particles and smaller-sized particles were detected.

5. Conclusions

The particulate matter emissions analyzed in this research are generated by several different sources. These include the fuel itself, the droplets of lubricating oil from the engine, and the oxidation processes occurring within the cylinder, intake, and exhaust ducts. In order to gain a comprehensive understanding of the particulate matter behavior generated by ammonia as fuel, it is necessary to analyze its isolated effect. For this purpose, a future investigation should be conducted where the engine operates using hydrogen as fuel. This will enable the analysis of particulate matter emissions originating from sources unrelated to the fuel itself. The use of hydrogen as fuel is necessary because it does not emit particulate matter when burned in an internal combustion engine.

6. References

- [1] Losacco, C.; Perillo, A.; '*Particulate matter air pollution and respiratory impact on humans and animals*', December 2018, Environmental Science and Pollution Research. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30284710/>
- [2] S.A. Galvis-Vizcaíno, '*Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa*', September 2021, Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1132-62552021000300011
- [3] Wu, W.; Jin, Y.; Carlsten, C.; '*Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter*', March 2018, J Allergy Clin Immunol 2018; 141:833-44 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29519450/>
- [4] David B. Kittelson, '*Engines and nanoparticles: a review*', June 1998, Journal of Aerosol Science, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850297100374>

Índice de la memoria

3

<i>Índice de la memoria</i>	<i>I</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>III</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>VI</i>
Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto.....	7
1.2 Objetivos del proyecto.....	8
1.3 Metodología a seguir	10
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías	12
2.1 Motor utilizado	12
2.2 Instrumentos de análisis de materia particulada.....	14
2.2.1 Ultrafine condensation particle counter (UCPC)	14
2.2.2 Nanoparticle surface area monitor (NSAM)	16
2.3 Instrumento de análisis de emisiones de gases.....	18
2.3.1 AVL i60 SESAM FT.....	18
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	20
3.1 Características del amoníaco en motores de combustión interna	20
3.2 Características de la mezcla de amoníaco con hidrógeno en motores de combustión interna	21
3.3 Materia particulada.....	22
Capítulo 4. Definición del Trabajo	25
4.1 Justificación.....	25
4.2 Objetivos	27
4.3 Objetivos del desarrollo sostenible (ODS)	28
Capítulo 5. Sistema experimental	29
5.1 Configuración del motor	29

5.2	Sistema de dilución de la muestra	31
5.2.1	Secado de la muestra.....	34
5.3	Condiciones del experimento	35
5.4	Procedimiento operativo.....	37
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....		41
6.1	Desempeño del motor.....	41
6.2	Análisis de las emisiones de gases	44
6.3	Análisis de las emisiones de materia particulada	50
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....		57
7.1	Conclusiones	57
7.2	Trabajos futuros.....	58
Capítulo 8. Bibliografía.....		60
ANEXO I 63		
A)	Ficha técnica motor CFR.....	63
B)	Ficha técnica ucpc modelo 3025A	67
C)	Ficha técnica nsam	68

Índice de figuras

Figura 1: Distribución del diámetro de las partículas medidas por los distintos modos de medición del NSAM.....	8
Figura 2: Sistema de muestreo utilizado.....	9
Figura 3: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los dos tipos de combustible usados con dosado estequiométrico	9
Figura 4: Diagrama de cajas de los distintos pasos del experimento	10
Figura 5: Placa identificativa del motor CFR.....	12
Figura 6: Se muestran 2 esquemas del motor CFR utilizado. La vista desde arriba del cilindro se muestra en la parte superior y la vista lateral en la parte inferior [3].....	13
Figura 7: Placa identificativa del dinamómetro.....	14
Figura 8: Foto del TSI UCPC Modelo 3025A.....	15
Figura 9: Foto del TSI NSAM Modelo 3550	16
Figura 10: Distribución del tamaño de las partículas para los diferentes modos de medición del NSAM.....	17
Figura 11: AVL SESAM i60 FT (FTIR).....	18
Figura 12: Estimación de la población mundial dependiente de fertilizantes nitrogenados sintéticos para la producción de alimentos [19]	25
Figura 13: Obtención de amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch [18].....	26
Figura 14: Motor CFR junto al dinamómetro.....	29
Figura 15: Esquema de los componentes del motor CFR utilizados para realizar los experimentos [18].....	30
Figura 16: Aislamiento del plenum de gases de escape	31
Figura 17: Esquema del sistema de muestreo.....	32
Figura 18: Sistema de dilución utilizado para el muestreo de los gases de escape del motor	33
Figura 19: Sistema de secado de la muestra de gases de escape	35

Figura 20: Parámetros y condiciones del motor usados para los experimentos	45
Figura 21: Variación de las emisiones de H ₂ O al modificar la concentración de hidrógeno	45
Figura 22: Variación de las emisiones de H ₂ O al modificar la relación de equivalencia ...	45
Figura 23: Variación de NO _x , NH ₃ y O ₂ al modificar la concentración de hidrógeno con dosado estequiométrico	46
Figura 24: Variación de NO _x , NH ₃ y O ₂ al modificar la concentración de hidrógeno con dosado 1,2.....	46
Figura 25: Variación de NO _x , NH ₃ y O ₂ al modificar la relación estequiométrica con 0% de hidrógeno	47
Figura 26: Variación de NO _x , NH ₃ y O ₂ al modificar la relación estequiométrica con 5% de hidrógeno	47
Figura 27: Emisiones de NO _x frente a la temperatura del escape para cada condición de motor.....	47
Figura 28: Comparación de datos obtenidos del CPC para distintas muestras de la misma condición de motor	49
Figura 29: Comparación de datos obtenidos del NSAM para distintas muestras de la misma condición de motor	50
Figura 30: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para las condiciones de motor sin combustible	51
Figura 31: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para las condiciones de motor sin combustible.....	51
Figura 32: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los dos tipos de combustible usados con dosado estequiométrico.....	52
Figura 33: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para los dos tipos de combustible usados con dosado estequiométrico	52
Figura 34: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los dos tipos de combustible usados con dosado rico	53
Figura 35: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para los dos tipos de combustible usados con dosado rico	53

Figura 36: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los casos de combustible sin hidrógeno	54
Figura 37: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para los casos de combustible sin hidrógeno	55
Figura 38: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los casos de combustible con hidrógeno.....	55
Figura 39: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para los casos de combustible con hidrógeno	56

Índice de tablas

Tabla 1: Parámetros y condiciones del motor usados para los experimentos	36
Tabla 2: Parámetros de desempeño del motor para las 4 condiciones probadas	43

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Esta investigación se centra en un motor de combustión interna que utiliza amoníaco como combustible. A diferencia de los combustibles fósiles tradicionales, este combustible no contiene carbono. Por lo tanto, al estar compuesto únicamente por nitrógeno e hidrógeno, no produce CO_2 cuando se quema. Esto se ha vuelto muy importante debido a que muchas economías globales importantes, como Estados Unidos y la Unión Europea, se han fijado metas para alcanzar la neutralidad de carbono para el año 2050 [1,2]. El amoníaco anhidro (NH_3) está ganando popularidad como una solución de combustible libre de carbono debido a las ventajas que ofrece en comparación con alternativas como el hidrógeno (H_2) y las baterías recargables. Esto incluye ventajas en términos de almacenamiento, densidad de energía y disponibilidad de infraestructura. Además, el amoníaco puede quemarse eficientemente en un motor de combustión interna, produciendo principalmente nitrógeno y agua. En comparación con los combustibles fósiles convencionales, esto puede potencialmente reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Así mismo, el amoníaco tiene el potencial de ser un combustible sostenible, ya que se puede producir a partir de fuentes de energía renovable como la energía eólica o solar. También se produce a través del proceso de Haber-Bosch, que utiliza gas natural como materia prima principal. Ya existe una infraestructura establecida para la producción a gran escala de amoníaco y su transporte, ya que se utiliza ampliamente como fertilizante en la agricultura.

Algunas de las desventajas que tiene el amoníaco son que es difícil de manejar y contener debido a su toxicidad. Esta es una de las razones por las que es muy difícil utilizarlo como combustible en vehículos de carretera. Un accidente automovilístico podría tener consecuencias mucho más graves si el automóvil estuviera alimentado con amoníaco en lugar de un combustible fósil tradicional, ya que el almacenamiento de combustible no se puede manejar de manera tan segura. Sin embargo, el amoníaco tiene muchas aplicaciones

potenciales en las que personal capacitado podría manipularlo, como aplicaciones marinas, generación central de energía y otros usos en agricultura, donde ya se utiliza ampliamente.

El amoniaco es difícil de quemar, lo que plantea desafíos cuando se utiliza como combustible en un motor de combustión interna. Esto se debe a que tiene una velocidad de combustión laminar lenta, una alta temperatura de autoignición y un rango de combustión estrecho en comparación con los combustibles compuestos de hidrocarburos tradicionales. Para reducir estos problemas, se agrega hidrógeno en pequeñas cantidades para ayudar a que el amoniaco se quemara. El hidrógeno, en comparación con el amoniaco, tiene una velocidad de llama alta, una baja energía de ignición y límites de inflamabilidad amplios. El motor utilizado en esta investigación funcionó en modo de combustión de encendido por compresión asistido por chispa (SACI, por sus siglas en inglés). Esto significa que el amoniaco no tiene que llegar al punto de autoignición por sí solo, ya que para conseguirlo se requeriría una relación de compresión muy alta.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El mundo y especialmente Europa están cambiando la manera de obtener su energía para reducir al máximo la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera. El uso de amoniaco para obtener energía puede ayudar en gran medida a que se lleve a cabo este cambio. Algunas de las áreas en las que puede resultar más útil el amoniaco son la generación remota de energía y las aplicaciones agrícolas fuera de la carretera (donde ya saben cómo usarlo de manera segura). Es posible adaptar un motor de combustión interna para que funcione potencialmente con amoniaco, pero se debe garantizar la compatibilidad de los materiales debido a que es muy corrosivo con ciertos metales.

Sin embargo, existe preocupación por la contaminación de nanopartículas emitidas por los motores de combustión interna y sus efectos perjudiciales para la salud, así como los efectos ambientales. Estos aspectos deben tenerse en cuenta al investigar y utilizar el amoniaco como combustible.

Hasta el día de hoy, el enfoque principal de la investigación realizada sobre el uso de amoníaco en motores se ha centrado en el rendimiento dinámico y las emisiones de gases que se producen. Esta investigación se centrará en la materia particulada generada por un motor que funciona con amoníaco y amoníaco mezclado con hidrógeno. La inhalación de nanopartículas puede tener muchos efectos perjudiciales para la salud. Esto se debe a que estas partículas entran fácilmente en los pulmones y se introducen en el torrente sanguíneo. Pueden viajar a través del torrente sanguíneo y llegar a los órganos, donde causan daño. Además, las nanopartículas pueden ser más tóxicas que las partículas más grandes, ya que se mueven con mayor libertad.

En este estudio se extrae una muestra directamente del escape del motor y se analiza sin ser tratada. Antes de extraer la muestra, los gases de escape pasan a través de un tanque que reduce las fluctuaciones de presión que son producidas por el motor. Los resultados de esta investigación muestran ciertas características de la materia particulada emitida a partir de las cuales se pueden determinar sus tendencias de comportamiento. En los experimentos se miden las distintas variables del motor utilizado que permiten entender su comportamiento y pueden relacionarse con el objeto de esta investigación, que son las emisiones de partículas. La segunda relación que se quiere obtener es la que tienen las emisiones de materia particulada estudiadas con las distintas emisiones de gases que produce el motor para cada condición en la que se opera.

Los resultados obtenidos con los instrumentos de medida permiten calcular la relación entre la materia particulada obtenida y las condiciones de operación del motor, así como su relación con los gases emitidos. Este estudio supone el primer análisis de la materia particulada producida en este tipo de combustión de amoníaco y da paso a futuros estudios sobre sus características, su química, así como las causas de su formación.

1.3 METODOLOGÍA A SEGUIR

El motor utilizado para los experimentos se usa muy habitualmente para medir el índice de octano de diferentes combustibles. Es un motor mono cilíndrico que tiene la característica de que se puede variar su relación de compresión para poder adaptarlo a distintas condiciones de simulación. El conducto de los gases de escape del motor usado tiene 3 orificios con sondas de muestreo conectadas a distintos instrumentos de medida que permiten recoger muestras de los gases que circulan por él. Fue necesario incluir una nueva sonda de muestreo para el análisis de la materia particulada ya que no se había realizado un análisis de este tipo nunca. En la Figura 4 se pueden ver los pasos que se llevaron a cabo en los experimentos.

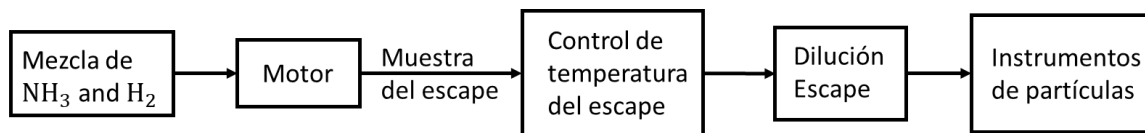


Figura 4: Diagrama de cajas de los distintos pasos del experimento

Se usaron 4 instrumentos para analizar la muestra obtenida del escape que se colocaron después de la sonda de muestreo. Se usó un FTIR (Fourier-Transform Infrared Spectrometer) junto con un PMD (Paramagnetic Oxygen Detector) para determinar la concentración de las distintas especies gaseosas presentes en el escape. Estos dos instrumentos permiten obtener las concentraciones presentes en el escape de amoníaco, agua, óxidos de nitrógeno y de oxígeno. Para el análisis de la materia particulada se utilizó un UCPC (Ultrafine Condensation Particle Counter) el cual mide la concentración total de materia particulada. Por último, se utilizó un NSAM (Nanoparticle Surface Area Monitor) para medir la LDSA (Lung-Deposited Surface Area) de la materia particulada detectada por el UCPC.

El flujo de gases de escape que extraía la sonda de muestreo contenía una gran cantidad de amoníaco. El amoníaco tiende a pegarse a las paredes y puede ser muy corrosivo para ciertos metales como son el cobre, el latón y el bronce. Para reducir su efecto dañino y evitar que se pudiese formar óxido o deterioro en las superficies metálicas de los instrumentos de medida la muestra de escape se diluyó en gran medida y también se hizo pasar a través de un sistema

de secado. El muestreo de los instrumentos de materia particulada se realizó durante 1 minuto para cada condición del motor. El CPC tiene accesorios de cobre y latón que podrían haber sido dañados por la alta concentración de amoníaco en el escape no tratado del que se tomaban las muestras.

Inmediatamente después del muestreo, los instrumentos de partículas se purgaron para reducir el daño adicional debido a restos de amoníaco que pudiesen haberse adherido a las paredes de estos. Se mantuvo la temperatura y la presión que rodeaba al motor en condiciones ambientales mediante el manejo del aire en la celda de prueba. La primera medición de partículas se realizó cuando el motor estaba frío y en funcionamiento sin suministro de combustible, únicamente aire. En esta condición, las temperaturas del refrigerante y del aceite estaban en niveles ambientales. Se suministró un combustible compuesto de hidrógeno y amoníaco en condiciones estequiométricas al motor para calentarlo antes de la siguiente recolección de datos. Este proceso de calentamiento se aceleró con una carga de admisión calentada y un circuito de calentamiento de aceite. El muestreo de datos se realizó después de modificar las relaciones de equivalencia y la composición de la mezcla de combustible una vez que el motor alcanzó temperaturas de funcionamiento estables. El punto de medida correspondiente al funcionamiento en caliente se registró al final del experimento, después de completar las pruebas de encendido. Las temperaturas del aceite y del refrigerante se mantuvieron consistentes con las condiciones de encendido para el último punto y solo se hizo circular aire a través del sistema.

Se probaron un total de seis condiciones de motor, los parámetros del motor que se mantuvieron sin cambios fueron la velocidad del motor, la relación de compresión y las temperaturas de funcionamiento. La relación de equivalencia se varió entre condiciones estequiométricas y ricas y se probaron los dos tipos de combustible para estas condiciones. Los combustibles probados fueron amoníaco puro y amoníaco mezclado con 5% de hidrógeno en volumen. El flujo de masa de combustible se mantuvo constante en un valor de 3 g/s durante todos los experimentos.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 MOTOR UTILIZADO

Para realizar esta investigación se utiliza un motor Waukesha Cooperative Fuel Research (CFR). Es un motor diseñado en 1928 para probar el índice de octano de distintos combustibles. Esto se realiza con una prueba estándar en la que se aumenta gradualmente la relación de compresión hasta que se detecta el golpeteo del motor.



Figura 5: Placa identificativa del motor CFR [18]

Una de las ventajas de este motor es que tiene una relación de compresión variable desde 4:1 hasta 18:1, que es el valor que se utiliza para los experimentos. Esto permite que este motor opere con distintos modos de combustión. Puede trabajar como motor PFI (Port Fuel Injection) estableciendo su relación de compresión entre 8 y 10 o incluso como motor de

Compression Ignition (Diesel) variando su relación de compresión hasta obtener un valor superior a 14.

Es un motor mono cilíndrico con un diámetro de cilindro de 82.5 mm y una carrera constante de 114.3 mm, sin embargo, la altura de la culata se puede modificar con respecto al bloque del motor lo cual resulta en diferentes volúmenes de holgura.

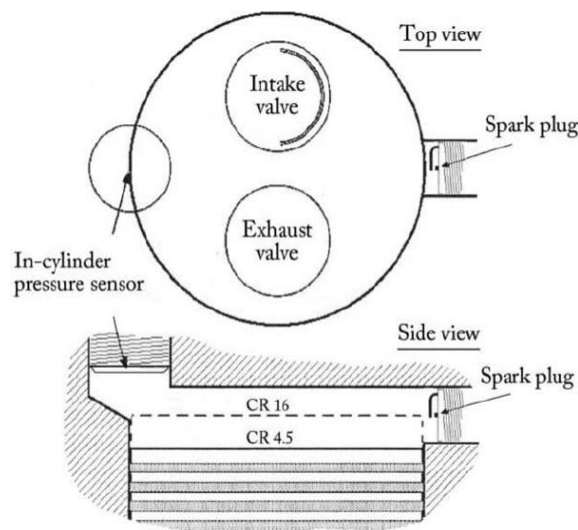


Figura 6: Esquemas del motor CFR utilizado. La vista desde arriba del cilindro se muestra en la parte superior y la vista lateral en la parte inferior [3]

Se muestra una representación del cilindro en la Figura 6. La bujía está situada en un lateral, lo que hace que la cámara de combustión esté ligeramente obstruida por el pistón cuando este se encuentra en la posición de punto muerto superior. Colocar la bujía en un lateral no es ideal para la propagación de la llama dentro del cilindro, pero simplifica el sistema de válvulas. La cámara de combustión vista desde el lateral se muestra en el esquema inferior de la Figura 6. El pistón ubicado en el punto muerto superior se representa con una línea discontinua que se corresponde con la relación de compresión más alta. Un transductor de presión de alta velocidad se ubica frente a la bujía y recopila datos de presión dentro del cilindro cada 0,1 grados del ángulo del cigüeñal (CAD).

El motor se conecta a un dinamómetro a través de su cigüeñal con correas en V. El dinamómetro permite mantener la velocidad del motor constante y esta se ajusta cambiando las ruedas que se conectan a las correas.

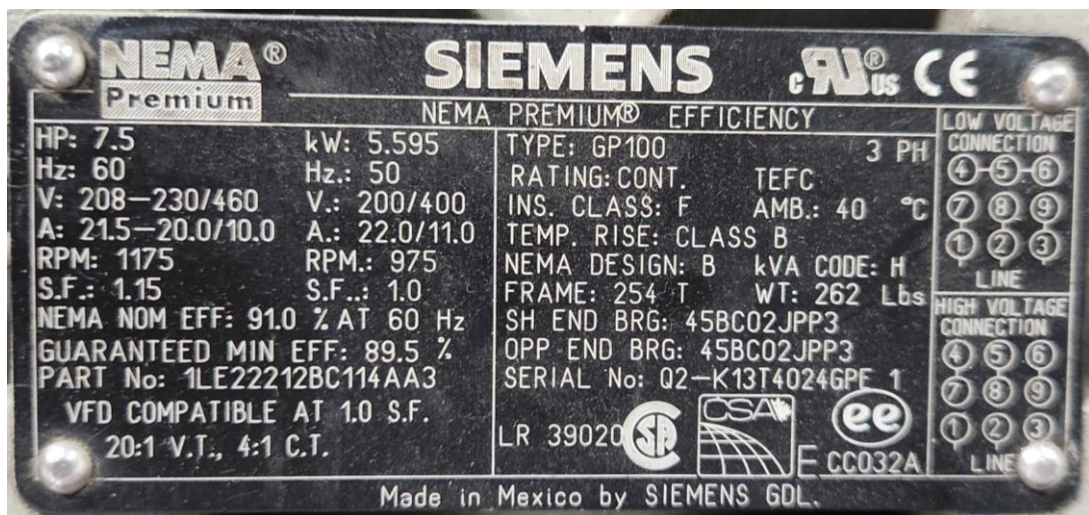


Figura 7: Placa identificativa del dinamómetro [18]

2.2 INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS DE MATERIA PARTICULADA

2.2.1 ULTRAFINE CONDENSATION PARTICLE COUNTER (UCPC)

Este es un instrumento de medición de materia particulada Modelo 3025A fabricado por TSI. Es capaz de medir la concentración de materia particulada que se transporta a través del aire para partículas que tienen un diámetro superior a 3 nanómetros. Primero, se condensa un vapor sobresaturado sobre las partículas contenidas en el flujo de escape analizado, esto hace que las partículas crezcan en tamaño y pasen a ser gotas más grandes. Es necesario incrementar el tamaño de estas partículas para que puedan ser detectadas y contadas por un detector óptico. El rango de detección de la concentración de partículas detectadas se extiende desde un valor inferior a $0,01$ partículas/cm³ hasta $9,99 \times 10^4$ partículas/cm³.

Los distintos componentes del UCPC son: una fuente de luz de láser de diodo, un fluido condensante (un alcohol), un microprocesador como controlador interno, un control de flujo

volumétrico y una pantalla frontal en la que se muestra tanto la concentración de partículas en cada instante como el estado del instrumento. Además, este instrumento ofrece una interfaz completa al conectarse a un ordenador.

El UCPC Modelo 3025A es un instrumento de investigación que se puede utilizar en diversas aplicaciones donde se requiere estudiar partículas en el rango de tamaño de nanómetros. La medición de aire limpio, la investigación de partículas, así como los estudios atmosféricos son algunas de sus aplicaciones más comunes.



Figura 8: Foto del TSI UCPC Modelo 3025A [18]

Antes de elegir el UCPC como el instrumento para medir la concentración de la materia particulada presente en el escape, se consideró usar un SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) junto con el UCPC. El SMPS permite dividir las partículas en distintos rangos de tamaño y usado junto al UCPC se podría haber determinado la concentración de partículas de cada tamaño por separado. No se ha usado el SMPS en esta investigación debido a que es un instrumento que contiene materiales frente a los cuales las altas concentraciones de amoníaco pueden causar muchos daños y esto habría tenido un efecto perjudicial significativo en los resultados.

2.2.2 NANOPARTICLE SURFACE AREA MONITOR (NSAM)

El NSAM Modelo 3550 se utilizó para medir el área superficial depositada en los pulmones humanos de la materia particulada reportada en $\mu\text{m}/\text{cm}^3$. Este instrumento tiene dos modos de medición que corresponden al área superficial depositada en la región traqueobronquial (TB) y alveolar (A) del sistema respiratorio humano. El NSAM no mide el área superficial total de las partículas presentes en la muestra de escape estudiada, sino más bien mide el área superficial de la fracción de partículas que quedan depositadas en las regiones TB y A del tracto respiratorio humano.

Los valores medidos por el NSAM son la deposición correspondiente de partículas en los pulmones de un trabajador de referencia, según lo predicho por el modelo de deposición pulmonar humano publicado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (Apéndice I, C). La respuesta que tiene el NSAM es independiente de la distribución de tamaño de las partículas, siempre y cuando la distribución de tamaño esté dentro de las especificaciones del instrumento (Apéndice I, C).



Figura 9: Foto del TSI NSAM Modelo 3550 [18]

El uso de este instrumento aporta gran valor a esta investigación debido a que las mediciones que ofrece del área superficial de nanopartículas depositadas en los pulmones humanos son más precisas al medir y cuantificar los posibles efectos sobre la salud humana debido a la exposición a nanopartículas. Este tipo de mediciones cuantifican mejor los efectos perjudiciales que otro tipo de medidas basadas en la masa, el número o el área superficial total de las nanopartículas que pueden ser inhaladas por un humano. La distribución de tamaño de partículas detectables por el NSAM se muestra en la Figura 10.

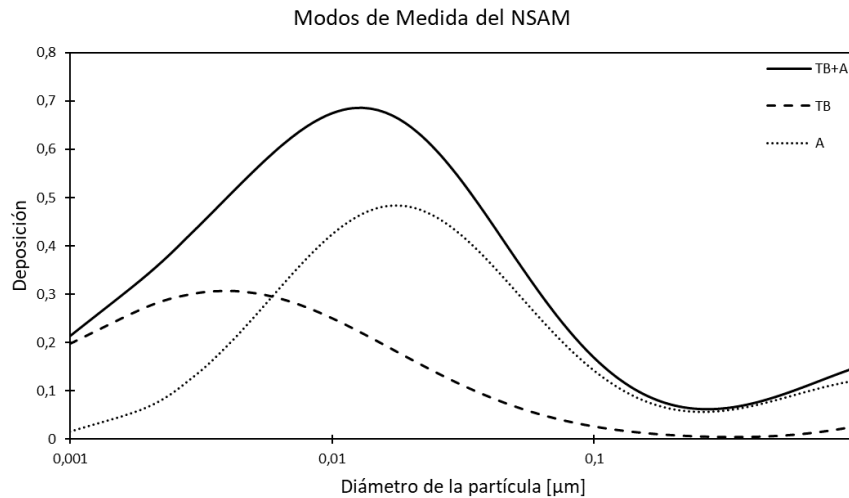


Figura 10: Distribución del tamaño de las partículas detectadas por los diferentes modos de medición del NSAM

El principio de funcionamiento del NSAM consiste en primero la carga por difusión de las partículas que se muestrean seguido de la detección de este aerosol mediante un electrómetro. Los gases de escape contenidos en el aerosol entran por el NSAM a 2,5 L/min y este flujo se divide en 1 L/min que pasa a través de un filtro y un ionizador y 1,5 L/min que se mide como flujo de aerosol. Estos dos flujos se vuelven a combinar en una cámara de mezcla donde las partículas de aerosol se cargan por difusión. El aerosol cargado pasa a través de una trampa que elimina el exceso de iones y la cantidad deseada de partículas de pequeño tamaño. El voltaje aplicado a la trampa determina la cantidad de iones y de partículas que se eliminan en este proceso. Después, el aerosol cargado pasa a un electrómetro de aerosol para medir su carga. En el electrómetro, la corriente pasa a través de las partículas a un filtro conductor en el cual se mide con un amplificador de alta sensibilidad. Los parámetros operativos y los flujos del NSAM se controlan a través de un microprocesador.

2.3 INSTRUMENTO DE ANÁLISIS DE EMISIONES DE GASES

2.3.1 AVL i60 SESAM FT

Para medir el amoníaco presente en el escape, así como los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) y el oxígeno, se utilizó un banco de emisiones AVL i60 SESAM FT que está compuesto por un espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y un detector paramagnético de oxígeno (PMD).



Figura 11: AVL SESAM i60 FT (FTIR) [18]

Este instrumento es un analizador de escape que se utiliza para medir los gases nocivos emitidos por un motor de combustión durante pruebas de conducción o en procedimientos regulados por distintos países. Todos los componentes se incluyen en la unidad de preparación de gas, estos son: el filtro de entrada, las válvulas de corte, las bombas, las válvulas de enrutamiento de gas y el enfriador de gas.

Utiliza el principio de bombeo por chorro de aire para eliminar las fluctuaciones de presión que se suelen dar en una bomba de diafragma cuando se muestrea el gas medido. El gas de

escape se suministra desde el punto de muestra a través de un prefiltro calentado y una línea de muestra hasta el sistema de medición de gases de escape, donde se procesan.

El principio de medición FTIR utiliza luz infrarroja (IR) para tomar medidas de manera que escanea un área amplia de longitudes de onda IR. Los gases de escape de la muestra se hacen pasar por una celda con una fuente de luz IR en un extremo la cual emite luz IR dispersa, un modulador corta esta luz infrarroja en diferentes longitudes de onda. En el otro extremo de esta celda hay un detector que mide la cantidad de luz IR que pasa a través de la celda. A partir de la absorción de luz a diferentes longitudes de onda se obtiene la concentración de los gases analizados. Al procesar los datos obtenidos, se utiliza la transformación de Fourier para convertir los valores de absorción medidos en concentraciones de gases. Gracias a utilizar el principio de medición FTIR, la luz se puede modular en muchas longitudes de onda diferentes de manera que es posible analizar muchos gases distintos con este instrumento, como son el NH_3 , H_2O , NO , NO_2 , H_2 y O_2 .

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL AMONIACO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Si se quiere cumplir el objetivo de neutralidad de carbono para el año 2050 establecido por la Unión Europea se deben reemplazar las energías fósiles por energías descarbonizadas. El amoníaco es uno de los combustibles neutros en carbono más simples y esto lo convierte en un buen candidato para convertirse en una forma de energía renovable dominante en el futuro. Su uso puede reemplazar al de los combustibles fósiles en aplicaciones como la producción de energía y el transporte.

Agregando a lo anterior, la demanda global de energía va a aumentar rápidamente en los próximos años principalmente debido a India y China que van a suponer la mitad del crecimiento de esta demanda hasta 2040 [4]. La sostenibilidad ambiental es algo muy importante para las generaciones presentes y futuras en muchos países como por ejemplo India. Esto va a suponer que el hidrógeno tenga un gran impacto en el futuro [5]. Esto convierte al amoníaco en un combustible altamente atractivo para usar en motores de combustión interna con el objetivo de reducir la huella de carbono en el medio ambiente debido a que es un gran portador de hidrógeno.

El hidrógeno es también un tipo de combustible candidato a reemplazar a los combustibles carbonizados tradicionales, pero el amoníaco resulta tener varias ventajas sobre él. El amoníaco es un portador de hidrógeno y tiene un menor coste por unidad de energía almacenada y una mayor densidad energética volumétrica. Además, la producción, así como la manipulación y la distribución del amoníaco ofrece menos dificultades y está más extendida. Se debe añadir que el amoníaco ya tiene un infraestructura confiable y establecida para su almacenamiento, al igual que su distribución la cual incluye tuberías, ferrocarril, carreteras y barcos.

La densidad energética volumétrica del amoníaco es de 11,5 MJ/NL que al compararla con otros combustibles es tres veces menor que la del diésel, la mitad que la del etanol, una tercera parte menor que la del metanol, mayor que la del metano y superior a dos veces la del hidrógeno. Una característica a la hora de quemar amoníaco dentro de un cilindro es que tiene una temperatura de autoignición muy elevada (650°C), gracias a esto se limita el autoencendido que resulta beneficioso para su aplicación en motores. Sin embargo, su velocidad de combustión es cinco veces inferior a la de otros combustibles convencionales usados en motores de encendido por chispa. Si se quiere utilizar amoníaco puro como combustible, el motor de encendido por chispa es el candidato más viable debido a la baja capacidad de autoencendido que tiene [6]. Para poder utilizar amoníaco en un motor de encendido por compresión la relación de compresión requerida es superior a 35:1, este es un valor muy alto que es difícil de conseguir.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA DE AMONIACO CON HIDRÓGENO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Debido a que el amoníaco tiene una baja velocidad y temperatura de llama, una alta energía mínima de ignición y una estrecha inflamabilidad, utilizar un potente promotor de combustión resulta en un aumento de la estabilidad de la combustión, así como una mejora del rendimiento [7]. La adición de hidrógeno al amoníaco supone una gran mejora en su combustión y además elimina el problema que tiene el amoníaco en el arranque en frío [8]. Al mezclar amoníaco con hidrógeno se consigue una mayor resistencia al autoencendido debido a la alta temperatura de autoignición y al número de octano que se consigue con este combustible. Esto permite utilizar una relación de compresión más alta y mejora las propiedades termoquímicas como la presión y temperatura lo que supone una mejora en eficiencia [9].

Se han tomado varios enfoques prácticos para mejorar el rendimiento de un motor que utiliza amoníaco como combustible. Algunas de las posibilidades son utilizar una alta relación de compresión, mezclar el amoníaco con una pequeña fracción de hidrógeno e incluso producir

hidrógeno a bordo a partir del amoníaco. Una gran ventaja de utilizar hidrógeno como promotor de la combustión es que es posible obtenerlo a partir del amoníaco [10]. El hidrógeno tiene una alta difusividad molecular y esto hace que se mejore la homogeneidad de la mezcla lo cual resulta en una mayor eficiencia de combustión. Aumentando la fracción de hidrógeno se incrementa el aporte de energía total al sistema [11].

3.3 MATERIA PARTICULADA

Cada día aumenta la cantidad de estudios que demuestran que la contaminación del aire produce efectos adversos sobre la salud humana como pueden ser síntomas respiratorios o incluso el cáncer de pulmón. Otros efectos adversos incluyen impacto negativo en la fertilidad, en el desarrollo neuronal, en las capacidades cognitivas, vinculación a la obesidad y hasta el envejecimiento [12]. La materia particulada está compuesta por partículas sólidas y líquidas contenidas en el aire con concentraciones que varían. Se caracteriza por tener diferentes tamaños y puede estar compuesta de ácidos, sales, materiales carbonosos, metales, tierra y polvo [13]. A su vez, es la fracción de la contaminación del aire que mayor relación tiene con enfermedades en humanos y animales. Hoy en día, hay una gran cantidad de personas que trabajan en lugares donde se exponen a materia particulada y esto supone un gran riesgo para su salud. Así, se deben identificar este tipo de agentes para poder prevenir complicaciones causadas por la exposición que pueden derivar muy fácilmente en efectos sobre el sistema cardiopulmonar y enfermedades cardiovasculares.

Estar expuesto a materia particulada durante un tiempo prolongado provoca cambios y una respuesta inflamatoria crónica en las vías respiratorias. Se puede relacionar directamente con el desarrollo primario del asma, así como de la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica [13]. La exposición a materia particulada puede no solo ocurrir en el lugar de trabajo, se pueden encontrar grandes concentraciones en lugares habitados por personas. Se ha podido demostrar que las personas que residen en estos lugares experimentan una mayor incidencia de síntomas respiratorios [14].

El material particulado (PM por sus siglas en inglés) se puede clasificar en partículas atmosféricas según su tamaño, PM10 son aquellas partículas con diámetro de hasta 10 μm , las PM2.5 son las consideradas partículas finas y tienen un diámetro de hasta 2,5 μm , las PM0.10 son las partículas ultrafinas y su diámetro llega hasta 0,10 μm . Por último, están las nanopartículas que son las PM0.05 y tienen un diámetro que llega hasta 0,05 μm (es lo mismo que 50 nm).

Las partículas PM10 son las que plantean los problemas más importantes para la salud humana. Uno de los motivos es que este tipo de partículas consigue alcanzar lo más profundo de los pulmones e incluso acceder al flujo sanguíneo en algunos casos [15]. La organización mundial de la salud ha estimado que la contaminación de materia particulada contribuye a aproximadamente 800.000 muertes anuales.

En cuanto al medio ambiente, las consideradas partículas finas (PM2.5) son responsables de la disminución de la visibilidad y de la creación de una atmósfera brumosa en muchas ciudades. Además, pueden ser transportadas por el viento y acabar sobre el suelo y el agua, esto puede provocar que lagos y arroyos tengan más acidez, así como una disminución de los nutrientes del suelo [13].

El tamaño de las partículas influye en los impactos ambientales que tiene la materia particulada, tiene un efecto sobre el tiempo que permanece en la atmósfera, las propiedades ópticas que tiene, la superficie y la manera que reacciona dentro de la atmósfera, así como los efectos sobre la salud. Las partículas que más tiempo permanecen en la atmósfera son las que tienen un diámetro de 0,1 a 10 μm y es en torno a una semana de duración. El fenómeno de sedimentación hace que las partículas de mayor tamaño se eliminen de la atmósfera rápidamente. Para las partículas más pequeñas son la difusión y la coagulación los fenómenos que las eliminan. Las partículas de 10 nm tienen un tiempo de residencia de alrededor de 15 minutos [16].

La materia particulada emitida por los motores de combustión interna es un motivo de preocupación para los fabricantes debido a que influye en el rendimiento y el desgaste del motor, así como en el impacto que tiene en el medio ambiente. Pueden estar asociadas a la

formación de depósitos dentro del cilindro y las válvulas de admisión y llegan a obstruir los sistemas de recirculación de gases de escape, así como aumentar el desgaste del motor cuando se reciclan a través de este sistema. A pesar de ello, las principales preocupaciones acerca del material particulado para los fabricantes de motores diésel y de encendido por chispa son ambientales, concretamente los efectos perjudiciales sobre la salud además de la disminución de la visibilidad en las ciudades y la acumulación de suciedad en los edificios.

Los motores diésel son los que producen las mayores emisiones de partículas finas, las emisiones de masa de material particulado emitido por estos motores suelen ser de 10 a 100 veces superior a las de los motores de encendido por chispa. Se ha descubierto que la deposición pulmonar de material particulado aumenta a medida que disminuye el tamaño de las partículas [17]. Además, las partículas que no son tóxicas cuando tienen un tamaño del orden de micrómetros si resultan serlo cuando su tamaño ronda los nanómetros. Prácticamente toda la masa de la materia particulada emitida por los motores de combustión interna se encuentra en el rango de diámetro de las nanopartículas. También se sabe que los motores y los vehículos son los principales contribuyentes de partículas finas a la atmósfera en áreas urbanas [17].

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el amoníaco tiene un uso muy extenso, permite alimentar a más de la mitad de la población mundial. Su uso como fertilizante no para de crecer año tras año como se puede observar en la Figura 12.

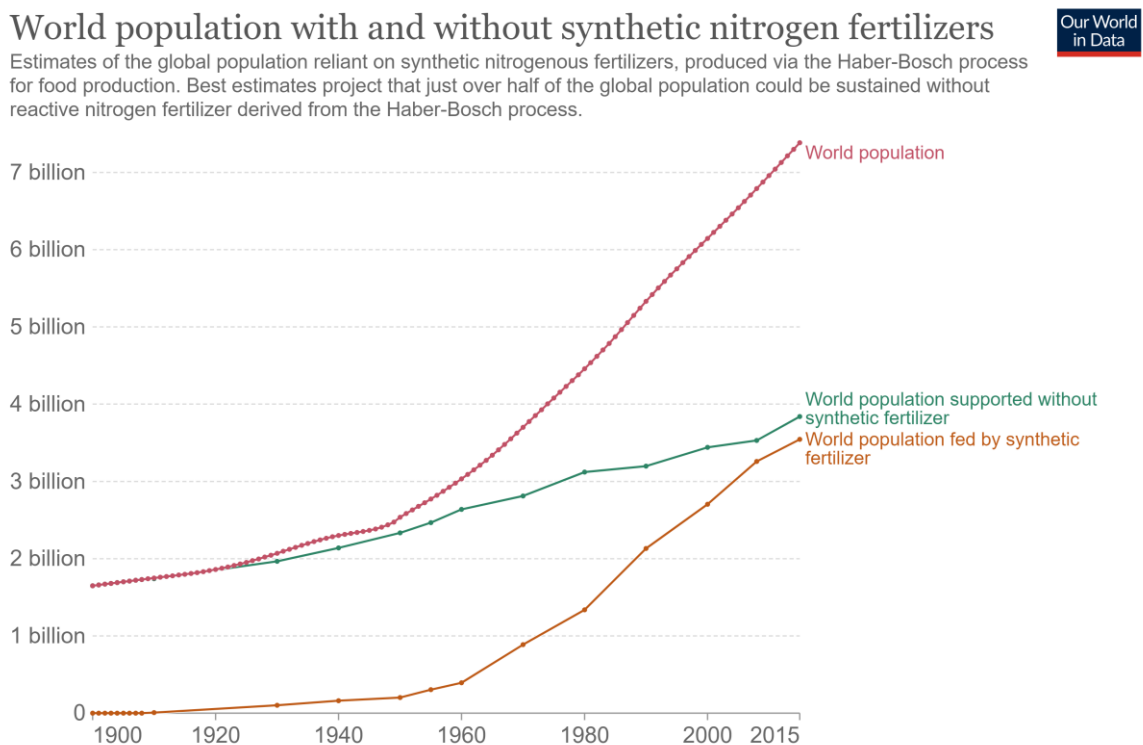


Figura 12: Estimación de la población mundial dependiente de fertilizantes nitrogenados sintéticos para la producción de alimentos [19]

Convencionalmente el amoníaco se produce a través del proceso Haber-Bosch utilizando gas natural como materia prima principal. Mediante este proceso más de 180 millones de toneladas de amoníaco son obtenidas anualmente. Esto contribuye al 1,5-2,0% del total de las emisiones globales de CO₂. Es el quinto producto químico de mayor volumen producido

y existen maneras de producir amoniaco anhidro utilizando hidrógeno y nitrógeno provenientes de fuentes renovables como se muestra en la Figura 13.

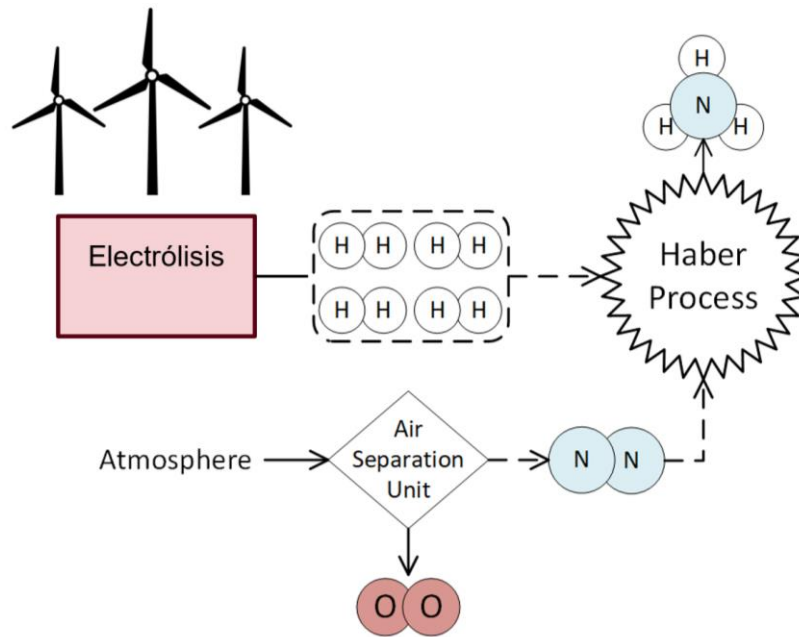


Figura 13: Obtención de amoniaco mediante el proceso Haber-Bosch [18]

Igual que el hidrógeno, la forma de obtener amoniaco se puede clasificar según distintos colores. El amoniaco se denomina “gris” cuando se produce a partir de gas natural o carbón debido a que este proceso emite CO₂ a la atmósfera. Se considera “verde” si se obtiene utilizando hidrógeno verde que es el obtenido a través de electrólisis usando electricidad generada a través de fuentes renovables como son la energía solar, eólica o la hidroeléctrica. Posteriormente, se realiza una combinación del hidrógeno verde con nitrógeno para formar amoniaco. Por otro lado, el amoniaco “azul” es el que proviene de gas natural o de carbón, pero se captura el CO₂ que se genera en este proceso y se almacena para que no pueda ser liberado a la atmósfera. Por último, se considera amoniaco “rosado” cuando se utiliza hidrógeno rosado que es el obtenido mediante electrólisis utilizando energía nuclear.

Existen por tanto muchas maneras de producir amoniaco siendo varias de ellas sostenibles con el medio ambiente. Este químico ya se produce a gran escala y tiene una infraestructura de distribución y almacenamiento establecida. De esta manera, la industria del amoniaco no

parte desde cero para hacer frente a un aumento de su demanda para la producción de energía mediante su uso en motores de combustión interna. En comparación con los combustibles fósiles tradicionales como la gasolina, el amoniaco tiene menos densidad de energía y por tanto no puede sustituir directamente a este tipo de combustibles sin adaptar el motor previamente.

El amoniaco es tóxico y corrosivo de forma que los gases de escape de un motor en el que se utilice deberán de ser tratados apropiadamente. Se han realizado muchos estudios sobre las características de las emisiones de gases de los motores de amoniaco, pero lo que nunca se ha investigado es la materia particulada que emiten. Las emisiones de materia particulada son muy perjudiciales para la salud humana, así como para el medio ambiente. Es por ello por lo que al considerar el amoniaco viable como una fuente de obtención de energía mediante su uso en motores de combustión interna es necesario estudiar las características de este tipo de emisiones.

4.2 OBJETIVOS

La investigación previa que se ha realizado sobre el uso de amoniaco en motores de combustión interna se ha enfocado en el rendimiento dinámico y las emisiones. Con esta investigación se quiere averiguar las características de la materia particulada generada por motores que trabajan con amoniaco puro y con amoniaco al que se le añade una pequeña cantidad de hidrógeno para facilitar la combustión. Esto se debe a que la inhalación de nanopartículas puede tener efectos dañinos para la salud humana, así como para el medio ambiente. Así mismo, las nanopartículas resultan ser más tóxicas que las partículas de mayor tamaño ya que tienen mayor movilidad.

En los experimentos realizados en este estudio se extraen muestras directamente del escape del motor sin realizarles ningún tratamiento. Antes de que la muestra pase por ningún instrumento de medida los gases de escape pasan por un tanque diseñado para reducir las fluctuaciones de presión producidas por el motor. Después, la muestra pasa por instrumentos de medida de materia particulada y de emisiones de gases. Los resultados obtenidos permiten

conocer características específicas de la materia particulada que emite el motor para determinar patrones de comportamiento. También se realizan mediciones de las variables del motor para relacionarlas con las emisiones de materia particulada. Por último, se relacionan las emisiones de gases con las de materia particulada para averiguar si existen correlaciones.

4.3 OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

El uso de amoníaco anhidro (NH_3) como combustible posee muchos beneficios frente a los combustibles fósiles tradicionales. Su uso se alinea con el objetivo número 7 de los Objetivos del Desarrollo Sostenible debido a que es una forma de energía asequible y no contaminante. Es asequible ya que hoy en día se produce a gran escala lo cual abarata significativamente sus costes de obtención. Por otro lado, permite producir energía cumpliendo los objetivos de neutralidad de carbono establecidos en la Unión Europea debido a que no se genera dióxido de carbono cuando se quema en un motor.

Además, el uso de amoníaco como combustible se alinea también con el objetivo número 13 de acción por el clima ya que incentivar el uso de amoníaco frente a los combustibles fósiles que se utilizan actualmente tendría grandes beneficios sobre el medioambiente. Esto es porque se ayudaría a frenar el calentamiento global debido a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Capítulo 5. SISTEMA EXPERIMENTAL

5.1 CONFIGURACIÓN DEL MOTOR

El motor utilizado fue un motor de octanaje Waukesha Cooperative Fuel Research (CFR) que se muestra en la Figura 14. La relación de compresión de este motor puede ser modificada moviendo la culata del cilindro con respecto al bloque del motor hasta un máximo de 18:1, que es el valor utilizado en esta investigación. La cámara de combustión de este motor tiene un diseño simple que permite realizar estudios de combustible sin que se produzca alta turbulencia (como el swirl y tumble). Se utilizó un transductor de presión de alta velocidad Kistler 6125B que se ubicó en el lado opuesto a la bujía para recopilar datos de presión dentro del cilindro cada 0,1 grados del ángulo del cigüeñal (CAD).

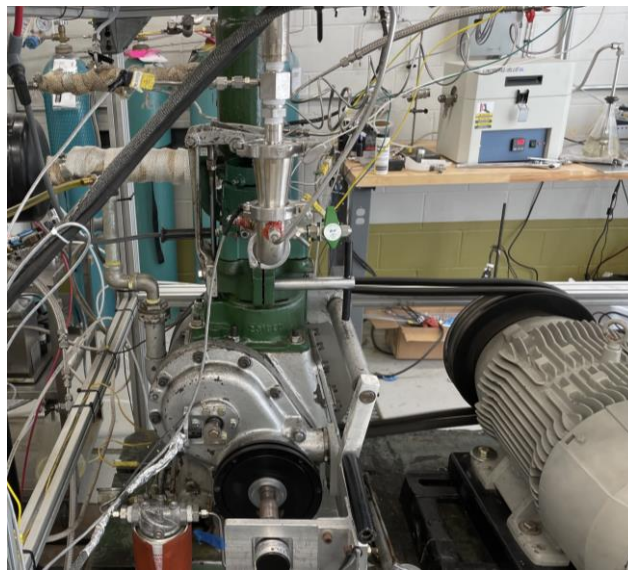


Figura 14: Motor CFR junto al dinamómetro [18]

Los instrumentos de control de flujo de aire y combustible, el control del motor y los dispositivos de medición de datos del motor se muestran en la Figura 15. Se utilizó un sistema centralizado de aire comprimido para suministrar aire limpio y seco al motor. Un controlador de flujo de masa (MFC) suministraba aire comprimido seco que es amortiguado

por el colector de admisión. Un calentador eléctrico en línea se encargaba de calentarlo antes de llegar al colector de admisión. Los dos tipos de combustibles utilizados fluían hacia el colector de admisión y el MFC los controlaba. Se utilizó absorción de oscilación de presión para purificar el aire comprimido, eliminando la humedad y el dióxido de carbono. Se utilizó un controlador de flujo de masa Brooks 5853E para controlar el flujo de aire y se configuró un tanque de acero de 30 galones como resonador de presión para reducir las pulsaciones de flujo. Se usó un calentador de proceso Omega AHPF-101 para calentar el aire de admisión, que luego se mezcló con el combustible a temperatura ambiente antes de ser suministrado al motor. Se colocó un termopar después de la salida del calentador para mantener constante la temperatura de admisión mediante un controlador PID. Las presiones y temperaturas se midieron de nuevo justo antes de las válvulas de admisión debido a posibles pérdidas de carga resultantes de la mezcla y las pérdidas ambientales. Se utilizaron termopares Omega Type-K para medir todas las temperaturas y transductores de presión Omega PX419 para medir las presiones.

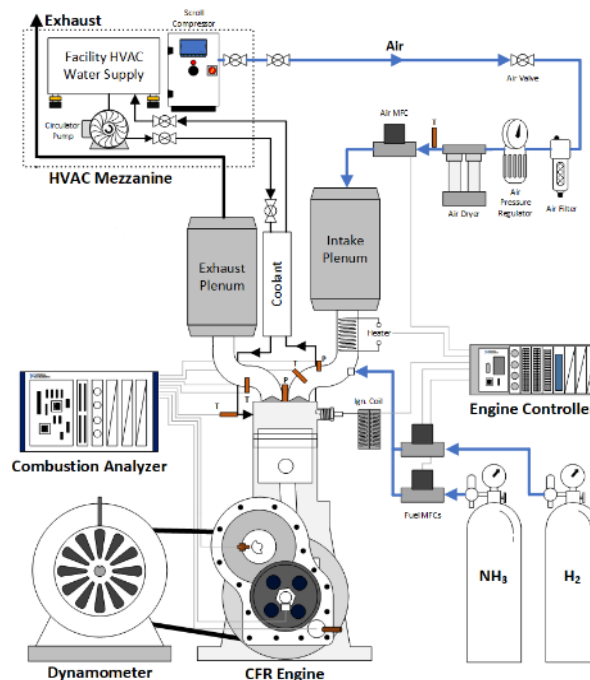


Figura 15: Esquema de los componentes del motor CFR utilizados para realizar los experimentos [18]

Para medir el combustible compuesto de amoníaco e hidrógeno en condiciones estables se utilizó un controlador de flujo de masa Brooks 5851. El dosado (ϕ) se modificó realizando cambios en los caudales de aire y amoníaco bajo condiciones estables del motor. Se utilizó un National Instruments cRIO-9074 conectado a LabVIEW para establecer los flujos de admisión y los controles de encendido. Esto incluyó también la adquisición de datos de presión y temperatura a baja velocidad. Para el sistema de adquisición de datos a alta velocidad de los datos de presión en el cilindro y el colector de admisión, se utilizó un National Instruments PXI-1042, acoplado a LabVIEW.

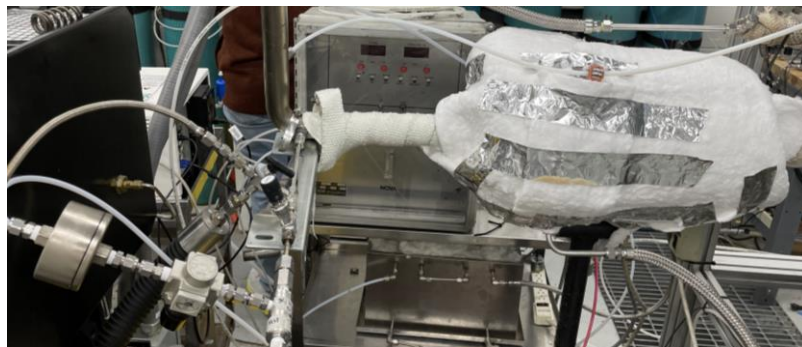


Figura 16: Aislamiento del plenum de gases de escape [18]

Para reducir las pérdidas de calor y evitar que pudiese haber condensación de los gases de escape, se cubrió todo el conducto de escape, así como el plenum con material aislante compuesto por fibra de vidrio principalmente como se puede ver en la Figura 16.

5.2 SISTEMA DE DILUCIÓN DE LA MUESTRA

Los gases de escape como el amoníaco, agua, óxidos de nitrógeno y oxígeno se midieron con un banco de emisiones AVL i60 SESAM FT que consistía en un espectrómetro de infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR) y un detector paramagnético de oxígeno (PMD). El PMD permite calcular la cantidad de O_2 presente en el escape que al compararlo con la cantidad que había al principio da una indicación de cómo de eficiente ha sido la combustión dentro del cilindro. Se utilizó una bomba eyectora de vacío Air-Vac TD260h y

una placa de orificio para diluir los gases de escape y evitar daños en los instrumentos de partículas. Esto fue necesario debido a la alta concentración de amoníaco presente, que podría dañar fácilmente algunas partes de estos instrumentos. El aire limpio y seco del sistema centralizado pasaba a través de un filtro HEPA antes de entrar en la bomba eyectora utilizada para este propósito. La Figura 17 contiene el diagrama que muestra los instrumentos de medición de los gases de escape y de materia particulada después del sistema de dilución. Se extrae el escape sin tratar a través de una sonda de muestra conectada aguas abajo del plenum de escape.

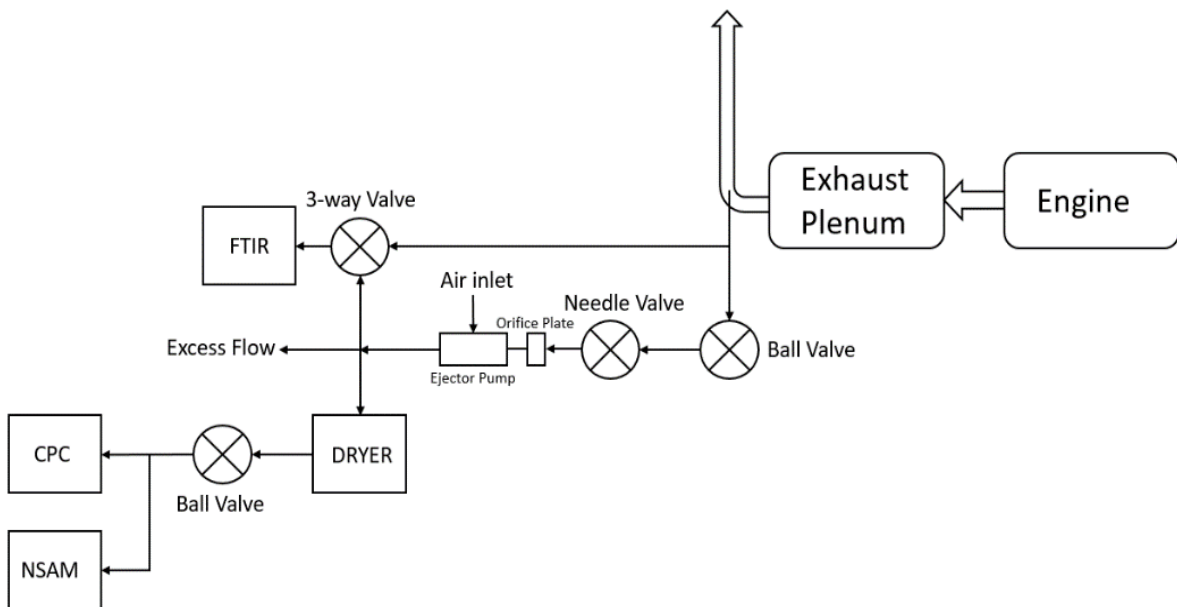


Figura 17: Esquema del sistema de muestreo

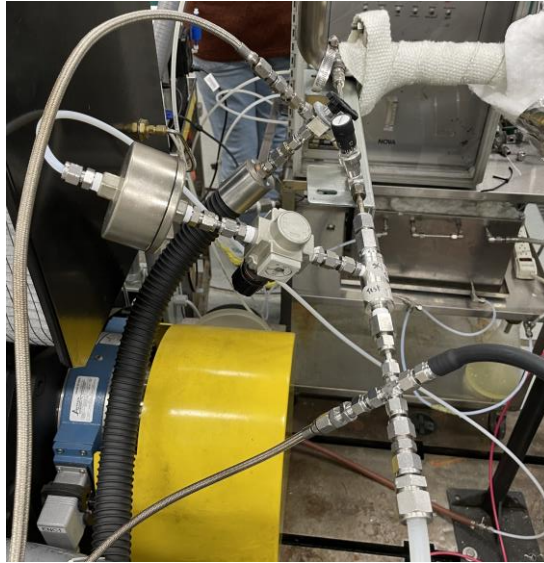


Figura 18: Sistema de dilución utilizado para el muestreo de los gases de escape del motor [18]

La muestra de escape se diluyó considerablemente para reducir el efecto dañino del amoníaco y el muestreo se realizó durante 1 minuto. El UCPC tiene accesorios de cobre y latón que podrían haber sido dañados por la alta concentración de amoníaco en el escape sin tratar. Inmediatamente después del muestreo, se purgaron los instrumentos de partículas para reducir aún más el posible daño, ya que el amoníaco tiende a adherirse a las paredes. Se situó una válvula antes del UCPC y el NSAM para que después de haber realizado el purgado se cerrase esa válvula y se conectasen filtros HEPA a la entrada de los instrumentos de materia particulada entre cada una de las mediciones. De esta manera, cuando se quería tomar una medida, se desconectaban los filtros HEPA, se volvían a conectar las líneas de muestreo a los instrumentos y se abría la válvula.

Así mismo, como se muestra en la Figura 18, se ajustó una válvula de aguja para tener un flujo suficiente a través del sistema y no saturar los instrumentos de medición de partículas. Después de determinar la posición adecuada de la válvula, se utilizó un gas de calibración compuesto de 9,5% de dióxido de carbono balanceado con nitrógeno que se usó para encontrar la relación de dilución. El gas de calibración se suministró a través del escape del motor y se hizo pasar nitrógeno a través de la bomba eyectora para diluir el gas de calibración

y determinar la relación de dilución correspondiente. Se encontró que la relación de dilución era de 1794,33 al comparar el porcentaje de dióxido de carbono del gas de calibración con el porcentaje encontrado después de la bomba eyectora y se mantuvo esta relación constante para todos los experimentos. Con esta configuración, se estableció una válvula de 3 vías para permitir que el analizador de especies gaseosas del escape midiera el escape sin tratar, el aire de dilución y el escape diluido. También se midieron las especies gaseosas del escape antes y después de la dilución para cada condición probada.

5.2.1 SECADO DE LA MUESTRA

El motor utilizado no estaba optimizado para quemar amoníaco ni para quemar tampoco un combustible compuesto de amoníaco con hidrógeno debido a que es un motor para investigación. Es por ello por lo que podía haber una pequeña cantidad de amoníaco que no llegase a quemarse dentro del cilindro y fuera expulsada por el escape. Como se ha comentado anteriormente se tomaron ciertas medidas para prevenir el daño a los instrumentos de medida y una medida adicional fue la de secar la muestra para reducir la cantidad de amoníaco presente en los gases de escape lo máximo posible. Este secado se realizó haciendo pasar los gases de escape ya diluidos a través de dos depósitos llenos de gel de sílice antes de que fueran medidos por los instrumentos de materia particulada como se observa en la Figura 19. Antes de preparar los experimentos, el gel de sílice se metió en un horno al vacío para que estuviera lo más seco posible. Luego se almacenó en bolsas herméticas y en el momento en el que se necesitó para el experimento se rellenaron los tanques del sistema de secado. Cada vez que se realizaba un experimento nuevo se cambiaba el gel de sílice por uno que estuviese más seco de manera que fuese más efectivo para reducir la humedad y la cantidad de amoníaco presente.



Figura 19: Sistema de secado de la muestra de gases de escape [18]

5.3 CONDICIONES DEL EXPERIMENTO

Se utilizó el manejo del aire en la celda de prueba para mantener la temperatura y presión que rodeaba al motor en condiciones ambientales. En la Tabla 1 se muestran los parámetros del motor utilizados, así como las distintas condiciones que se probaron. La primera medición de materia particulada se tomó cuando el motor estaba frío y en funcionamiento solo con suministro de aire. En esta condición, las temperaturas del refrigerante y del aceite estaban en condiciones ambientales. Se suministró una combinación de hidrógeno y amoníaco al motor para calentarlo en condiciones estequiométricas antes de la siguiente recopilación de datos. Este proceso de calentamiento se aceleró con una carga de admisión calentada y un circuito de calentamiento de aceite.

El muestreo de datos se realizó después de modificar el dosado y la composición de la mezcla de combustible una vez que el motor alcanzó temperaturas de funcionamiento estables. La medición correspondiente al funcionamiento en caliente se registró después de completar las pruebas de encendido en las cuales las temperaturas del aceite y del refrigerante se

mantuvieron consistentes con las condiciones de encendido y solo se hizo pasar aire a través del sistema.

Parámetro	Valor	Unidades
Velocidad motor	900	[RPM]
Relación de compresión	18:1	[-]
Componentes del combustible	NH ₃ y H ₂	[-]
Temperatura del refrigerante	97	[°C]
Temperatura del aceite	51 - 59	[°C]
Condición del motor		
Relación de equivalencia (ϕ)	1; 1,2	[-]
Cantidad de hidrógeno en el combustible	0; 5	[%]

Tabla 1: Parámetros y condiciones del motor usados para los experimentos

Los parámetros del motor que no cambiaron fueron la velocidad del motor, la relación de compresión y las temperaturas de funcionamiento. La velocidad del motor se mantuvo en un valor constante de 900 RPM ya que el cigüeñal estaba conectado a un dinamómetro a través de correas en V. Se probaron un total de cuatro condiciones del motor. El tiempo de encendido MBT (Minimum Spark Advance for Best Torque) es el tiempo óptimo en el que salta la chispa de manera que se proporciona el mayor torque posible para una condición determinada de funcionamiento. Este valor ya se conocía para cada una de las condiciones debido a que ya se había optimizado en estudios previos de este motor en las mismas condiciones.

La relación de equivalencia se estableció en un valor constante y se probaron las diferentes composiciones de combustible. Los dos tipos de combustible que se probaron son amoniaco puro y amoniaco mezclado con un 5% de concentración de hidrógeno. El caudal de masa del combustible se mantuvo constante en un valor de 3 g/s en todos los experimentos.

5.4 PROCEDIMIENTO OPERATIVO

Objetivos:

- Llevar a cabo los experimentos con el motor CFR en condiciones conocidas y con tiempo de encendido MBT
- Medir las emisiones de materia particulada
- Distinguir entre la materia particulada emitida resultante de las gotas de aceite del motor y de la oxidación de las generadas por el proceso de combustión del amoniaco
- Determinar las tendencias de la materia particulada en función del dosado y de la presencia de hidrógeno en el combustible

Procedimiento:

Controles de seguridad

1. Examinar todas las líneas de muestreo en busca de signos de fugas o daños
2. Asegurarse de que haya un camino despejado alrededor del motor y de los instrumentos de medida

Encendido de los instrumentos

1. Conectar los filtros HEPA a la entrada de los instrumentos de medición de materia particulada
2. Asegurarse de que la botella de alcohol conectada al UCPC tenga suficiente líquido
3. Encender el UCPC y el NSAM utilizando el interruptor ubicado en la parte de detrás, estos instrumentos tardan 10 minutos en calentarse. El tiempo de calentamiento que queda se muestra en la pantalla de estos instrumentos
4. Una vez el UCPC y el NSAM estén listos, comprobar su estado en el software AIM para asegurarse de que no haya errores presentes
5. Desconectar los filtros HEPA del UCPC y del NSAM y conectarlos a la línea de muestreo

6. Cerrar la válvula entre el escape del motor y la bomba eyectora de vacío

Muestreo de gases y de materia particulada:

Funcionamiento de motor sin combustible

1. La válvula de los instrumentos de medida de materia particulada debe estar abierta al empezar
2. Encender el sistema de dilución abriendo el circuito de aire comprimido que se sumista a la bomba eyectora de vacío a una presión de 75 psi
3. Posicionar la válvula de 3 vías conectada al FTIR para que mida el gas diluido, tomar medidas de la concentración de oxígeno del gas diluido durante este tiempo
4. Seguir el procedimiento de encendido del motor según el manual de este
5. La válvula de aguja estará cerrada inicialmente, se ajustará para obtener un valor de materia particulada diluida de aproximadamente $2 \cdot 10^4$ a $3 \cdot 10^4$. Una vez ajustada esta posición de la válvula se mantendrá durante toda la duración del experimento
6. Empezar la recolección de datos en el programa AIM. Ajustar el tiempo de muestreo a 1 minuto. Se realizarán 3 recolecciones de datos para el UCPC en condición de motor frío. Se realizarán de 1 a 3 recolecciones de datos de modos TB y A con el NSAM
7. Abrir la válvula de esfera antes de recolectar datos de manera que fluyan los gases de escape a través del sistema de muestreo
8. Cerrar la válvula de esfera, el aire de dilución seguirá fluyendo a través de la bomba eyectora para poder purgar los instrumentos
9. Realizar el purgado y conectar los filtros HEPA una vez finalizada la recolección de datos
10. Después de la recolección de datos, cerrar la válvula de los instrumentos de materia particulada, desconectar las líneas de muestreo de estos instrumentos y conectar los filtros HEPA

Funcionamiento del motor con combustible

1. Ajustar los valores de la temperatura de admisión y del dosado y esperar a que el motor alcance el estado estacionario
2. Poner el FTIR en modo standby. Una vez este instrumento comience a medir lo hará durante toda la duración de los experimentos y se anotarán los intervalos de interés para analizar posteriormente
3. Mediciones del gas sin diluir con el FTIR
 - Abrir la válvula del FTIR
 - Tomar medidas estables durante por lo menos 1 minuto
 - Apuntar el intervalo de tiempo en el que las medidas son estables
4. Mediciones de la materia particulada
 - Colocar la válvula de 3 vías del FTIR para que mida gas diluido. Poner el FTIR en modo de medición y esperar 30 segundos antes de proceder
 - Quitar los filtros HEPA de los instrumentos de medición de materia particulada y conectarlos a las líneas de muestreo
 - Abrir la válvula situada antes de los instrumentos de medición de materia particulada y empezar la recolección de datos
 - o Realizar 3 recolecciones de datos consecutivas con el UCPC y el NSAM en los modos TB y A
 - o Recolectar datos de la concentración de oxígeno diluido. Esto se realiza para comprobar que el ratio de dilución se mantiene constante
 - o Apuntar el momento en el que los datos recolectados por el FTIR son estables
 - Parar la recolección de datos de materia particulada
 - o Cerrar la válvula situada antes de los instrumentos de medición de materia particulada
 - o Desconectar las líneas de muestreo de los instrumentos de medición de materia particulada y conectarlos a los filtros HEPA

- Medición de la concentración de oxígeno en el gas de dilución (en el aire comprimido que se suministra). Esto se realiza para comprobar que el ratio de dilución de mantiene constante
 - Modificar la posición de la válvula de 3 vías de manera que el FTIR mida el gas de dilución
 - Cerrar la válvula de esfera situada antes de la válvula de aguja. No modificar la posición de la válvula de aguja
 - Apuntar el momento en el que la medición de la concentración de oxígeno es estable
- Repetir la medición de la concentración de oxígeno del escape del motor, del gas diluido y del gas de dilución para cada punto de medida
- Durante el tiempo en el que el motor aún no ha alcanzado el estado estacionario comprobar el estado de los instrumentos en busca de daños o de cambios de comportamiento

Apagado

1. Continuar el purgado de los instrumentos de medición de materia particulada durante 30 minutos
2. Apagar el UCPC y el NSAM con sus interruptores correspondientes
3. Desconectar el UCPC y el NSAM del sistema de muestreo para prevenir contaminación accidental y conectar un filtro HEPA a la entrada de cada uno de estos instrumentos

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se pueden dividir en tres partes dentro de las cuales se comparan las diferentes condiciones probadas. La primera parte contiene el análisis del desempeño del motor en la cual no se incluyen las condiciones en las que no se utilizó combustible. El análisis de las emisiones del escape del motor se encuentra en la segunda parte donde se compara cómo varían las emisiones de NH_3 , H_2O , NO_x y O_2 en cada condición probada. La tercera parte contiene los resultados de las emisiones de materia particulada.

6.1 DESEMPEÑO DEL MOTOR

El cigüeñal del motor que se utilizó en esta investigación estaba conectado a un dinamómetro a través de correas en V. Esto permitió mantener la velocidad del motor constante a 900 RPM desde el comienzo hasta el final del experimento. En el interior del cilindro estaba situado un transductor de alta velocidad que recopila datos de la presión interna en el cilindro cada 0,1 grados del ángulo del cigüeñal (CAD). El valor obtenido de la presión para cada instante permite calcular las curvas de presión y volumen de cada ciclo. Estas curvas se obtienen al calcular la presión media en cada instante para cada una de las condiciones en las que se operó el motor.

Como se puede observar en la Figura 20 las curvas obtenidas son cerradas y representan la cantidad de trabajo realizado por el motor en un ciclo completo para cada condición. El trabajo neto realizado por el motor en cada condición se obtiene calculando el área encerrada por cada curva. Cuanto mayor sea el área de la curva mayor es el trabajo realizado por el motor y por tanto, el ciclo es más eficiente.

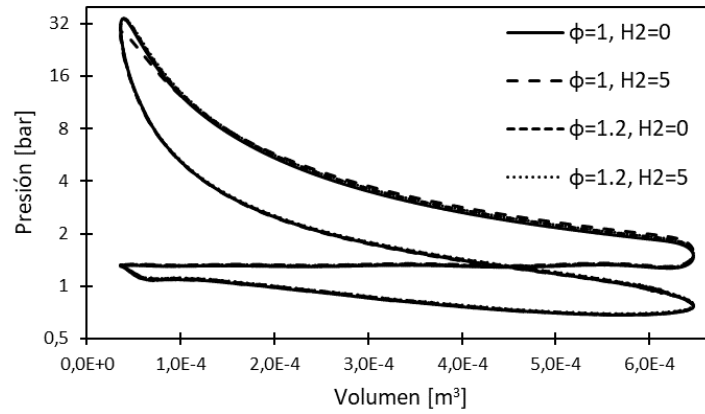


Figura 20: Curvas de presión y volumen para las cuatro condiciones probadas

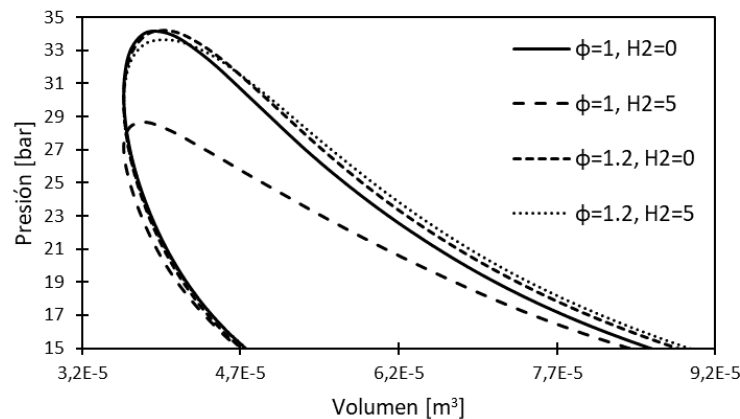


Figura 21: Ampliación de las curvas de presión y volumen para las cuatro condiciones probadas

Cuando el motor se opera en la condición 2, con un dosado estequiométrico y con hidrógeno en el combustible, la cantidad de trabajo realizado es la más baja. Se puede observar una disminución significativa en el trabajo realizado cuando el dosado es estequiométrico y se añade hidrógeno. No ocurre lo mismo cuando el dosado es 1,2 y se añade hidrógeno al combustible, en este caso el área obtenida es muy similar a cuando no hay hidrógeno. Estas son las condiciones 3 y 4 en las cuales el motor realiza más trabajo neto.

Número	Condición del motor	Temperatura escape [°C]	Presión escape [bar]	gIMEP [bar]	Eficiencia Térmica	Momento de la chispa [CAD]
1	ER=1 & H2=0%	375,546 ± 0,515	0,982 ± 0	2,913 ± 1,963	0,1807	37
2	ER=1 & H2=5%	412,577 ± 0,781	0,983 ± 0	2,906 ± 2,347	0,1798	30
3	ER=1,2 & H2=0%	377,384 ± 0,859	0,983 ± 0	3,095 ± 1,796	0,1644	38
4	ER=1,2 & H2=5%	375,285 ± 1,767	0,983 ± 0	3,101 ± 1,565	0,1638	34

Tabla 2: Parámetros de desempeño del motor para las 4 condiciones probadas

Las diferentes presiones y temperaturas de los gases de escape para las diferentes condiciones del experimento se muestran en la Tabla 2. La presión de estos gases se mantuvo constante para todos los casos en un valor inferior a la presión ambiente. La temperatura de escape sólo aumenta en la condición 2 cuando la relación de equivalencia se establece en 1 y se agrega hidrógeno al combustible. El encendido de la chispa, medido en grados del ángulo del cigüeñal antes del punto muerto superior, se ajustó para obtener la máxima potencia de salida del motor. Para la condición 2, el encendido de la chispa fue el más avanzado, esto produjo un aumento en la temperatura del escape. Esto se debe a que al adelantar el encendido de la chispa se le da más tiempo al combustible para quemarse. Además, al hacer que el combustible se queme durante más tiempo también se consigue que se queme de manera más completa, lo que aumenta la temperatura dentro de la cámara de combustión del motor.

La presión media indicada bruta (gIMEP, por sus siglas en inglés) cuantifica la presión promedio que el motor desarrolla en un ciclo completo sin tener en cuenta las pérdidas por bombeo. Este parámetro mide la capacidad de un motor para transformar la energía liberada a través de la combustión en trabajo útil. Tiene en cuenta la compresión y la carrera de

potencia y se ve afectado por cambios en las condiciones del motor. Se puede observar en la Tabla 2 que al cambiar la relación de equivalencia de 1 a 1,2 se consigue el mayor aumento en gIMEP. Esto se debe a que hay más combustible disponible para quemar en la cámara de combustión y por lo tanto se puede extraer más energía de él. Además, combinar amoniaco con hidrógeno aumenta ligeramente el gIMEP en la condición 2, cuando la relación de equivalencia es 1. Ocurre lo contrario para la condición 4, cuando la relación de equivalencia es 1,2. Por lo tanto, no se pueden sacar conclusiones sobre el efecto que tiene combinar amoniaco con hidrógeno sobre la potencia producida por el motor a partir de las condiciones que se probaron.

$$E.1 \text{ Eficiencia Térmica} = \frac{\text{Trabajo Útil}}{\text{Energía del combustible}}$$

El valor de la eficiencia térmica es una medida de cómo de bien un motor transforma la energía térmica del combustible quemado en trabajo útil, teniendo en cuenta todas las entradas de combustible. A partir de la Tabla 2, se puede observar que la eficiencia térmica disminuye a medida que se incrementa la relación de equivalencia, tanto cuando el contenido de hidrógeno en el combustible es 0% como cuando es 5%. Esto significa que la cantidad de trabajo útil que se obtiene es menor en relación con la energía disponible del combustible, como se puede ver en la ecuación E. 1. Una reducción en la eficiencia térmica puede deberse a muchas causas, incluyendo combustión incompleta, fricción, pérdidas de bombeo y aumento de la transferencia de calor.

6.2 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE GASES

Debido a la preocupación por dañar los instrumentos de partículas a causa de la alta concentración de amoniaco presente en el escape del motor, la muestra se diluyó en gran medida. La sonda de muestreo extraía una parte del escape que se diluía mediante una bomba eyectora a la cual se le suministraba aire comprimido. La relación de dilución obtenida fue de 1794,33 usando un gas de calibración que contenía una cantidad fija de dióxido de carbono para comparar el porcentaje de dióxido de carbono antes y después de la bomba

eyectora. Se fijó el flujo extraído por la sonda de muestreo mediante una válvula de aguja de manera que el factor de dilución de la muestra fue el mismo durante toda la toma de medidas. A pesar de que los instrumentos tenían pequeñas incertidumbres en los valores registrados, estas incertidumbres se incrementaron significativamente debido a este factor de dilución tan alto.

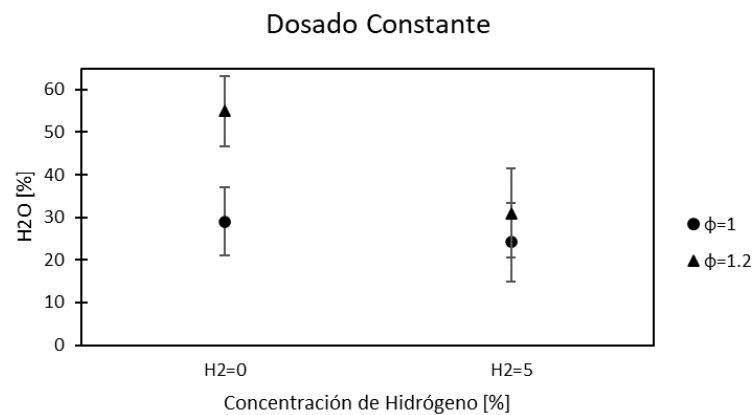


Figura 22: Variación de las emisiones de H₂O al modificar la concentración de hidrógeno

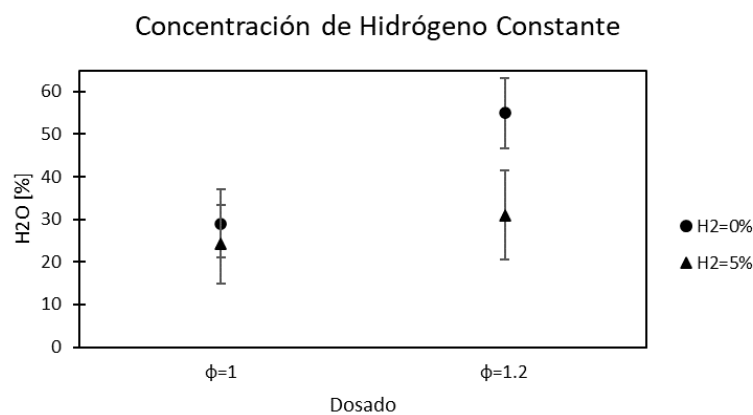


Figura 23: Variación de las emisiones de H₂O al modificar la relación de equivalencia

Los cambios en la concentración de agua presente en el escape de la muestra para las distintas condiciones probadas se muestran en la Figura 21 y la Figura 22. Se puede observar que cuando se agrega hidrógeno al combustible, las emisiones de agua disminuyen. Este cambio es más significativo cuando la relación de equivalencia es la más alta. Se puede ver que aumentar la relación de equivalencia conduce a una mayor emisión de agua en el cilindro. Por lo tanto, se puede concluir que se produce más vapor de agua cuando hay más amoniaco disponible para quemar de manera que tiene lugar una combustión más completa.

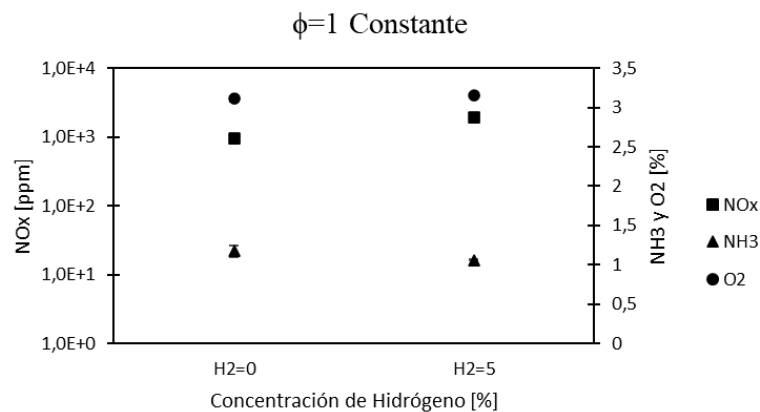


Figura 24: Variación de NO_x , NH_3 y O_2 al modificar la concentración de hidrógeno con dosado estequiométrico

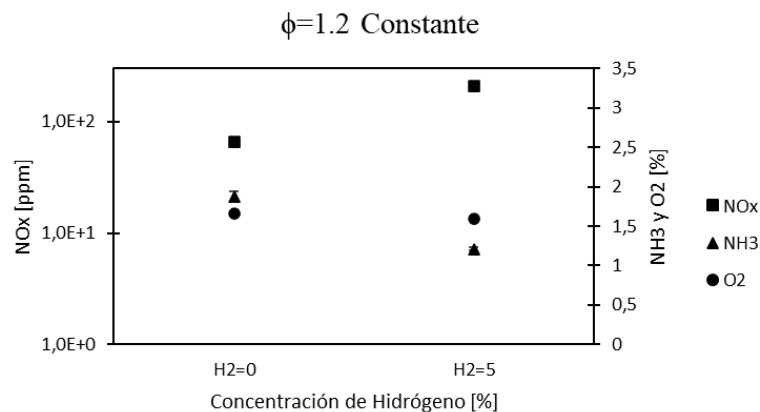


Figura 25: Variación de NO_x , NH_3 y O_2 al modificar la concentración de hidrógeno con dosado rico

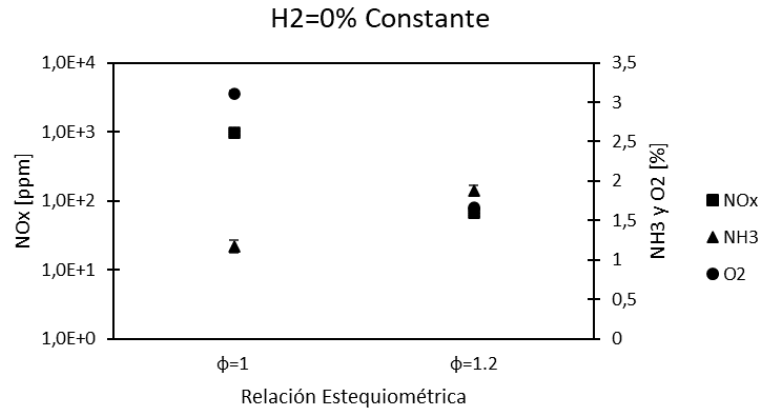


Figura 26: Variación de NO_x, NH₃ y O₂ al modificar la relación estequiométrica con 0% de hidrógeno

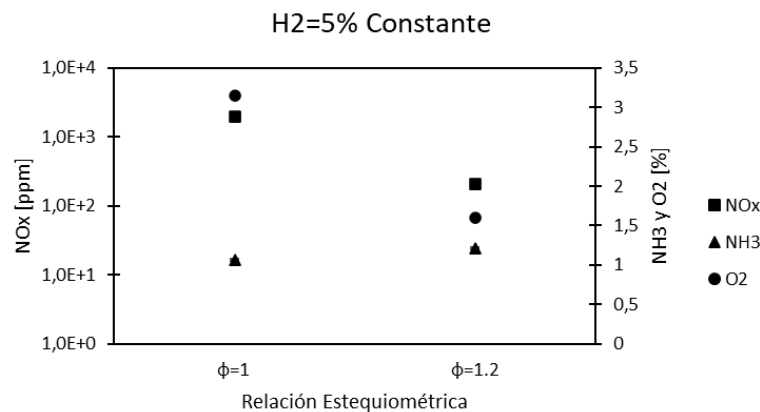


Figura 27: Variación de NO_x, NH₃ y O₂ al modificar la relación estequiométrica con 5% de hidrógeno

Los cambios en las emisiones de amoníaco para las diferentes condiciones del motor probadas se muestran en la Figura 23, la Figura 24, la Figura 25 y la Figura 26. El mayor aumento de este tipo de emisiones se da entre las condiciones 1 y 3, cuando se incrementa la relación de equivalencia y el combustible está compuesto únicamente de amoníaco. De esta manera, las emisiones más altas de amoníaco se producen en la condición 3. Además, la adición de hidrógeno al combustible reduce la cantidad de emisiones de amoníaco. Esto se debe a que el flujo de másico de amoníaco es menor, lo que resulta en que haya menos

presente en el escape. Además, cuando se agrega hidrógeno al combustible, se reduce el retardo de encendido que es el intervalo de tiempo entre la chispa y el encendido.

La cantidad de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), que incluyen óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2), se ve afectada por las variaciones en las condiciones del motor. Cuando se agrega hidrógeno, las emisiones de NO_x aumentan. Esto se debe a que se genera NO_x cuando se quema hidrógeno en un motor debido a que el aire alcanza mayores temperaturas [20]. Por el contrario, se produce una disminución más notable en estas emisiones cuando se incrementa la relación de equivalencia, tanto cuando hay presencia de hidrógeno en el combustible como cuando no la hay. Esto hace que las temperaturas sean más bajas en la cámara de combustión y que haya una menor formación de NO_x . Es atribuible a que el exceso de amoníaco puede actuar como un agente reductor que reduce la formación de NO_x debido a que ambos reaccionan juntos.

La adición de hidrógeno al combustible facilita la combustión porque uno de los beneficios que aporta es aumentar la velocidad de la llama. En consecuencia, esto debería de producir una disminución en la liberación de oxígeno en los gases de escape debido a que la combustión es más completa al haber una mayor velocidad de la llama dentro del cilindro. Sin embargo, este fenómeno no se puede observar en los resultados mostrados en la Figura 23. Adicionalmente, al aumentar la relación de equivalencia también se logra una combustión más completa, lo que minimiza el oxígeno que se libera en el escape. Esto es debido a que una mayor parte del oxígeno que entra al cilindro, para quemarse con el amoníaco, se consume.

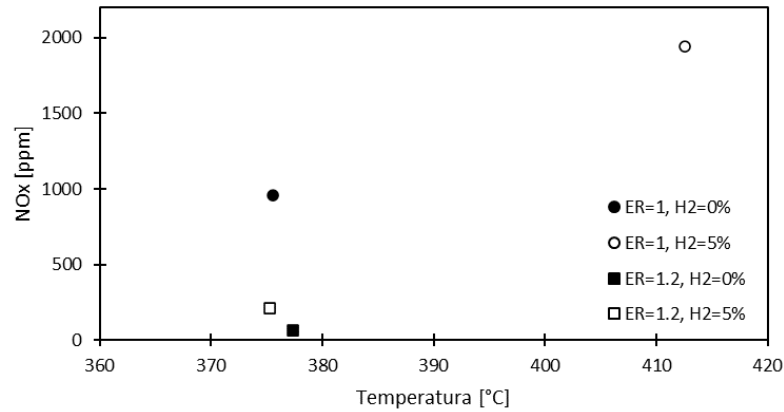


Figura 28: Emisiones de NO_x frente a la temperatura del escape para cada condición de motor

La formación de NO_x depende en gran medida de la temperatura del proceso de combustión. Normalmente, las emisiones de NO_x tienden a aumentar con temperaturas más altas. Este fenómeno se puede observar en la Figura 27 para la condición 2. En esta condición, se registra la temperatura de escape más alta y se corresponde con las mayores emisiones de NO_x. Las otras condiciones probadas no muestran mucha variación en la temperatura de escape, por lo que no se pueden sacar conclusiones a partir de los resultados de estas medidas.

6.3 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE MATERIA PARTICULADA

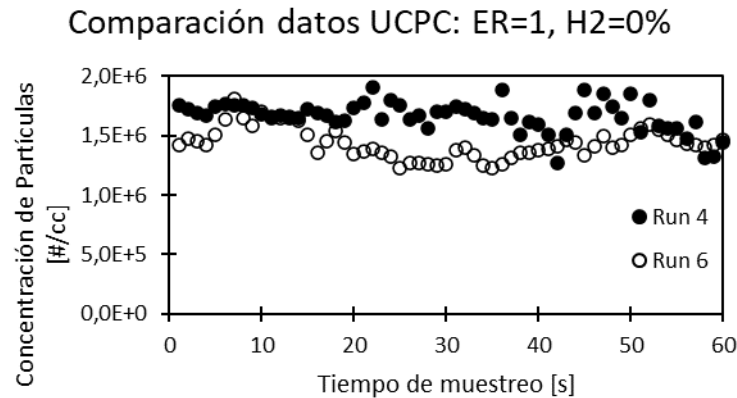


Figura 29: Comparación de datos obtenidos del UCPC para distintas muestras de la misma condición de motor

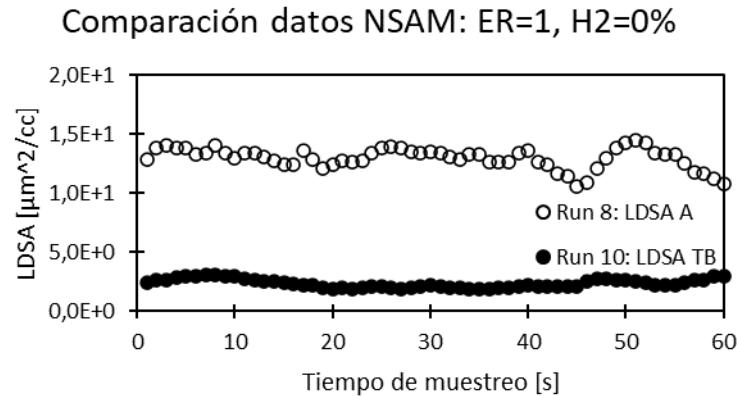


Figura 30: Comparación de datos obtenidos del NSAM para distintas muestras de la misma condición de motor

La variación de la concentración de partículas del UCPC y la LDSA del NSAM durante el período de medición para diferentes pruebas se muestra en la Figura 28 y la Figura 29. Se puede observar que la concentración no varía significativamente durante el período de un minuto para ambas pruebas registradas. Esto indica que las mediciones fueron estables para

la recopilación de datos del UCPC y los dos modos de funcionamiento diferentes del NSAM para las diversas condiciones del motor probadas.

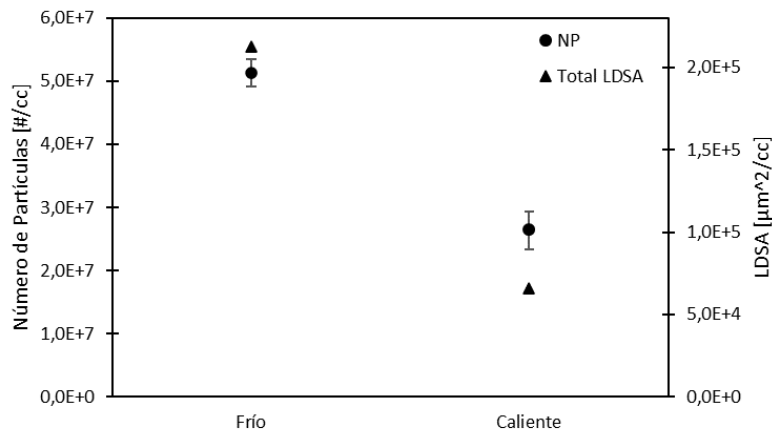


Figura 31: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para las condiciones de motor sin combustible

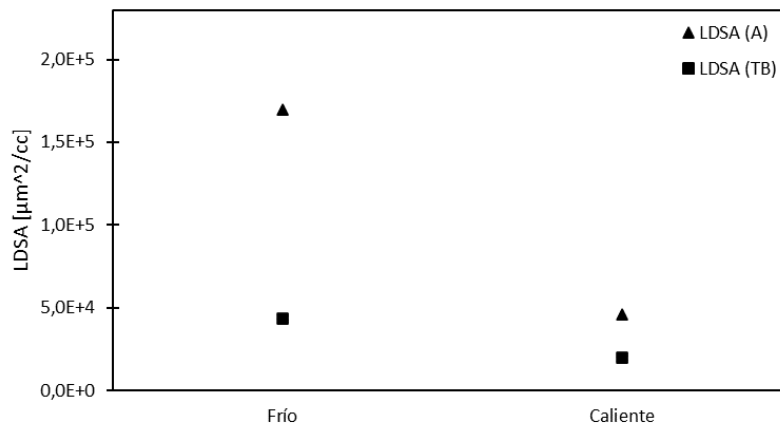


Figura 32: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para las condiciones de motor sin combustible

Los gráficos de la Figura 30 y la Figura 31 muestran la diferencia en las emisiones de materia particulada para ambos casos de funcionamiento del motor sin combustible. Se puede apreciar que el número total de emisiones de partículas disminuye significativamente cuando el motor está caliente. Además, se observa una mayor reducción en la detección de LDSA en el modo de medición alveolar (A) que en el modo traqueobronquial (TB) al observar el

gráfico de la Figura 31. La Figura 30 muestra que hay un menor número de partículas detectadas y es principalmente debido a que disminuye significativamente el número de partículas de mayor tamaño para el funcionamiento del motor en caliente. Esto significa que las características de las emisiones de partículas, que provienen del aceite del motor principalmente, dependen de la temperatura según se puede comprobar en estos dos casos.

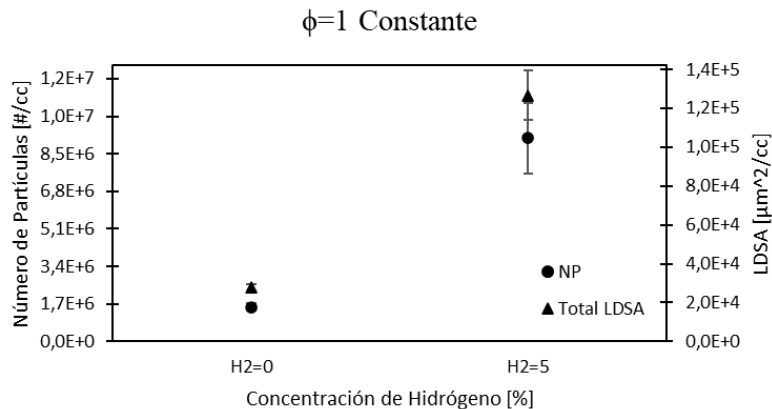


Figura 33: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los dos tipos de combustible usados con dosado estequiométrico

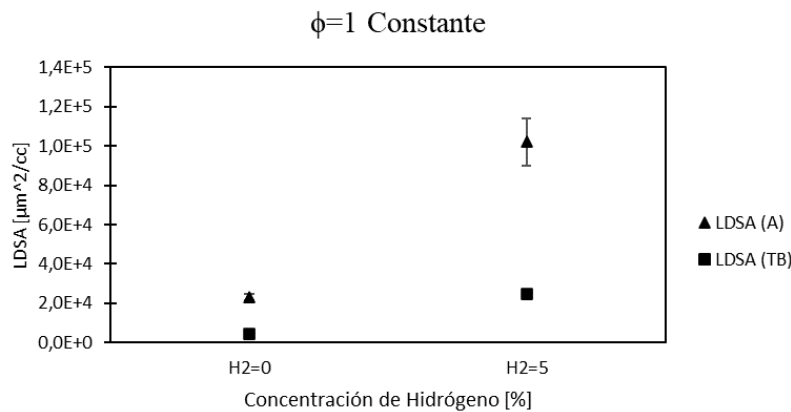


Figura 34: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para los dos tipos de combustible usados con dosado estequiométrico

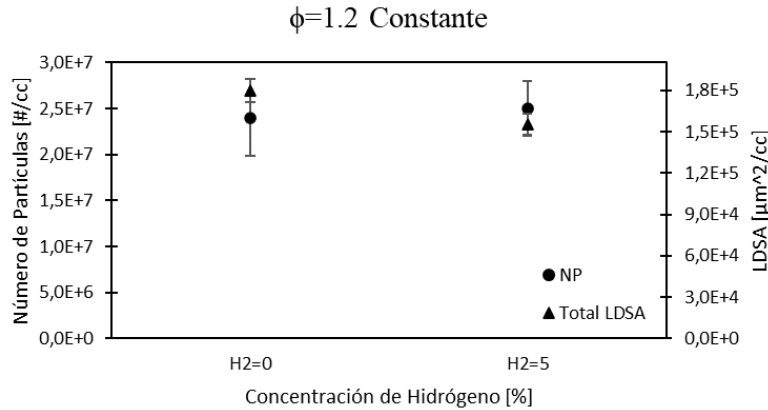


Figura 35: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los dos tipos de combustible usados con dosado rico

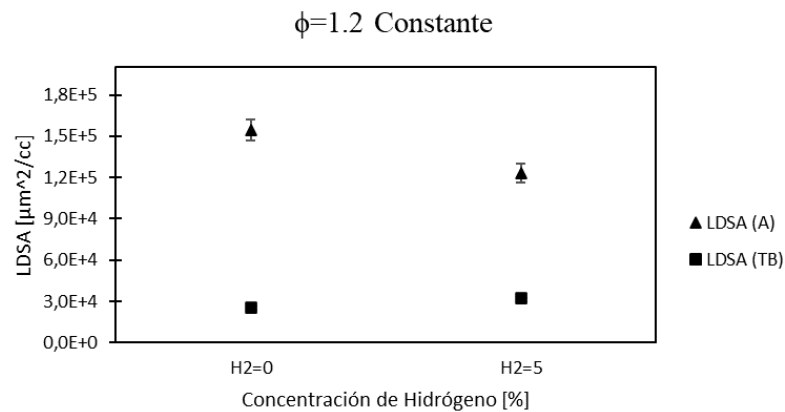


Figura 36: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para los dos tipos de combustible usados con dosado rico

El número de partículas emitidas por el motor aumenta para las condiciones 2 y 4 cuando se mezcla hidrógeno con amoníaco, tanto cuando la relación de equivalencia es 1 como cuando es 1,2. Como se puede observar en la Figura 32, este aumento es mucho más notable cuando el motor opera en condiciones estequiométricas. Las emisiones de partículas cuando la relación de equivalencia es 1 aumentan aproximadamente en un factor de 6 cuando se añade hidrógeno. Se emiten aproximadamente la misma cantidad de partículas cuando la relación de equivalencia es 1,2 y se añade hidrógeno en comparación con cuando no se añade. Se

puede notar una correlación directa entre el número de partículas y la LDSA en condiciones estequiométricas. Mientras que cuando la mezcla es rica en amoniaco, el número de partículas aumenta ligeramente y la LDSA total hace lo contrario. En este caso, cuando la relación de equivalencia es 1,2, la detección de LDSA aumenta en un 27% para el modo traqueobronquial (TB). Sin embargo, en el modo alveolar (A), la LDSA disminuye en un 20%. Dado que el modo alveolar detecta partículas más grandes, la reducción en este número supera el aumento en el modo traqueobronquial y es por eso por lo que la LDSA total disminuye ya que mide el área de deposición total.

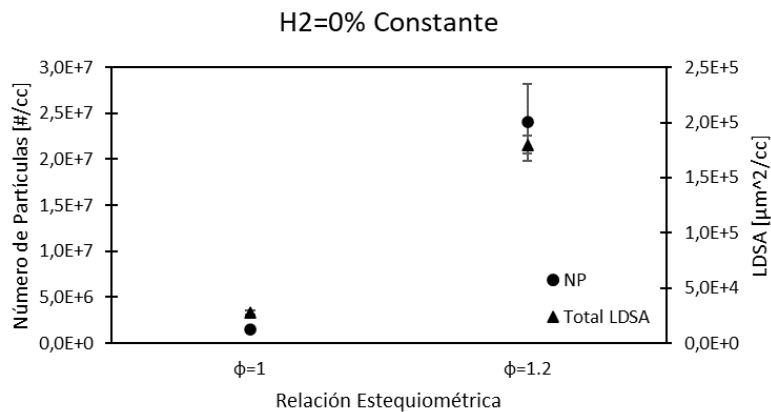


Figura 37: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los casos de combustible sin hidrógeno

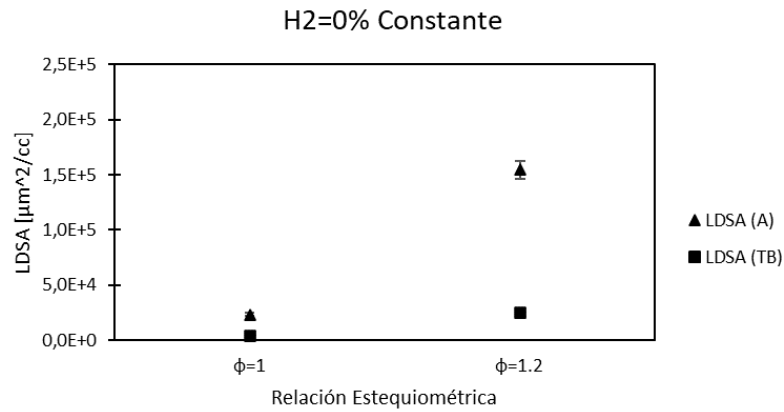


Figura 38: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para los casos de combustible sin hidrógeno

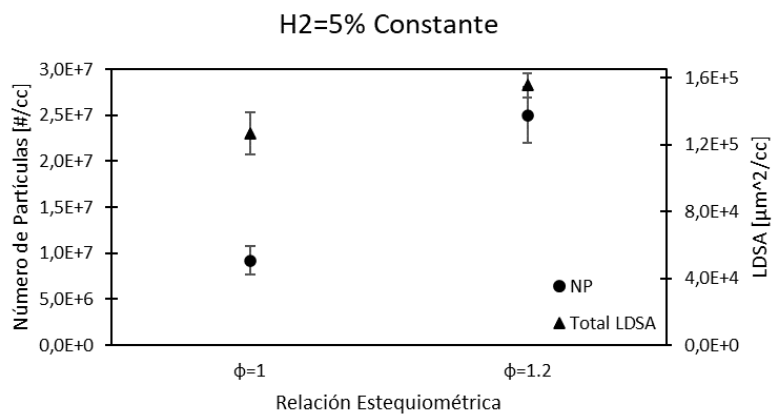


Figura 39: Resultados de los instrumentos de medida de materia particulada para los casos de combustible con hidrógeno

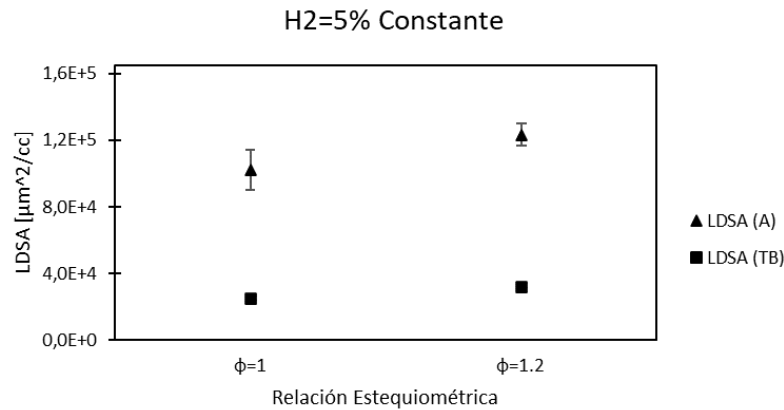


Figura 40: Resultados de los dos modos de medida del NSAM para los casos de combustible con hidrógeno

El número de partículas y la LDSA aumentan de manera similar cuando se incrementa la relación de equivalencia cuando solo se quema amoníaco. El número de partículas emitidas es casi 15 veces mayor para la condición 3 en comparación con la 1, cuando el combustible no contiene hidrógeno y la relación de equivalencia se aumenta. Se puede observar en la Figura 37 que la LDSA detectada en el modo alveolar tiene un mayor incremento que en el modo traqueobronquial cuando se aumenta la relación de equivalencia por lo tanto el aumento de LDSA que se observa se debe principalmente a que se detectan más partículas de mayor tamaño. Cuando se incrementa la relación de equivalencia y el combustible contiene hidrógeno la LDSA detectada aumenta en 22,65% mientras que el número total de partículas aumenta en un factor de 2,72. Todos los valores de LDSA aumentan en cierta medida al incrementar la relación de equivalencia, en ambos casos, pero los incrementos más notables son en el modo alveolar.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

De las cuatro condiciones probadas, los resultados se pueden categorizar en los cambios que ocurrieron cuando el combustible contenía hidrógeno y amoníaco en comparación con cuando solo contenía amoníaco, y los cambios que surgieron al modificar la relación de equivalencia.

En primer lugar, la adición de un 5% de hidrógeno al combustible mostró una disminución en el trabajo realizado por el motor cuando éste funcionaba en condiciones estequiométricas. En términos de emisiones, las emisiones de agua disminuyeron, especialmente cuando la relación de equivalencia era la más alta. Las emisiones de amoníaco disminuyeron, pero sucedió lo contrario para las emisiones de NO_x , que aumentaron cuando el combustible contenía hidrógeno para ambas relaciones de equivalencia. El número de partículas emitidas aumentó con la adición de hidrógeno. Cuando la relación de equivalencia era estequiométrica, el número de partículas emitidas aumentó en un factor de 6. En este caso, la superficie de estas partículas también aumentó de manera similar al número de partículas. Se detectó un mayor aumento en el modo A del NSAM lo que quiere decir que el incremento es principalmente debido a que se generan más partículas de mayor tamaño.

En segundo lugar, cuando se utiliza un dosado rico aumentando la relación de equivalencia de 1 a 1,2 se consigue el mayor aumento en g_{IMEP} lo que quiere decir que el motor produce más energía. Sin embargo, la eficiencia térmica disminuyó cuando se incrementó la relación de equivalencia. Las emisiones de agua y amoníaco mostraron un aumento cuando la relación de equivalencia aumentó. Las emisiones de amoníaco fueron las más altas cuando el combustible estaba compuesto únicamente de amoníaco y el dosado era rico. Las emisiones de NO_x disminuyeron con una relación de equivalencia más alta. Cuando solo se quemaba amoníaco, tanto el número de partículas como la LDSA aumentaron cuando se incrementó la relación de equivalencia. En este caso, el número de partículas y el LDSA

detectado aumentaron en un factor de 15,5 y 6,5 respectivamente. La LDSA aumentó ligeramente en un 22,6% cuando la mezcla era rica en comparación con la mezcla estequiométrica y el combustible contenía hidrógeno.

El número de partículas y la LDSA mostraron cambios notables cuando el motor funcionaba en condiciones frías en comparación con las condiciones calientes. Para el funcionamiento en caliente, se detectaron menos partículas y el tamaño de estas partículas era más pequeño. Se puede observar a partir de las pruebas en el motor sin combustible que las emisiones de partículas que provienen del aceite del motor principalmente tienen una dependencia de la temperatura. Los resultados obtenidos en esta investigación sobre la materia particulada proveniente de las gotas de aceite del motor y de la posible oxidación generada en el proceso de combustión no son suficientes para poder distinguir el efecto aislado de estas partículas frente a las emitidas por el amoníaco únicamente.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Las partículas emitidas por el motor que se detectaron en esta investigación pueden ser generadas por varias fuentes distintas, el propio combustible utilizado, las gotas del aceite lubricante del motor o de la oxidación dentro del cilindro, los conductos de admisión y dentro del escape. Según los resultados obtenidos se puede ver que hubo un gran número de partículas emitidas por el motor cuando no se le estaba suministrando combustible que por tanto, debían estar generadas por el aceite o por posibles residuos presentes. Además, este modo de operación se probó cuando el motor estaba frío y también caliente. Se puede ver que el número de partículas detectadas es inferior, así como la LDSA cuando el motor estaba caliente. Por tanto, resulta fundamental entender el comportamiento que tienen estas partículas derivadas del aceite lubricante para poder comprender mejor el comportamiento de las emisiones derivadas de la materia particulada generada por el amoníaco.

El trabajo futuro que se va a hacer con este motor consiste en hacerlo funcionar únicamente con hidrógeno. La combustión de hidrógeno dentro de un motor tiene la característica de que no produce emisiones de materia particulada derivadas del propio combustible. De esta

manera, operar el motor con únicamente hidrógeno permitirá tener un mejor entendimiento del comportamiento de las partículas derivadas del aceite lubricante y de las otras posibles fuentes. Esto es debido a que permitirá aislar el impacto de estas mismas frente al de las partículas derivadas del propio combustible.

Una vez realizada la nueva investigación se podrá entender el comportamiento aislado de la materia particulada emitida por el amoniaco. A partir de ese estudio se tendrá más información sobre la cantidad y el tamaño de las partículas emitidas. Esto permitirá cuantificar los peligros y los efectos perjudiciales sobre la salud que tienen las partículas emitidas por el amoniaco utilizado en un motor de investigación. Eso dará lugar a futuras investigaciones en las que se use este combustible en otro tipo de motores en los cuales tenga una posible aplicación. Si se determina que las emisiones de materia particulada superan las permitidas por el reglamento europeo, se tendrán que determinar métodos de tratamiento de los gases de escape para reducirlas.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] James H. Williams ‘*Carbon-neutral pathways for the United States*’, AGU Advances, Enero de 2021.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020AV000284>
- [2] Dessler, A. (2021) ‘*Putting it all together: A long-term policy to address climate change*’, Introduction to Modern Climate Change, pp. 243–259.
https://www.researchgate.net/publication/331019624_Putting_it_together_A_long-term_policy_to_address_climate_change
- [3] S. A. Reggeti, S. P. Kane, and W. F. Northrop, ‘*Hydrogen production in ammonia-fueled spark ignition engines*’, Applications in Energy and Combustion Science, vol. 14, p. 100136, 2023.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666352X23000250>
- [4] World Energy Council, World Energy Monitoring, 2021 (2021), p. 51.
<https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-issues-monitor-2021-humanising-energy>
- [5] V.A. Kulagin, D.A. Grushevenko, ‘*Will hydrogen Be able to become the fuel of the future?*’ Therm Eng, 67 (2020), pp. 189-201
https://www.eriras.ru/files/will_hydrogen_be_able_to_become_the_fuel_of_the_future2020thermal_engineering.pdf
- [6] C. Mounaïm-Rousselle, ‘*Performance of ammonia fuel in a spark assisted compression ignition engine*’. Agosto, 2021.
<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14680874211038726>
- [7] S. Frigo, R. Gentili, N. Doveri, ‘*Ammonia plus hydrogen as fuel in a S.I. engine: experimental results*’, SAE Tech Pap, 4 (2012)
<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2012-32-0019/>
- [8] M.F. Ezzat, I. Dincer, ‘*Development and assessment of a new hybrid vehicle with ammonia and hydrogen*’, Appl Energy, 219 (2018), pp. 226-239
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918303416>

- [9] M. Koike, H. Miyagawa, T. Suzuoki, K. Ogasawara, ‘*Ammonia as a hydrogen energy carrier and its application to internal combustion engines*’, *Sustain Veh Technol Driv Green Agenda*, 2010 (2012), pp. 61-70
https://www.researchgate.net/publication/301064953_Ammonia_as_a_hydrogen_energy_carrier_and_its_application_to_internal_combustion_engines
- [10] S. Frigo, R. Gentili, F. De Angelis, ‘*Further insight into the possibility to fuel a SI engine with ammonia plus hydrogen*’, *SAE Tech Pap*, 32 (0082) (2014)
https://www.researchgate.net/publication/289112546_Further_Insight_into_the_Possibility_to_Fuel_a_SI_Engine_with_Ammonia_plus_Hydrogen
- [11] M.H. Dinesh, Jayashish Kumar Pandey, G.N. Kumar, ‘*Study of performance, combustion, and NOx emission behavior of an SI engine fuelled with ammonia/hydrogen blends at various compression ratio*’. Julio 2022.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922024892>
- [12] Caterina Losacco, Antonella Perillo, ‘*Particulate matter air pollution and respiratory impact on humans and animals*’, Diciembre 2018, *Environmental Science and Pollution Research*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30284710/>
- [13] S.A. Galvis-Vizcaíno, ‘*Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa*’, Septiembre 2021, *Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo*
https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1132-62552021000300011
- [14] Wu W, Jin Y, Carlsten C., ‘*Inflammatory health effects of indoor and outdoor particulate matter*’, Marzo 2018, *J Allergy Clin Immunol* 2018; 141:833-44
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29519450/>
- [15] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2023
- [16] Harrison, R. M. ‘*Airborne particulate matter in the united kingdom, third report of the quality of urban air review group*’, Mayo 1996, The University of Birmingham, Edgbaston, England. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/quarg/quarg_11.pdf

- [17] David B. Kittelson, '*Engines and nanoparticles: a review*', Junio 1998, Journal of Aerosol Science,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850297100374>
- [18] Laboratorio de Investigación de Motores Thomas E Murphy, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Minnesota
- [19] Erisman et al. (2008), Smil 2002, Stewart (2005), OurWorldInData.org/how-many-people-does-synthetic-fertilizer-feed/
- [20] C. Douglas, B. Emerson, '*NOx Emissions from Hydrogen-Methane Fuel Blends*', Enero 2022, Georgia Tech Top Research University
https://research.gatech.edu/sites/default/files/inline-files/gt_epri_nox_emission_h2_short_paper.pdf

ANEXO I

A) FICHA TÉCNICA MOTOR CFR

GENERAL CFR F-1 AND F-2 RATING UNIT INFORMATION

CFR F-1 AND F-2 CHARACTERISTICS SUMMARY TABLE

Table 2.10-3: CFR Rating Unit Characteristics and Information

ITEM	DESCRIPTION
Crankcase Type	Model CFR-48D, Cast Iron
Cylinder Type	Cast Iron, Flat Combustion Surface, Integral Coolant Jack
Compression Ratio (C.R.)	Adjustable 4:1 to 18:1 by Cranked Worm Shaft-Worm Wheel Drive in Cylinder Clamping Sleeve
Cylinder Bore (Diameter)	3.250 in.
Stroke	4.500 in.
Displacement	37.33 cu. in.
Valve Mechanism	Open Rocker Assembly with Linkage for Constant Valve Clearance as C.R. Changes
Intake Valve	Stellite Faced, with 180° Shroud and Anti-Rotation Pin
Exhaust Valve	Stellite Faced, without Shroud, Typically with Rotator Assembly
Piston	Cast Iron, Flat Top
Piston Rings:	
Top Compression	(1) Chrome Plated, Straight Sided
Other Compression	(3) Ferrous Straight Sided
Oil Control	(1) Cast Iron, One Piece, Slotted

ITEM	DESCRIPTION
Camshaft Overlap	5°
Fuel System:	
Carburetor	Single Vertical Jet, Adjustable Level Float Chamber to Vary Fuel-Air Ratio, Graduated Sight Glass for Fuel Level Observation
CFR F-1 Horizontal Venturi	9/16 in. Throat Diameter
CFR F-2 Horizontal Venturi	Throat Diameter Dependent on Engine Location Altitude 9/16 in.; sea level – 1,600 ft 19/32 in.; 1,600 – 3,300 ft 3/4 in.; over 3,300 ft
Ignition	Electronically Triggered Capacitive Discharge Through Coil to Spark Plug
Ignition Timing:	
CFR F-1	13° BTDC
CFR F-2	Variable as Cylinder Height (C.R.) is Changed (Basic Setting 26° at 5:1 C.R.)
Intake Air Humidity	Controlled by Ice Tower Assembly or Refrigerated Exchanger
Fuel-Air Mixture Heating:	
CFR F-1	None
CFR F-2	Electrical Heater – Mixture Manifold

VARIABLE COMPRESSION RATIO CYLINDER / CLAMPING SLEEVE ASSEMBLY

VARIABLE C.R. CYLINDER ASSEMBLY SPECIFICATIONS

Table 3.05-1: Variable Compression Ratio Cylinder Assembly Specifications

COMPONENT	MFG. TOLERANCE in.	WEAR LIMIT in.
Internal Diameter (Standard) Permitted Rebore Diameters	3.2500/3.2510 + 0.010, + 0.020 or + 0.030	0.006 maximum (Over Std. or Rebore Diameter)
Taper	0.0005 maximum	0.004 maximum
Out of Round, maximum	0.005	0.0025 maximum
Bore Surface Quality, Microinches	10/20	Scored or Pitted
Surface Hardness, Brinell	196/269	-
Wall Thickness:		
Top of Combustion Chamber	0.281 – 0.312	
Around Spark Plug, Pickup, Intake and Exhaust Guide Holes	0.250 – 0.312	-
Exhaust Guide Holes		
Around Intake and Exhaust Ports	0.188 – 0.250	
Spark Plug Hole:		
Depth	0.609 – 0.641	-
Thread Size	18 mm, 1.5 Pitch, Fine	
Pickup Hole:		
Depth	0.627 – 0.703	-
Thread Size	7/8 in.-18	
Valve Port:		
Concentricity to Manifold	± 0.031	-
Valve Guide Internal Diameter		
Intake	0.3740 – 0.3750	0.3770 maximum
Exhaust	0.3750 – 0.3760	0.3785 maximum
Intake Valve Guide Slot	Parallel to Centerline of Valves within ± 1°	-
Valve Guide Projection Above Cylinder (Both)	1.0	-
Valves (Intake and Exhaust):		
Stem Diameter	0.7320 – 0.3725	0.3705 minimum
Face Angle, Degrees	45	-
Concentricity, Stem to Face (Runout)	0.0015 maximum	0.0020 maximum
Margin	0.047	1/32 minimum
Valve Shroud (Intake Only)		
Circumferential Span	180°	-
Positioning	Opening Toward Pickup Hole	
Valve Stem to Guide Clearance:		
Intake	0.0015 – 0.0030	0.005 maximum
Exhaust	0.0025 – 0.0040	0.006 maximum

VARIABLE COMPRESSION RATIO CYLINDER/CLAMPING SLEEVE ASSEMBLY

COMPONENT	MFG. TOLERANCE in.	WEAR LIMIT in.
Valve Seat Inserts:		
Concentricity to Guide Center	0.0010 maximum	0.0015 maximum
Face Angle for Lapped Contact	45	-
Face Angle for Interference Contact	46 – 47	-
Valve to Valve Seat Contact:		
Seating Width	0.050 – 0.060	0.070 maximum
Seat Position – Top Edge to Top of Face	0.030 minimum	0.030 minimum
Valve Springs:		
Intake or Exhaust (Non-rotator Type) (P/N 43335C)		
Free Height	2.594 (± 0.010)	
Height at 33 – 39 lb of pressure	2.219 (± 0.010)	
Height at 76 – 88 lb of pressure	1.750 (± 0.010)	
Exhaust (Rotator Type) (P/N 109659)		-
Free Height	2.125 (± 0.010)	
Height at 76 – 78 lb of pressure	1.750 (± 0.010)	
Height at 137 – 151 lb of pressure	1.4375 (± 0.010)	
Rocker Arm Carrier to Pin Clearance	0.0000 – 0.0007	0.0015 maximum
Rocker Arms:		
Bearing Shaft Diameter	0.5003 – 0.5005	-
Ball Seats	Smooth and Fit Ball	

Table 3.05-2: Clamping Sleeve Assembly Specifications

COMPONENT	MFG. TOLERANCE in.	WEAR LIMIT in.
Sleeve Bore to Cylinder External Diameter		
Clearance	0.001 – 0.005	0.006 maximum
Counterbore Depth in Sleeve for Worm Wheel	2.750 – 2.755	2.755 maximum
Worm Wheel:		
Thickness (Between Faces)	2.752 – 2.757	2.752 minimum
Wheel to Sleeve Base Distance	0.003 Recess to 0.007 Protrusion	0.005 maximum Recess
Internal Thread Clearance on Cylinder	Turn Freely	Loose Fit
Worm Shaft:		
Endplay:		
External Thread to Worm Wheel	0.002 maximum	0.004 maximum
Shaft in Clamping Clearance on Cylinder	0.001 – 0.003	0.005 maximum
Cylinder Sleeve Spring:		
Free Length	4-13/16	-

VARIABLE COMPRESSION RATIO CYLINDER/CLAMPING SLEEVE ASSEMBLY

Table 3.05-3: Piston Assembly Specifications

COMPONENT	MFG. TOLERANCE in.	WEAR LIMIT in.
Diameters:		
Top Land	3.235/3.237	
Second/Fifth Lands	3.242/3.244	-
Skirt	3.2465/3.2475	
Piston to Cylinder Clearances:		
Top Land	0.013 – 0.016	-
Second/Fifth Lands	0.006 – 0.009	-
Skirt	0.0025 – 0.0045	0.0105 maximum
Ring to Land Clearances:		
Top	0.0010 – 0.0030	0.0040 maximum
All Others	0.0010 – 0.0025	0.0035 maximum
Ring Gap Clearances (All Rings)	0.007 – 0.012	0.030 maximum
Piston Pin:		
Diameter	1.2495 – 1.2498	-
Pin to Piston Clearance	0.0004 – 0.0007	0.002
Pin Hole Alignment	0.001 maximum	0.0015
Piston Pin Retainers:		
Free Diameter After Compression	1.340	1.340 minimum

B) FICHA TÉCNICA UCPC MODELO 3025A

Table B-1
Model 3025A Specifications

Minimum particle size	50% detection at 3 nm 90% detection at 5 nm
Flowrate	
Aerosol	30 ± 3 cm ³ /min
Condenser	300 ± 30 cm ³ /min
Inlet, high-flow	1500 ± 150 cm ³ /min
Inlet, low-flow	300 ± 30 cm ³ /min
Working fluid	
n-butyl alcohol	
saturator temperature	37°C ±0.3°C
condenser temperature	10°C ±0.3°C
optics temperature	39°C ±2.0°C
Concentration	0 to 9.99 × 10 ⁴ particles/cm ³
Accuracy	±10% up to 9.99 × 10 ⁴ /cm ³
Particle-pulse height of the photodetector	≅1.4 V typical
Laser power	≅3–5 mW
Detector	See calibration data, Appendix D
Environmental conditions	Indoor use Altitude up to 2000 m (6500 ft) Ambient temperature range n-butyl alcohol 10–37°C Ambient humidity 0–90% RH noncondensing Overvoltage category II Pollution degree II
False background counts	<0.01 particle/cm ³
Response time.....	<1 second for 95% response to concentration step changes when sampling in high-flow mode; <5 seconds when sampling in low-flow mode
Dimensions L × H × W (nominal)	24 cm × 25 cm × 38 cm (9.5 in. × 10 in. × 15 in.)
Weight	11 kg (25 lb)
Power	100/120 V at 50/60 Hz, 180 W, 1.2 A (maximum) 230/240 V at 50/60 Hz, 180 W, 0.6 A (maximum)
Fuse	100/120V ~ T 2.0A/250V 230/240V ~ T 1.0A/250V

C) FICHA TÉCNICA NSAM

Model 3550 Specifications

The following specifications list the most important features of the Model 3550 Nanoparticle Surface Area Monitor.

Table A-1
Specifications* of the 3550 Nanoparticle Surface Area Monitor

Mode of Operation	Charges particles using a diffusion charger and then measures the total charge on the particles using an electrometer.
Particle Size Range	10 to 1000 nm (with 1 μm cyclone)
Measurement Accuracy (for size range 20 to 200 nm)**	TB: $\pm 20\%$ or $0.1 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ A: $\pm 20\%$ or $0.5 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$
Concentration Range	TB: 0 to $2,500 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ A: 0 to $10,000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$
Maximum Data Rate	1 reading/sec (1 Hz)
Temperature Range	10 to 35°C
Pressure Range	700 to 1200 mbar [0.7 to 1.2 atm]
Relative Humidity Range [†]	0 to 80%
Front Panel Display	4-digit segmented LCD
Dimensions (HWD)	13.3 cm \times 38 cm \times 28 cm (5.3 in. \times 15 in. \times 11 in.)
Weight	6.8 kg (15 lb)
Output	
Digital I/O	DSUB 9-pin RS-232
Ports	
Aerosol Inlet	1/4-in. OD aluminum tube
Pump Exhaust.....	1/4-in. OD Swagelok [®] connection
Power Requirements	100 to 240 VAC, 50/60 Hz, 1A maximum
Fuse (<i>not</i> replaceable by user).....	3.0A, 250 V, type 5 \times 20 mm (internal—not replaceable by operator)

*Specifications are subject to change without notice. TSI and the TSI logo are registered trademarks of TSI Incorporated.

**Tested at TSI for NaCl particles.

[†]The instrument will operate optimally under the specified relative humidity conditions. The ICRP-based lung deposition model used to derive TB and A deposition curves in a reference worker (and hence the instrument's measurement for TB and A regions), does not consider the effect of humidity on particle size.

Lung Deposition Model

This appendix gives an explanation of the lung deposition curves used for calibrating the Model 3550. The deposition curves were developed using human lung-deposition model published by International Commission on Radiological Protection (ICRP-66) (1995). The deposition curves are calculated using LUDEP Version 2.07 (2000) software. All calculations are based on a "reference worker" as defined in a publication by ACGIH (Ed. Vincent J.H., 1999). The lung deposition curves thus derived for tracheobronchial and alveolar regions are shown in Figure B-1. The input parameters used in the model are listed in Table B-1.

Table B-1

(A) and (B) Reference Worker: Representative Values for Respiratory Anatomical and Physiological Parameters Describing an Average Healthy Worker Under Light to Moderate Physical Activity. (ACGIH, Ed. Vincent J.H., 1999). (C) Inhaled aerosol parameters.

(A) Physiological Parameters	
Subject	Adult male
Weight	70 kg
Height	175 cm
Age	20–30 years
Functional residual capacity	2200 cc
Extra-Thoracic Dead Space	50 cc
Bronchial Dead Space	49 cc
Bronchiolar Dead Space	47 cc
Tracheal Diameter	1.65 cm
First Bronchial Diameter	0.165 cm
Lung Weight	1000 g
Lung Surface Area	80 m ²
(B) Activity Related Parameters	
Activity level	Light Exercise
Activity type	Nose breathing only
Ventilation rate	1.3 cc/hr
Respiratory frequency	15.0 breaths/min
Tidal volume	1450 cc
Volumetric flow rate	725 cc/sec
Fraction breathed through nose	1.0

(C) Aerosol Parameters	
Geometric diameters	0.001 μm –0.5 μm
Geometric standard deviation	1.0
Density	1.0 g/cc
Shape factor	1.0

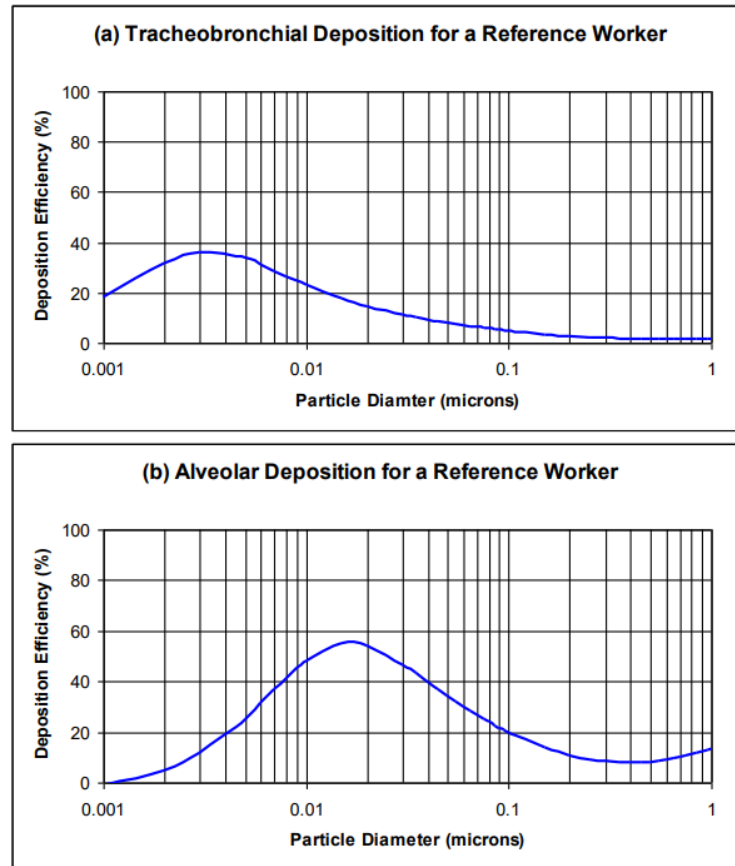


Figure B-1
Fractional Deposition of Inhaled Particles in Respiratory Tract of a Reference Worker. (a) Tracheobronchial (TB) Deposition (b) Alveolar Deposition (Source: ICRP-1995).