



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO MOTORES PROPULSADOS POR AMONIACO E HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLES

Autor: Iker Diez Lorenzo

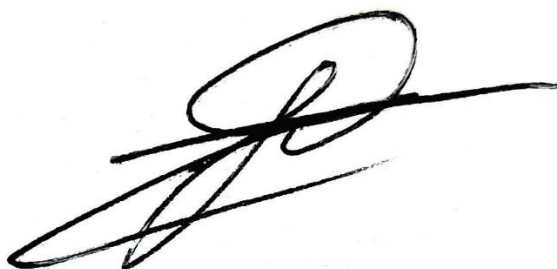
Director: Juan Norverto Moriño

Madrid

Julio de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Motores propulsados por amoniaco e hidrógeno como combustible en la ETS de
Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 20xx/yy 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.: Iker Díez Lorenzo. Fecha: ...19.../ ...07.../ ...2022...

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

NORVERTO
MORIÑIGO
JUAN - DNI
09746499L

Firmado digitalmente
por NORVERTO
MORIÑIGO JUAN -
DNI 09746499L
Fecha: 2022.07.20
07:48:25 +02'00'

Fdo.: Juan Norverto Moriñigo. Fecha: ...19.../ ...07.../ ...2022...



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

MOTORES PROPULSADOS POR AMONIACO E HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLES

Autor: Iker Diez Lorenzo

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

Julio de 2022

MOTORES PROPULSADOS POR AMONIACO E HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLES

Autor: Diez Lorenzo, Iker

Director: Norberto Morínigo, Juan

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto se basa en el diseño de un sistema de mecanismos que se adaptan a un vehículo con un motor de combustión interna alternativo (MCIA) para que esté alimentado con amoniaco e hidrógeno en vez de gasolina.

Palabras clave: Amoniaco, Hidrógeno, motor, combustión

1. Introducción

Este proyecto se centra en erradicar los problemas del calentamiento global, enfocándose en la reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero en el sector del transporte. Es decir, se diseñará un vehículo cero contaminante. Para ello se ha diseñado un sistema que se acople a un motor de combustión interno alternativo que en vez de utilizar gasolina o diésel se alimente de amoniaco e hidrógeno.

2. Definición del proyecto

Como se ha mencionado anteriormente, se trata de diseñar un sistema que se acople a un motor de combustión cualquiera que exista en el mercado actual. En este caso se ha seleccionado el de un Mazda 3 Sedán que proporciona una relación de compresión 13:1, bastante superior a otros modelos de coche a gasolina. Esta alta relación de compresión se necesita ya que el amoniaco necesita de altas temperaturas y presiones para su ignición. Por tanto, el proyecto se centra en diseñar un sistema que lleve el amoniaco líquido, almacenado en los depósitos, hasta gasificarlo y transformar una parte en hidrógeno para posteriormente alimentar los cilindros del motor con estos dos gases, donde reaccionarán con el aire.

3. Descripción del modelo

Se ha diseñado un circuito y sistema que va desde los tanques de almacenamiento de amoníaco licuado hasta la explosión química en los cilindros del motor.

En primer lugar, se han diseñado las botellas de amoníaco líquido (véase punto 1 figura 1) que conforman el depósito del vehículo. Se requiere de almacenar el amoníaco en estado líquido debido a su clara ventajosa densidad frente a la de su estado natural (gas). Las botellas tienen una capacidad de 25L y se diseñaron bajo una presión interna de 13bar y están fabricadas de acero AISI 316. El amoníaco se introducirá en el depósito de manera presurizada a 10 bar y 5°C, de tal manera que se garantice el estado líquido de almacenamiento de amoníaco.

Posteriormente, el amoníaco se ha dirigido a un intercambiador de placas con juntas donde se evaporará. El objetivo de evaporar el amoníaco es básicamente que se necesita introducir el amoníaco en estado gaseoso en el motor para su combustión (véase punto 2 figura 1). Adicionalmente, el fluido que calienta y evapora el amoníaco es agua. Por tanto, también se ha tenido que diseñar una caldera de agua donde son los electrodos los que evaporarán el agua para que fluya por el intercambiador y evapora el amoníaco.

El intercambiador de placas se ha diseñado de tal manera que se garantice que el amoníaco se evapore y se caliente desde los 5°C, proveniente de los depósitos, hasta los 527°C. Es remarcable mencionar que esta temperatura es totalmente necesaria para futuros pasos del sistema donde el amoníaco se separará en hidrógeno y nitrógeno.

El amoníaco evaporado pasará un examen antes un separador de gas – líquido donde se garantizará que todo el amoníaco que pase de ese punto sea solo gaseoso. El amoníaco líquido se retendrá en el separador y cuando alcance cierto nivel, un sensor de nivel de líquido emitirá una señal que será amplificada por unos transistores para que a través de un relé accione una bomba y redirige este fluido al intercambiador para su evaporación.

Una vez se ha garantizado que solo se tiene amoníaco gaseoso a unos 500°C aproximadamente, se redigirá una parte directamente al motor (véase figura 1) y otra hacia un catalizador de hierro.

Es aquí donde empezará la fase de craqueo del amoníaco. Las altas temperaturas y el catalizador de óxido de hierro propiciarán que el amoníaco se disgregue, expulsando hidrógeno y nitrógeno gas.

Posteriormente, para evitar mayores producciones de óxidos nitrosos y monóxidos de nitrógeno en la combustión, se ha querido separar el nitrógeno del hidrógeno. Este paso consiste en recurrir a la tecnología de la adsorción por oscilación de presión. A modo de resumen, los filtros que comportan el separador capturarán el hidrógeno gas, mientras que, debido a la comparación de peso y tamaño molecular, dejarán pasar el nitrógeno que, como se puede observar en la figura 1, se redirige directamente hacia la atmósfera.

Una vez se tienen el amoníaco e hidrógeno gas se mezclarán (véase punto 7 de la figura 1) a partir de mezcladores tipo Venturi y tipo KMS para obtener una mezcla lo más homogénea posible. Posteriormente se almacenarán en un depósito pequeño donde esperarán a que los inyectores los capturen para introducirlos en los cilindros del motor.

Es aquí en el motor donde las reacciones químicas de combustión entran en juego. El MCI que se ha seleccionado es un Mazda 3 Sedán Origin SKYACTIV-G 2.0. Se ha estudiado las posibles combinaciones de combustibles que podrían ser usados en el motor. Todas las reacciones se han considerado de ser perfectas y combustiones completas lo que, en realidad, no ocurre ya que se generarán óxidos nitrosos y monóxido de nitrógeno.

Adicionalmente, el motor cuenta con un sistema turbocompresor – intercooler (véase punto 11 de la figura 1). Este sistema permitirá aprovechar los gases de escape para comprimir el aire que entra en el motor y así conseguir mejores valores de par motor.

Por último, para garantizar que ningún gas de efecto invernadero se expulse a la atmósfera, los posibles NO₂ o NO_x que puedan surgir de la combustión se dirigirán directamente a otro catalizador, en este caso de zeolita donde, un caudal de amoníaco gaseoso que hemos mencionado anteriormente servirá como reductor para reaccionar con estos gases GEI y emitir únicamente vapor de agua y nitrógeno gas.

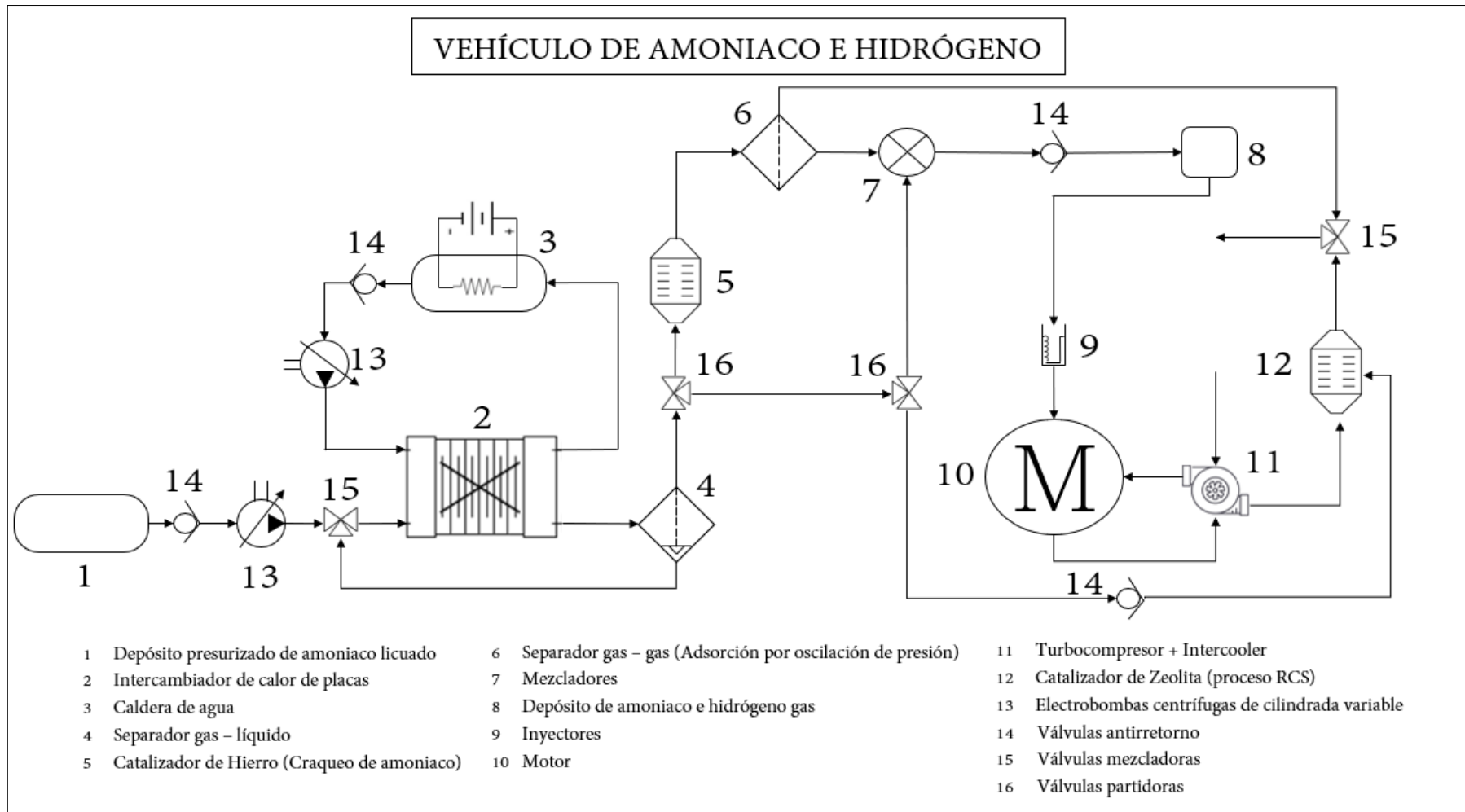


Ilustración 1: esquema del diseño del sistema para funcionamiento el MCIA con NH₃ y H₂ (Elaboración propia)

4. Resultados

A continuación, se muestran los resultados del comportamiento del motor con los distintos combustibles que se pueden introducir.

Variables	Tipo motor	Motor NH3 + H2	Motor NH3	Motor H2	Motor NH3 + H2 + Sobrealimentación
Rendimiento térmico (%)		35.58	19.25	23.63	35.58
Par Motor (Nm)		53.12	27.72	39.06	77.7
Presión Media Efectiva (kPa)		334.10	174.33	245.69	488.7
Presión Media Indicada (kPa)		939.09	905.57	1039.63	1373.64

Ilustración 3: hoja que expone los distintos consumos de amoníaco en las botellas según rpm (Elaboración propia)

Además, se ha recopilado información sobre la cantidad de combustible (amoníaco) que el motor consumirá de los depósitos en función de las revoluciones por minuto medias de un viaje.

rpm	Consumo NH3 (L/h)	Tiempo de vida para 3 botellas (h)
1500	41.96	1.79
2000	55.36	1.35
2500	70.49	1.06
3000	83.92	0.89
3500	97.34	0.77

Ilustración 3: hoja que expone los distintos consumos de amoníaco en las botellas según rpm (Elaboración propia)

5. Conclusiones

Como se puede observar en las figuras 2 y 3, el motor obtiene mejores rendimientos térmicos cuando utiliza el combustible blending de NH3 y H2. Aunque es común para todos los valores preestablecidos por el diseñador del motor sobre qué cantidad de calor se disipará por refrigeración o fricción entre otros, son los diferentes gases de escape que capturarán cierta energía calorífica los que marcarán la diferencia. Adicionalmente, como se puede observar, es el turbocompresor el que, al aumentar la densidad del aire, genera más calor en la combustión, generando una presión media efectiva mayor sobre el pistón y como consecuencia un mayor par motor.

Observando la figura 3 es verdad que el motor consume una cantidad asombrosa de amoníaco. Éste sería uno de los puntos de mayor estudio para futuros proyectos.

ENGINES FUELED BY AMMONIA AND HYDROGEN

Author: Diez Lorenzo, Iker

Director: Norberto Morínigo, Juan

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project is based on the design of a system of mechanisms that adapt to a vehicle with an alternative internal combustion engine (ICAM) so that it is powered by ammonia and hydrogen instead of gasoline.

Keywords: Ammonia, Hydrogen, engine, combustion

1. Introduction

This project focuses on eradicating the problems of global warming, focusing on the reduction of greenhouse gas emissions in the transport sector. In other words, a zero-polluting vehicle will be designed. For this, a system has been designed that is coupled to an alternative internal combustion engine that, instead of using gasoline or diesel, is powered by ammonia and hydrogen.

2. Project definition

As mentioned above, it is about designing a system that is coupled to any combustion engine that exists in the current market. In this case, a Mazda 3 Sedan has been selected, which provides a compression ratio of 13:1, much higher than other gasoline car models. This high compression ratio is necessary since ammonia needs high temperatures and pressures for its ignition. Therefore, the project focuses on designing a system that takes the liquid ammonia, stored in the tanks, to gasify it and transform a part into hydrogen to subsequently feed the engine cylinders with these two gases, where they will react with the air.

3. Model Description

A circuit and system have been designed that goes from the liquefied ammonia storage tanks to the chemical explosion in the engine cylinders.

Firstly, the liquid ammonia bottles (see point 1 figure 1) that make up the vehicle's tank have been designed. It is required to store ammonia in a liquid state due to its clearly advantageous density compared to its natural state (gas). The bottles have a capacity of 25L and were designed under an internal pressure of 13bar and are made of AISI 316 steel. The ammonia will be introduced into the tank under pressure at 10 bar and 5°C, in such a way as to guarantee the state ammonia storage liquid.

Subsequently, the ammonia has been directed to a gasketed plate exchanger where it will evaporate. The objective of evaporating the ammonia is basically that it is necessary to introduce the ammonia in a gaseous state in the engine for its combustion (see point 2 figure 1). Additionally, the fluid that heats and evaporates the ammonia is water. Therefore, it has also had to design a water boiler where the electrodes are the ones that will evaporate the water so that it flows through the exchanger and evaporates the ammonia.

The plate heat exchanger has been designed in such a way as to ensure that the ammonia evaporates and heats from 5°C, coming from the tanks, to 527°C. It is remarkable to mention that this temperature is totally necessary for future steps of the system where the ammonia will be separated into hydrogen and nitrogen.

The evaporated ammonia will undergo an examination before a gas-liquid separator where it will be guaranteed that all the ammonia that passes that point is only gaseous. The liquid ammonia will be retained in the separator and when it reaches a certain level, a liquid level sensor will emit a signal that will be amplified by some transistors so that, through a relay, it activates a pump and redirects this fluid to the exchanger for evaporation.

Once it has been guaranteed that there is only gaseous ammonia at approximately 500°C, a part will be redirected directly to the engine (see figure 1) and another to an iron catalyst. This is where the ammonia cracking phase will begin.

The high temperatures and the iron oxide catalyst will cause the ammonia to break down, expelling hydrogen and nitrogen gas.

Subsequently, to avoid greater production of nitrous oxides and nitrogen monoxides in combustion, it has been desired to separate nitrogen from hydrogen. This step consists of resorting to pressure swing adsorption technology. In short, the filters that comprise the separator will capture the hydrogen gas, while, due to the comparison of molecular weight and size, they will allow the nitrogen to pass through, which, as can be seen in figure 1, is redirected directly into the atmosphere.

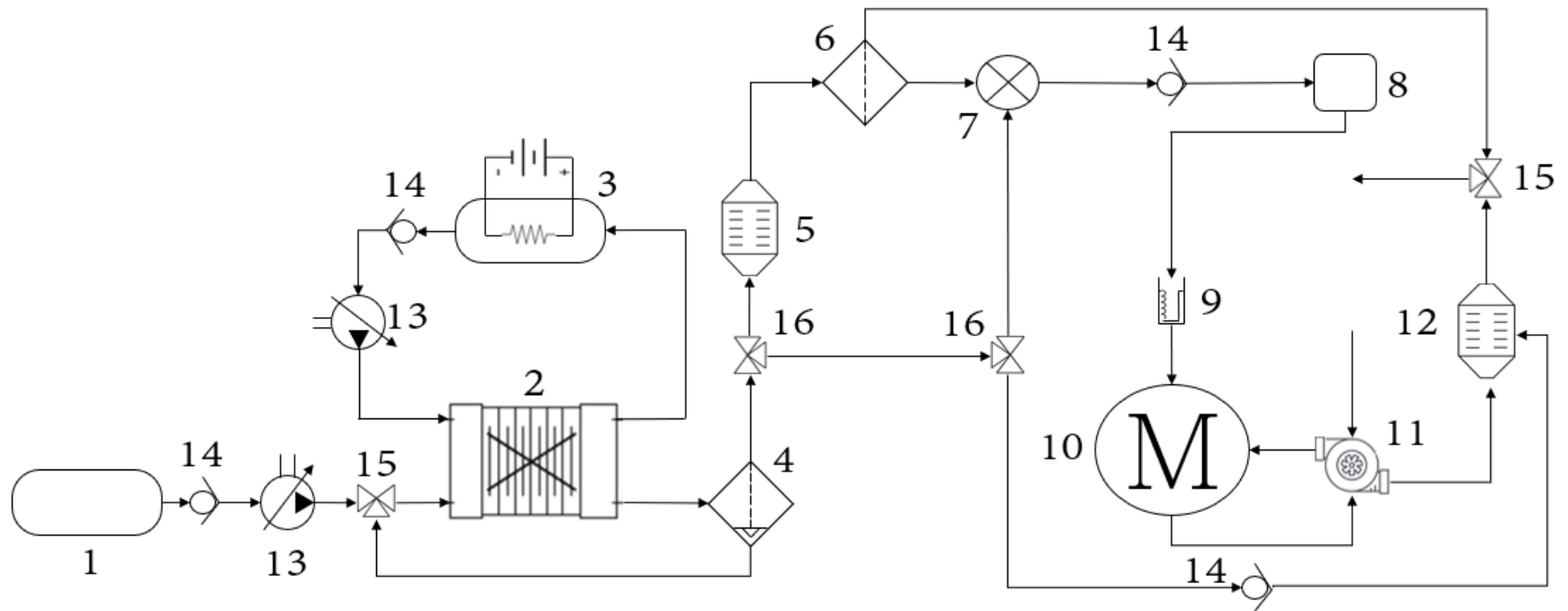
Once the ammonia and hydrogen gas are obtained, they will be mixed (see point 7 of figure 1) using Venturi-type and KMS-type mixers to obtain a mixture that is as homogeneous as possible. Later they will be stored in a small deposit where they will wait for the injectors to capture them to introduce them into the engine cylinders.

It is here in the engine that the chemical reactions of combustion come into play. The MCIA that has been selected is a Mazda 3 Sedan Origin SKYACTIV-G 2.0. The possible combinations of fuels that could be used in the engine have been studied. All the reactions have been perfect and complete combustions which do not occur since nitrous oxides and nitrogen monoxide will be generated.

Additionally, the engine has a turbocharger-intercooler system (see point 11 of figure 1). This system will allow the exhaust gases to be used to compress the air that enters the engine and thus achieve better torque values.

Lastly, to guarantee that no greenhouse gas is expelled into the atmosphere, any possible NO₂ or NO_x that may arise from combustion will be directed directly to another catalyst, in this case zeolite where, a flow of gaseous ammonia that we have mentioned Previously, it will serve as a reducer to react with these GHG gases and emit only water vapor and nitrogen gas.

VEHICLE POWERED BY AMMONIA AND HYDROGEN



- 1 Pressurized liquefied ammonia tank
- 2 Plate heat exchanger
- 3 Water boiler
- 4 Gas-liquid separator
- 5 Iron Catalyst (Ammonia Cracking)

- 6 Gas-Gas Separator (Pressure Swing Adsorption)
- 7 Mixers
- 8 Ammonia and hydrogen gas tank
- 9 Injectors
- 10 Engine

- 11 Turbocharger + Intercooler
- 12 Zeolite Catalyst (RCS process)
- 13 Variable displacement centrifugal electric pumps
- 14 Check valves
- 15 Mixing valves
- 16 Splitter valves

Illustration 1: Scheme of the system design for the operation of the MCIA with NH₃ and H₂

4. Results

The results of the behaviour of the engine with the different fuels that can be entered are shown below.

Variables	Engine type	NH3 + H2 Engine	NH3 Engine	H2 Engine	NH3 + H2 + Turbocharger Engine
Thermal performance (%)		35.58	19.25	23.63	35.58
Engine Torque (Nm)		53.12	27.72	39.06	77.7
Average Effective Pressure (kPa)		334.10	174.33	245.69	488.7
Indicated Effective Pressure (kPa)		939.09	905.57	1039.63	1373.64

Illustration 2: sheet that exposes the different ammonia consumption in the bottles according to rpm (Own elaboration)

In addition, information has been collected on the amount of fuel (ammonia) that the engine will consume from the tanks based on the average revolutions per minute of a trip.

rpm	NH3 consumption (L/h)	Time of life for 3 bottles (h)
1500	41.96	1.79
2000	55.36	1.35
2500	70.49	1.06
3000	83.92	0.89
3500	97.34	0.77

Illustration 3:: sheet that exposes the different ammonia consumption in the bottles according to rpm (Own elaboration)

5. Conclusions

As can be seen in figures 2 and 3, the engine obtains better thermal performance when using the blended fuel of NH3 and H2. Although it is common for all the values pre-established by the engine designer on how much heat will be dissipated by cooling or friction among others, it is the different exhaust gases that will capture certain heat energy that will make the difference. Additionally, as can be seen, it is the turbocharger that, by increasing the density of the air, generates more heat in combustion, generating a higher effective mean pressure on the piston and, consequently, greater engine torque.

Observing figure 3 it is true that the engine consumes an amazing amount of ammonia. This would be one of the points of further study for future projects.

Índice de la memoria

1.	CAPÍTULO 1: Introducción	20
1.1	Contexto	20
1.1.1	Calentamiento global y cambio climático	20
1.1.2	Efecto invernadero y gases GEI	21
1.1.3	Acuerdo de París (2015)	27
1.2	Motivación	28
1.2.1	Análisis de causas	28
1.2.2	Soluciones existentes	30
1.3	Objetivos	32
2.	CAPÍTULO 2: Amoníaco	33
2.1	Precedentes.....	33
2.2	Propiedades.....	35
2.2.1	Características físicas, termodinámicas y químicas	35
2.3	Almacenamiento y transporte	35
3	CAPÍTULO 3: Diseño del motor de amoníaco e hidrógeno	36
3.1	Tanque de combustible.....	38
3.1.1	Tipo de depósito y condiciones de operación.....	38
3.1.2	Cálculos de diseño y resultados	39
3.1.2.1	Diseño del recipiente a presión.....	39
3.1.2.2	Análisis de la evolución de la presión interna	42
3.1.2.3	Análisis de la evolución de la presión interna con Compresor	45
3.2	Circuito cerrado de agua: caldera eléctrica	47
3.2.1	Tipos y características	47
3.2.2	Cálculos de diseño térmico y mecánico	49
3.2.2.1	Resultados	51
3.3	Intercambiador de placas con juntas	53
3.3.1	Características	53
3.3.2	Componentes	54
3.3.3	Diseño térmico y mecánico	55
3.3.4	Resultados	58
3.4	Separador gas – líquido de amoníaco	61
3.4.1	Partes.....	61
3.4.2	Diseño de la malla	63
3.4.3	Diseño del sensor y sistema de realimentación del amoníaco líquido	65

3.5	Proceso y mecanismos de obtención del gas hidrógeno	66
3.5.1	Craqueo catalítico del amoníaco.....	66
3.5.1.1	Características	66
3.5.1.2	Proceso	67
3.5.1.3	Reacciones y diseño	67
3.6	Adsorción por oscilación de presión (PSA).....	68
3.7	Mezcladores del gas hidrógeno y amoníaco	70
3.7.1	Mezclador estático	70
3.7.2	Mezclador tipo Venturi	71
3.8	Sistema de sobrealimentación	72
3.8.1	Turbocompresor.....	72
3.8.2	Intercooler	73
3.8.3	Esquema y diseño.....	73
3.9	Motor e inyectores.....	74
3.9.1	Cálculos	75
3.9.2	Balance térmico y mecánico para alimentación con amoníaco.....	78
3.9.3	Balance térmico y mecánico para la alimentación con hidrógeno	80
3.9.4	Balance térmico y mecánico para alimentación con amoníaco e hidrógeno	82
3.9.4.1	Con sobrealimentación	84
3.9.5	Comparativa y elección	86
3.10	Reducción catalítica selectiva (RCS)	88
3.11	Mecanismos reguladores de presión y caudal por tuberías	89
3.11.1	Electrobombas centrífugas de cilindrada variable de eje horizontal accionadas por actuadores eléctricos.....	89
3.11.2	Válvulas accionadas por actuadores eléctricos.....	90
3.11.3	Válvulas de tres vías partidoras.....	90
3.11.4	Válvulas de tres vías mezcladoras	90
3.11.5	Válvulas sin retorno.....	90
4	Conclusiones.....	91
4.1	Siguientes pasos	93
5	Objetivos de desarrollo sostenible.....	94
	ANEXO A	95
	ANEXO B	98
	ANEXO C	99
	ANEXO D.....	101
	ANEXO E	102

ANEXO F	103
ANEXO G.....	104
6. Bibliografía	105

Índice de figuras

Figura 1: Estimación de la temperatura media anual 1880 – 2020. (NASA, 2020)	21
Figura 2: Proceso del efecto invernadero. (Uriarte, 2009)	22
Figura 3: Evidencia de cantidades crecientes de vapor de agua (1980 – 2002) en Boulder, Colorado. (NOAA, 2002)	23
Figura 4: Media global de fracción molar (a) de NO ₂ y su ritmo de crecimiento (b) desde 1985 – 2018 (OMM, 2019)	24
Figura 5: Media global de fracción molar (a) de CH ₄ y su ritmo de crecimiento (b) desde 1985 – 2018 (OMM, 2019)	25
Figura 6: Media global de fracción molar (a) de CO ₂ y su ritmo de crecimiento (b) desde 1985 – 2018 (OMM, 2019)	26
Figura 7: Acuerdo de París 2015, artículo 2.1 (ONU, 2015).	27
Figura 8: Emisiones de gases de efecto invernadero por sector (EEA, 2019).	29
Figura 9: Gráfico de los tipos de vehículos en uso registrados en la UE entre 2017 – 2021 (ACEA, 2021)	31
Figura 10: Producción mundial de NH ₃ (IFA, 2018)	34
Figura 11: Esquema general de los componentes del vehículo (Elaboración propia)	37
Figura 12: Hoja de cálculos del diseño y dimensionamiento de las botellas presurizadas de amoníaco licuado. (Elaboración propia)	41
Figura 13: Ilustración de la forma de las botellas de 25L de amoníaco licuado diseñadas. (Elaboración propia)	42
Figura 14: Gráfico de la evolución natural de la presión en los depósitos (Elaboración propia)	44
Figura 15: Esquema de los componentes de un taque hidroneumático (Washington State Department of Health, 2011)	45
Figura 16: Gráfico de la evolución de la presión en los depósitos con compresor	46
Figura 17: Esquema caldera de agua (Elaboración propia)	48
Figura 18: Hoja de cálculos del diseño y dimensionamiento de la caldera de agua. (Elaboración propia)	51
Figura 19: Hoja de especificaciones de las características de los electrodos de la caldera (Elaboración propia)	52
Figura 20: Esquema de un intercambiador de placas con juntas (Schmidt-Bretten, s.f.)	54
Figura 21: Representación de los parámetros de una de las placas del intercambiador (Angel, Burgos, Hidalgo, Yeison, & Raymare, s.f.)	55
Figura 22: Hoja de de parámetros de diseño del intercambiador de placas (Elaboración propia)	58

Figura 23: Hoja de cálculos del intercambiador de calor (Elaboración propia).....	59
Figura 24: Diseño final del intercambiador de calor (Elaboración propia)	60
Figura 25: Esquema del separador líquido - gas (Elaboración propia).....	61
Figura 26: Imagen de una malla de la marca BOPP (BOPP, s.f.).....	62
Figura 27: Tabla de los distintos materiales posibles de la malla (Elaboración propia)	63
Figura 28: Tabla que recoge los distintos tipos de mallas que existen (Elaboración propia).	64
Figura 29: Esquema del sistema de retorno de NH ₃ líquido (Elaboración propia).....	65
Figura 30:Hoja de cálculo de las reacciones y catalizadores involucrados en el crack del amoníaco (Elaboración propia)	67
Figura 31: Esquema del sistema de separación de N ₂ y H ₂ (Elaboración propia).....	69
Figura 32: Representación de mezcladores complejos y simples KMS (Elaboración propia).....	70
Figura 33: Representación de un mezclador tipo Venturi (Elaboración propia).....	71
Figura 34: Esquema de un turbocompresor (Cummins, s.f.)	72
Figura 35: Esquema de sistema Turbocompresor - Intercooler con datos teóricos de gases (Elaboración propia).....	73
Figura 36: Hoja de especificaciones del motor seleccionado (Elaboración propia).....	74
Figura 37: Representación del conjunto inyector - bujía (Elaboración propia).	75
Figura 38: Hoja de cálculos de las reacciones que intervienen en los cilindros (Motor de Amoníaco) (Elaboración propia)	78
Figura 39: Hoja de cálculo de los parámetros que intervienen en los cilindros del motor de amoníaco (Elaboración propia)	79
Figura 40: Hoja de cálculos de las reacciones que intervienen en los cilindros (Motor de Hidrógeno) (Elaboración propia).....	80
Figura 41: Hoja de cálculo de los parámetros que intervienen en los cilindros del motor de hidrógeno (Elaboración propia).	81
Figura 42: Hoja de cálculos de las reacciones que intervienen en los cilindros (Motor de Amoníaco e Hidrógeno) (Elaboración propia).....	82
Figura 43: Hoja de cálculo de los parámetros que intervienen en los cilindros del motor de hidrógeno y amoníaco (Elaboración propia).....	83
Figura 44: Hoja de cálculos de las reacciones que intervienen en los cilindros (Motor de Amoníaco e Hidrógeno sobrealimentado) (Elaboración propia)	84
Figura 45: Hoja de cálculo de los parámetros que intervienen en los cilindros del motor de hidrógeno y amoníaco sobrealimentado (Elaboración propia).	85
Figura 46: Gráfica comparativa potencia útil según tipo de motor y combustible (Elaboración propia).....	86

Figura 47: Tabla comparativa de rendimientos, presión media efectiva e indicada y par motor según tipo de motor y combustible (Elaboración propia)	87
Figura 48: Hoja de cálculos de las reacciones químicas en la RCS (Elaboración propia)	88
Figura 49: hoja que recoge los valores últimos por lo que se rige el motor con distintos combustibles (Elaboración propia)	92
Figura 50: hoja que expone los distintos consumos de amoniaco en las botellas según rpm (Elaboración propia).....	92
Figura 51: Objetivos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, s.f.).....	94
Figura 52: Tablas termodinámicas del amoniaco (Gómez-Acebo, 2010)o	95
Figura 53: Hoja de datos de características físicas y termodinámicas del amoniaco anhidro (Elaboración propia).....	98
Figura 54: Reglamento sobre almacenamiento de amoniaco anhidro	99
Figura 55: Características de las botellas de amoniaco (Elaboración propia).....	101
Figura 56: Selección del tipo de malla (Elaboración propia).....	102
Figura 57: Gráfico del análisis de los flujos máscicos de los fluidos según distintas secciones del sistema (Elaboración propia)	103
Figura 58: Tabla de cálculo de los parámetros de la caldera de agua (Elaboración propia).....	104

1. CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

1.1.1 Calentamiento global y cambio climático

La humanidad se ha visto alertada en las últimas décadas por los denominados “calentamiento global” y “cambio climático”, dos conceptos interrelacionados que implican el aumento de la temperatura del planeta, provocado por las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero.

De una forma más detallada, el calentamiento global hace referencia al incremento a largo plazo de la temperatura de los océanos y de la atmósfera terrestre debido fundamentalmente a la emisión masiva de los denominados gases de efecto invernadero (explicados en las próximas secciones del trabajo) los cuales retienen energía en forma de calor, proveniente del Sol, dentro de la atmósfera y sobre la superficie terrestre, a través del denominado efecto invernadero (término que se desarrollará en la siguiente sección).

Uno de los objetivos fundamentales que persigue la humanidad hoy en día es solucionar este problema. Es así, que las denominadas “energías renovables” surgieron en respuesta al calentamiento global y a la reducción del calentamiento global acrecentado por el uso de combustibles fósiles entre otro (se desarrollará en más detenimiento posteriormente).

Desde 1850, según datos del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), se estima que las actividades humanas han aumentado el calentamiento global con un forzamiento radiactivo de $1,6 \text{ W/m}^2$, experimentando un aumento de temperatura de hasta $1,2^\circ\text{C}$. Aún más, la temperatura durante la última década ha aumentado aproximadamente $1,09^\circ\text{C}$ más que en el periodo entre 1850 y 1900. A continuación, se muestra un gráfico de la evolución de la temperatura media global desde 1880 (datos proporcionados por la NASA) (Véase Figura 1).

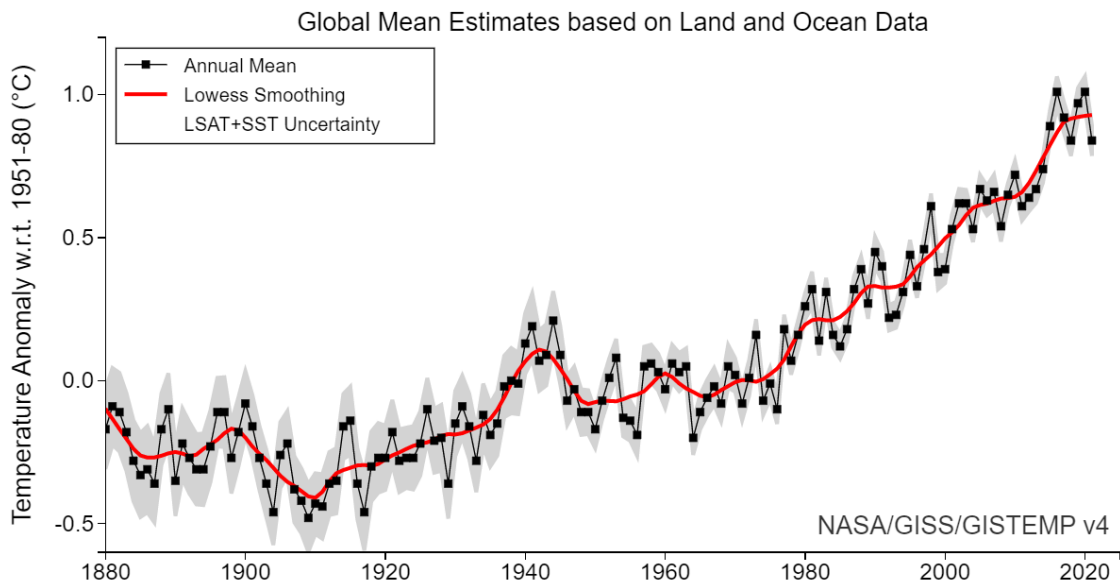


Figura 1: Estimación de la temperatura media anual 1880 – 2020. (NASA, 2020)

Nota: Índice de temperatura tierra-océano, 1880 al presente, con período base 1951-1980. La línea negra continua es la media anual mundial y la línea roja continua es el mínimo uniforme de cinco años. El sombreado gris representa la incertidumbre anual total (LSAT y SST) con un intervalo de confianza del 95 %.

1.1.2 Efecto invernadero y gases GEI

En una primera aproximación, el efecto invernadero se refiere al proceso mediante el cual la atmósfera de la Tierra se calienta. En mayor detalle, se define como un fenómeno natural por el que una serie de determinados gases, denominados gases de efecto invernadero, retienen parte de la energía solar, que produce un aumento de la temperatura (Caballero, Lozano, & Ortega, 2008). Adicionalmente, es un proceso natural que permite al planeta mantener las condiciones necesarias para albergar vida. Aún más, si no fuese por el efecto invernadero, la temperatura en promedio terrestre alcanzaría aproximadamente los -18.0°C . (Dlugokencky, Ed; Houweling, Sander; Dirksen, Ruud; Schröder, Marc; Hurst, Dale; Forster, Piers; , Secretaría de la OMM;, 2016).

A continuación, se muestra a grandes rasgos un a ilustración del proceso general (véase Figura 2).

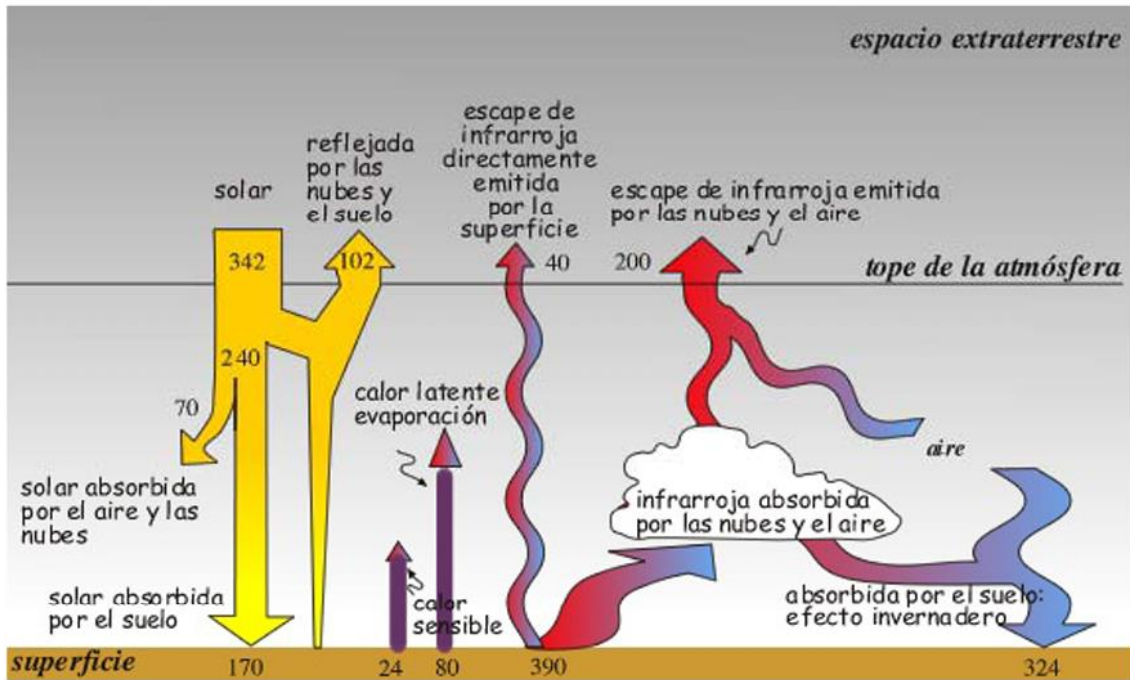


Figura 2: Proceso del efecto invernadero. (Uriarte, 2009)

Nota: Unidades en W/m^2

El proceso, y en base a la Figura 2, consiste en las siguientes etapas:

- 1) La radiación solar incide sobre la capa atmosférica terrestre con la que interacciona.
- 2) En segundo lugar, la mayor parte de la radiación solar pasa a través de la atmósfera, que no presenta gran obstáculo para la primera. Es remarcable mencionar que una pequeña parte de la radiación es absorbida por la atmósfera y otra es reflejada debido al contacto con las nubes y ciertos tipos de aerosoles.
- 3) A continuación, la radiación solar restante incide sobre la capa terrestre donde, de nuevo, una pequeña parte de la radiación es reflejada por la superficie y es direccionada de vuelta al espacio. Sin embargo, gran cantidad de esta radiación es absorbida por la atmósfera terrestre, que constituye alrededor del 50% de la radiación que incidió por primera vez en la atmósfera.
- 4) Es aquí donde la radiación terrestre entra en juego. Una parte de la energía capturada por la radiación solar calienta la corteza terrestre y como consecuencia radiación infrarroja es emitida de nuevo y es convertida en calor en forma de longitud de onda larga.

- 5) Es en esta etapa donde los problemas emergen. Parte de la radiación infrarroja es adsorbida y remitida por las moléculas de efecto invernadero. Consecuentemente, se vuelve a irradiar esta energía y de nuevo alcanza la superficie del planeta como energía térmica, calentando esta última.
- 6) Una parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie sí logra traspasar la atmósfera y se pierde en el espacio.

Como se ha mencionado anteriormente, existen una serie de gases denominados “gases de efecto invernadero” que son los gases localizados en la atmósfera, ya sean de origen natural o antrópico, que absorben y emiten radiación originaria de la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes. Los principales GEI (Gases de Efecto Invernadero o Greenhouse Gas Emissions) son:

- Vapor de agua (H₂O)

Tal y como se ha explicado anteriormente en el proceso del “efecto invernadero”, las nubes actúan como mecanismos de retroalimentación, es decir que, en caso de incremento de la temperatura terrestre, en presencia de otros GEI (gases de efecto invernadero), las nubes conllevarían un incremento bastante sustancial respecto al efecto invernadero generado por los demás GEI sin presencia de nubes. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera tiene una respuesta directa en la cantidad GEI, incrementándose cuando estos últimos lo hacen.

(Dlugokencky, Ed; Houweling, Sander; Dirksen, Ruud; Schröder, Marc; Hurst, Dale; Forster, Piers; , Secretaría de la OMM; 2016).

A continuación, se muestra la evolución de la concentración del vapor de agua en la atmósfera a lo largo de los últimos años (véase Figura 3).

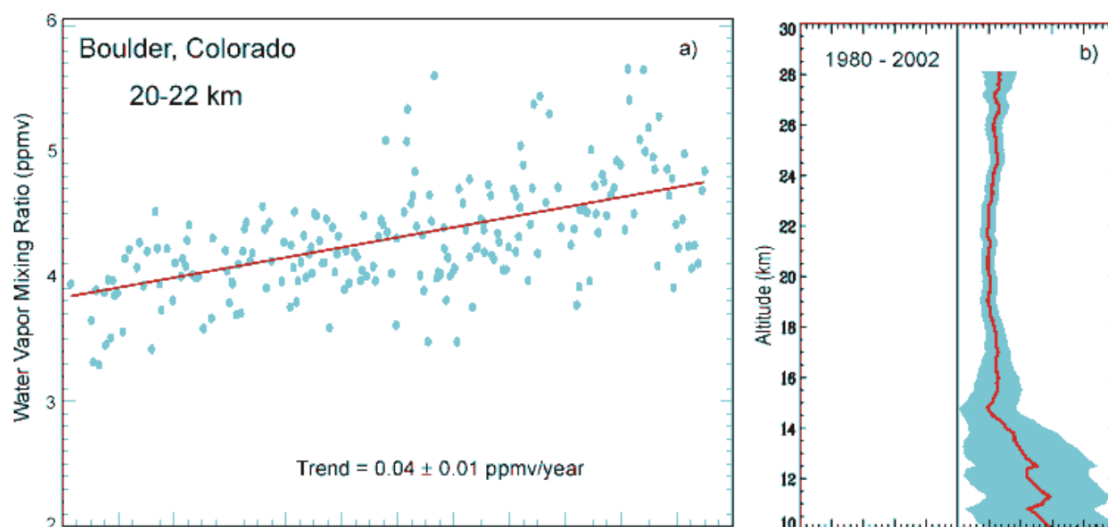


Figura 3: Evidencia de cantidades crecientes de vapor de agua (1980 – 2002) en Boulder, Colorado. (NOAA, 2002)

- Óxido nitroso (N₂O)

El óxido nitroso es actúa como GEI. El óxido nitroso es emitido por sectores como la agricultura, en el uso de fertilizantes con base de nitrógeno, junto con el tratamiento de los residuos animales, en sectores industriales como la del nailon y la quema de combustible en motores de combustión interna también liberan óxido nitroso a la atmósfera (OCEANA, 2019).

A continuación, se muestra la evolución de la concentración del óxido nitroso en la atmósfera a lo largo de los últimos años (véase Figura 4).

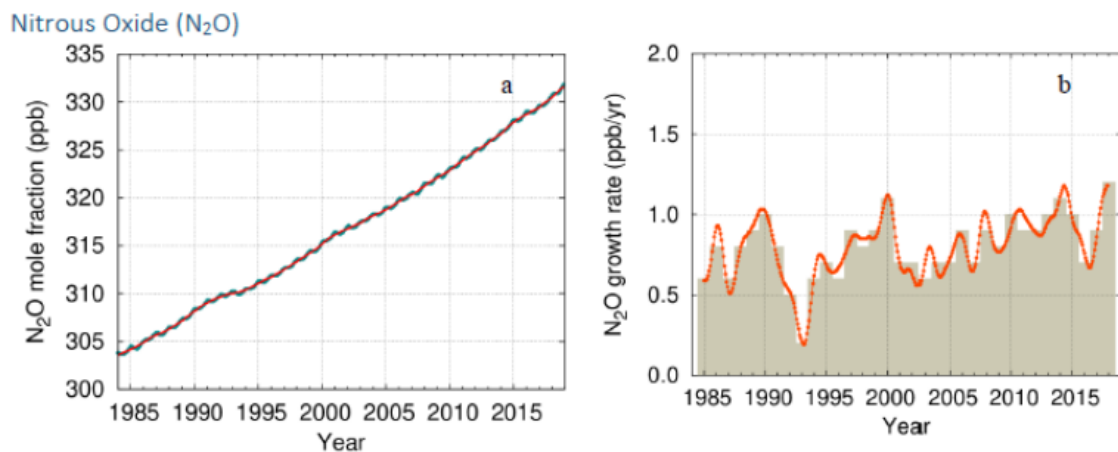


Figura 4: Media global de fracción molar (a) de NO₂ y su ritmo de crecimiento (b) desde 1985 – 2018 (OMM, 2019)

Nota: Incrementos sucesivos en medias anuales están mostrados en (b). La línea roja en (a) es la media mensual sin la variación por estaciones. Se han realizado observaciones de 96 estaciones para este análisis.

- Metano (CH₄)

El metano es uno de los gases de efecto invernadero más problemáticos que, además de agravar el calentamiento global, deteriora la calidad original del aire atmosférico. Tiene hasta 23 veces más poder que el dióxido de carbono para calentar el planeta. (Oswaldo Benavides Ballesteros , Henry; Esperanza León Aristizabal , Gloria, 2007)

Cerca del 40% del CH₄ que se emite a la atmósfera procede de fuentes naturales, mientras que el resto proviene de fuentes antropógenos, como por ejemplo el cultivo de arroz, explotación de combustibles fósiles, vertederos o combustión de biomasa entre otros.

Al igual que en el caso del óxido nítrico, uno de los sectores promotores en la emisión de metano es la agricultura, provenientes de actividades que involucran por ejemplo la manipulación de estiércol, que generan alrededor del 32% de las emisiones de CH₄ causadas por el hombre. Adicionalmente, al interactuar con la radiación solar, favorece la formación del ozono a nivel del suelo, otro contaminante atmosférico.

A continuación, se muestra la evolución de la concentración del metano en la atmósfera a lo largo de los últimos años (véase Figura 5).

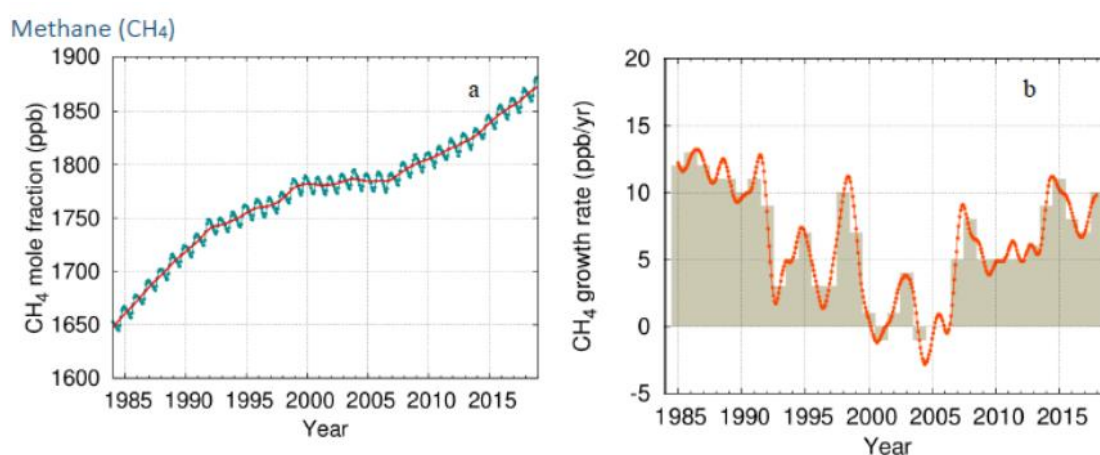


Figura 5: Media global de fracción molar (a) de CH₄ y su ritmo de crecimiento (b) desde 1985 – 2018 (OMM, 2019).

Nota: Incrementos sucesivos en medias anuales están mostrados en (b). La línea roja en (a) es la media mensual sin la variación por estaciones. Se han realizado observaciones de 127 estaciones para este análisis.

- Dióxido de carbono (CO₂)

Las emisiones excesivas de este gas incoloro e inodoro son una de las principales causas del calentamiento global y de mayor preocupación mundial. El dióxido de carbono, al igual que el metano, es generado en actividades como la quema de combustibles fósiles, residuos sólidos o árboles entre otros y también como resultado de ciertas reacciones químicas.

El índice anual de gases de efecto invernadero de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA) de los Estados Unidos de América muestra que entre 1990 y 2018 el CO₂ ha contribuido al calentamiento global en un 80 % (OMM, 2019).

A continuación, se muestra la evolución de la concentración del CO₂ en la atmósfera a lo largo de los últimos años.

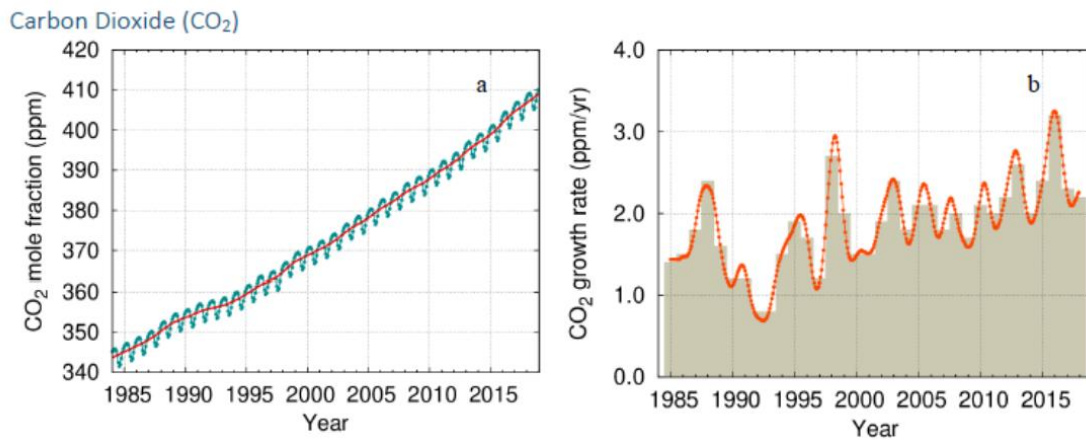


Figura 6: Media global de fracción molar (a) de CO₂ y su ritmo de crecimiento (b) desde 1985 – 2018 (OMM, 2019).

Nota: Incrementos sucesivos en medias anuales están mostrados en (b). La línea roja en (a) es la media mensual sin la variación por estaciones. Se han realizado observaciones de 129 estaciones para este análisis.

- Otros

Son precursores de ozono troposférico, además de contaminantes del aire. Se incluyen en esta categoría gases como el hexafluoruro de azufre (SF₆), ozono (O₃), halocarbonos, compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano y el monóxido de carbono.

A modo de resumen, las principales causas que han acrecentado e intensificado las emisiones de los determinados gases de efecto invernadero son: la quema de combustibles fósiles, de biomasa y de residuos (CH₄, N₂O y CO₂); la producción y uso de aerosoles (nubes y vapor de agua y aerosoles); la fermentación entérica y la descomposición en condiciones anaerobias del estiércol o los cultivos de arroz bajo riego; la fundición de aluminio; la fabricación de semiconductores y la transmisión y distribución de energía eléctrica (SF₆) (Oswaldo Benavides Ballesteros, Henry; Esperanza León Aristizabal, Gloria, 2007).

Muchas organizaciones mundiales y gobiernos se levantaron en repuesta a, como se observa en las figuras 4, 5 y 6, a la problemático del constante crecimiento de estos gases nocivos en la atmósfera.

1.1.3 Acuerdo de París (2015)

Como ya se ha explicado anteriormente, la alerta y preocupación surge de la intensificación de las emisiones de GEI debido fundamentalmente a la creciente emisión del gas nocivo CO₂, fruto actividades como la combustión fósil, de biomasa y de residuos, cambios en los usos del suelo como la tala y la quema de bosques o la fundición del aluminio, la fabricación de semiconductores y la transmisión y distribución de energía eléctrica entre otros. La creciente emisión de CO₂ a la atmósfera tendrá un impacto directo en fenómenos como el derretimiento de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar, inundaciones, proliferación de huracanes o la desertificación entre otros muchos.

Estos hechos nos acercan al umbral de los límites establecidos por el Acuerdo de París (2015), por el cual expresa en el artículo 2 de dicho acuerdo (ONU, 2015).

Naciones Unidas 2015

ACUERDO DE PARÍS (2015) – NACIONES UNIDAS

Artículo 2.1

1. El presente Acuerdo, al mejorar la aplicación de la Convención, incluido el logro de su objetivo, tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza, y para ello:
 - a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.
 - b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos.
 - c) Situar los flujos financieros en un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.
2. El presente Acuerdo se aplicará de modo que refleje la equidad y el principio de las responsabilidades comunes pero diferenciadas y las capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales.

Figura 7: Acuerdo de París 2015, artículo 2.1 (ONU, 2015).

1.2 Motivación

1.2.1 Análisis de causas

Como se ha visto en el apartado anterior de este proyecto, el gas antropogénico más nocivo generado por la actividad humana es el dióxido de carbono, que será de ahora en adelante el pilar fundamental sobre el que se sostendrá este proyecto.

La principal actividad del ser humano que emite CO₂ es la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo). A continuación, se muestran y describen las principales fuentes de emisiones clasificadas por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) (EPA, 2022).

- Producción industrial: el CO₂ se genera fundamentalmente a través del consumo de combustibles fósiles. La combustión de combustibles fósiles de diversos procesos industriales representó aproximadamente el 15,4% del total de emisiones de CO₂ en EE. UU (EPA, 2022).
- Mundo eléctrico: como es de conocimiento de todos, la electricidad juega un papel determinante y fundamental en la vida humana, la cual se consume en hogares, empresas e industrias. En el año 2017, la combustión de combustibles fósiles para generar electricidad supuso aproximadamente el 32,9% del total de emisiones de CO₂ en EE. UU (EPA, 2022).
- Transporte: esta categoría incluye vehículos vinculados a ella como el transporte marítimo, el ferrocarril, vehículos aéreos y de carretera. a combustión de combustibles fósiles como la gasolina y el diésel para transportar personas y mercancías fue la fuente de emisiones de CO₂ más grande en el año 2017, aproximadamente el 34,2% del total de emisiones de CO₂ en EE. UU (EPA, 2022).

De manera más detallada, y para contrastar los datos de la EPA, se van a analizar los datos obtenidos por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) en relación con la cantidad de CO₂ emitido por sector y su porcentaje de involucración.

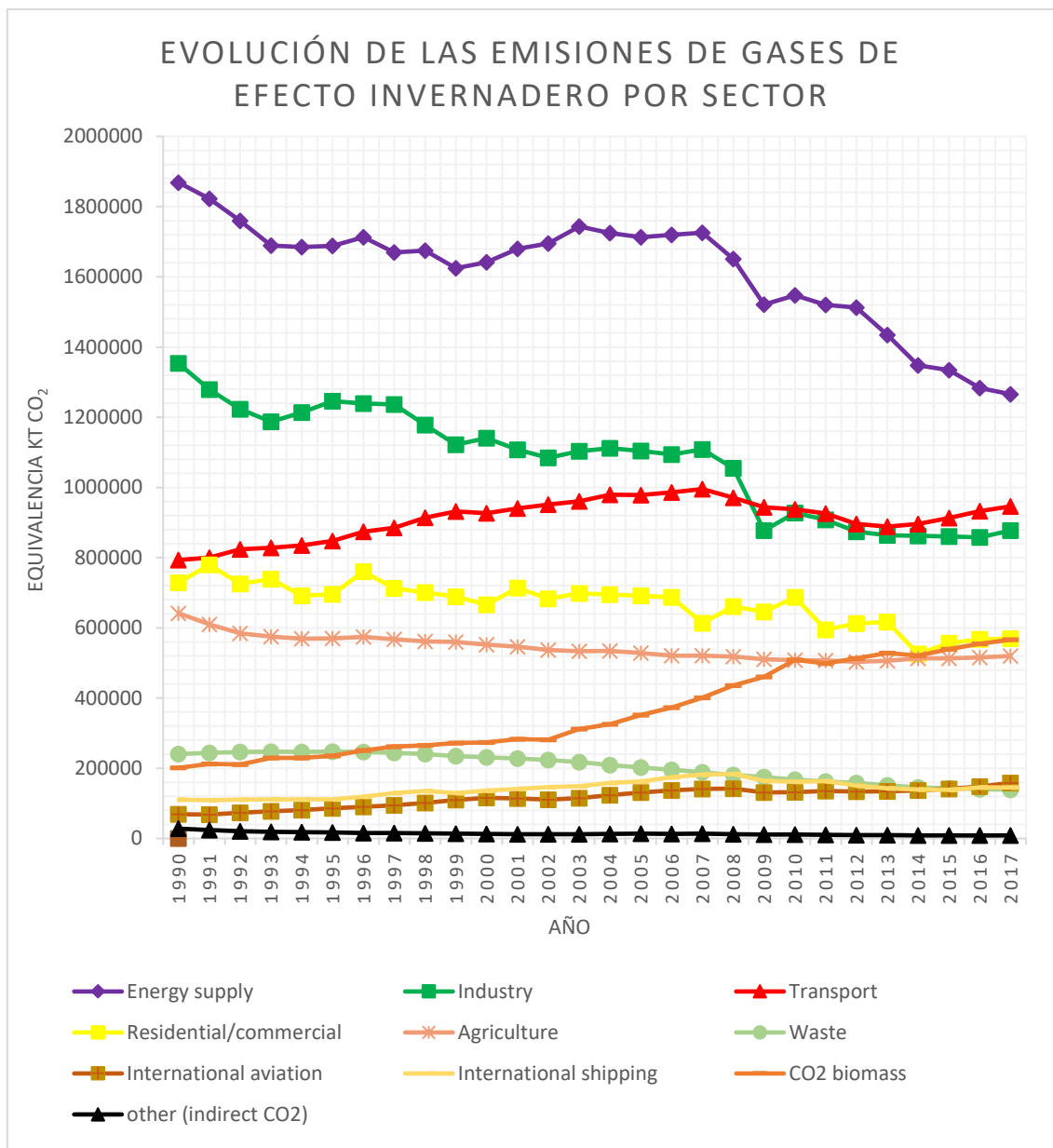


Figura 8: Emisiones de gases de efecto invernadero por sector (EEA, 2019).

Nota 1: Elaboración propia usando el programa "Excel.exe" y datos de la EEA.

Nota2: Los datos se basan en la presentación del inventario de GEI de la UE a la CMNUCC. El inventario de GEI de la UE comprende la suma directa de los inventarios nacionales elaborados por los Estados miembros de la UE que componen la UE-28. Además, la Unión Europea, sus Estados miembros e Islandia han acordado cumplir e informar conjuntamente sobre sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones para el segundo período de compromiso del Protocolo de Kioto. Las principales instituciones involucradas en la compilación del inventario de GEI de la UE son los Estados miembros, la Dirección General de Acción por el Clima de la Comisión Europea (DG CLIMA), la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) y su Centro Temático Europeo sobre Contaminación Atmosférica y Mitigación del Cambio Climático (ETC/ACM), Eurostat y el Centro Común de Investigación (JRC).

Como conclusión a este apartado se puede afirmar que, observando la figura 8, los sectores más contaminantes y que han perdurado a lo largo de los años son: la industria, el transporte y la creación de energía (electricidad).

La decisión final sobre el tema del proyecto se ha basado en la problemática del cambio climático y los datos anteriormente analizados. Como se pueden observar en las figuras 3, 4, 5, 6 y 8, existe un incremento constante de las emisiones y presencia de los GEI en la atmósfera, con su consecuente resultado en el incremento de la temperatura del planeta (véase figura 1).

Este proyecto se centrará en solucionar la casuística del mundo del transporte, intentando reducir hasta el máximo las emisiones de los gases de efecto invernadero nocivos que se generan hoy en día en el sector del transporte.

1.2.2 Soluciones existentes

En la actualidad existen una serie de vehículos en el sector del transporte que cumplen los requisitos de no emisión de gases de efecto invernadero y no nocivos, que sería los vehículos de cero emisiones (VCE), que incluyen los vehículos de propulsión humana (bicicletas, monopatines...), eléctricos y los innovadores eléctricos con pilas de hidrógeno como combustible y los emergentes vehículos acuáticos que usan amoníaco como combustible.

Con el objetivo de comprender como estas organizaciones y empresas de hoy en día, que surgen en respuesta al cambio climático y el calentamiento global, están fomentando las actividades bajo la etiqueta de “cero emisores de GEI” se va a recoger y trabajar los datos de como los vehículos terrestres están evolucionando en el mundo, ya sean fabricaciones, ventas o consumo.

A continuación, se muestran datos del uso de los diferentes vehículos en Europa durante 2021 (ACEA, 2021).

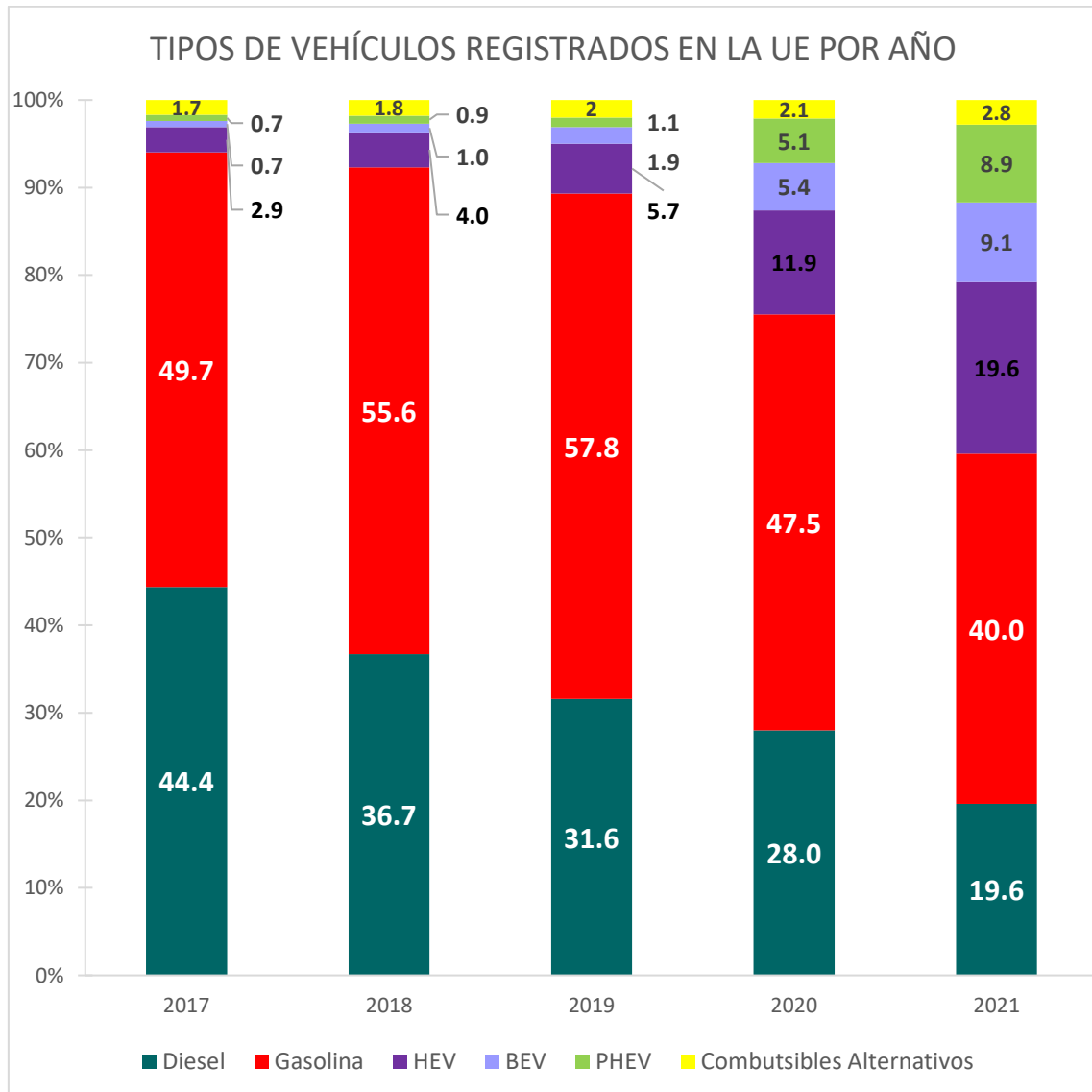


Figura 9: Gráfico de los tipos de vehículos en uso registrados en la UE entre 2017 – 2021 (ACEA, 2021).

Nota: Elaboración propia con datos de la ACEA.

Es remarcable mencionar que existe una tendencia positiva de los eléctricos, los híbridos eléctricos y los híbridos eléctricos enchufables.

1.3 Objetivos

En este proyecto se desarrollará la idea de los vehículos que usan amoníaco e hidrógeno como combustible ya que, en su reacción química, no emite gases nocivos como el CO₂. En la actualidad no existe ningún vehículo terrestre que use amoníaco, aunque, sin embargo, sí que existen barcos y buques que ya empiezan a utilizar amoníaco como combustible.

El presente documento se elabora en seguimiento de los siguientes objetivos, promovidos fundamentalmente por la esencia del proyecto y basados en un pilar fundamental, la reducción de emisiones de CO₂:

- 1) Estudio del contexto y razón de selección del tema.
- 2) Recopilación de la característica de los químicos involucrados.
- 3) Análisis y diseño de un sistema que se adapte a un motor de combustión interno alternativo para que use amoníaco e hidrógeno como combustibles.
- 4) Búsqueda del cumplimiento de algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible.

2. CAPÍTULO 2: Amoniaco

2.1 Precedentes

El amoniaco, cuyo término recibe otro nombre como hidruro de nitrógeno, trihidruro de nitrógeno, espíritu de Hartshorn o gas de amonio es un compuesto químico cuya fórmula química es NH_3 y a rasgos generales es un gas incoloro con olor característicamente repulsivo (RAE, 2021).

El amoniaco se remonta a la época de los romanos, donde recibió el nombre de “sal ammoniacus” debido a los depósitos de cloruro de amoniaco colectados cerca del templo de Amun, localizado en la antigua Libia (Wikipedia, Amoniaco, 2022). Fue usado posteriormente en la época medieval (Siglos V-XV) por alquimistas, como los químicos Jābir ibn Hayyān o Alberto Magnus, y tintoreros. Este compuesto químico recibió el nombre de “aire alcalino” cuando en 1744 Joseph Priestley logró aislar el amoniaco gaseoso y fue once años después cuando Claude Louis Berthollet encontró su composición.

Sin embargo, no fue hasta el Siglo XX donde se dio un salto gigantesco en el conocimiento sobre el amoniaco. Fueron Fritz Haber y Carl Bosch quienes por primera vez produjeron amoniaco a partir de nitrógeno en el aire.

En la actualidad el amoniaco juega un papel muy importante en la sociedad, funcionando a modo de limpiador, fertilizante, fermentador, y como combustible, que es en donde se centrará este proyecto. Es de destacar hacer un análisis de en qué escala se está produciendo amoniaco mundialmente.

El consumo y producción global de amoniaco se representa en la figura 10.

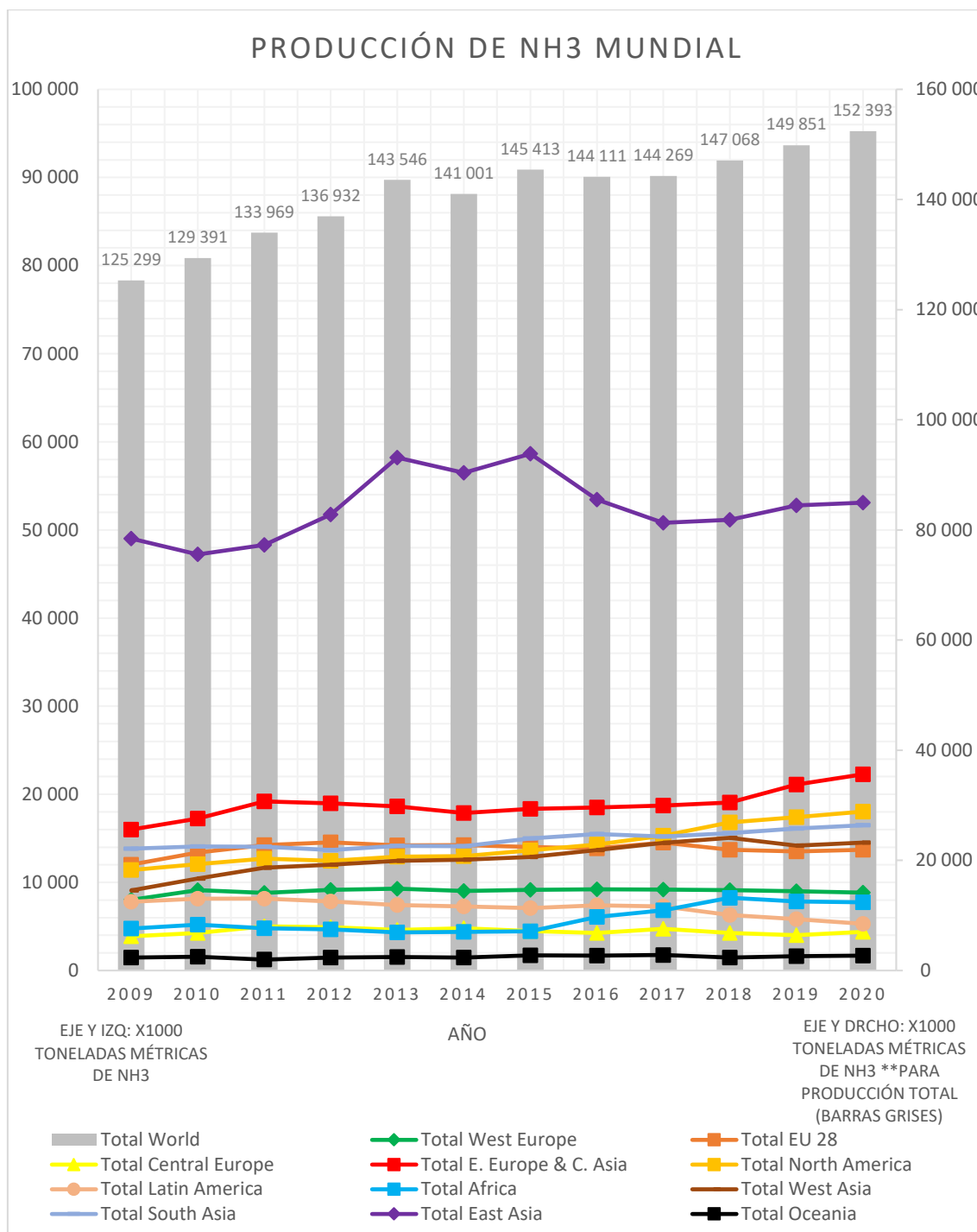


Figura 10: Producción mundial de NH3 (IFA, 2018)

Nota 1: Elaboración propia usando datos de la EEA.

Nota2: Los datos recogidos de la Asociación Internacional de Fabricantes de Fertilizantes (IFA) emitidos el 20-07-2018 Perspectivas de IFA sobre la demanda mundial de fertilizantes 2018-2022.

2.2 Propiedades

Uno de los objetos fundamentales de este proyecto realizar una recopilación exhaustiva de las propiedades, características de uso y almacenaje del amoniaco en sus distintos estados de la materia, así como sus correspondientes regulaciones legales y de seguridad. Todos estos datos irán específicamente enfocados al desarrollo y diseño posterior del motor de amoniaco.

Información y reglamento sobre primeros auxilios, información toxicológica, ecotoxicológica, sobre el método de eliminación de productos en el reciclaje, así como información sobre el control de exposición y protección de personal, medidas contra incendios o en caso de derrame o fuga accidental, regulación de uso y medidas de manejo no se incluirán en este proyecto ya que no son objeto de este último.

2.2.1 Características físicas, termodinámicas y químicas

Las tablas termodinámicas del amoniaco se han adjuntado al ANEXO A de este proyecto.

Las tablas de propiedades físicas, termodinámicas y químicas se han adjuntado al ANEXO B de este proyecto.

2.3 Almacenamiento y transporte

En lo referente al almacenamiento y transporte del amoniaco se ve necesario recopilar información, reglamentos, fichas de seguridad del amoniaco anhidro. Esta sección no viene solo a ser una nota informativa y de sentido vacío, sino que servirá posteriormente en el diseño del motor para la parte de almacenaje del amoniaco en el depósito del vehículo.

Así pues, se ha hecho una recopilación de los aspectos más relevantes que conciernen a este proyecto en referencia a la normativa establecida por el “Ministerio de Industria y Energía del Gobierno de España” (véase ANEXO C).

3 CAPÍTULO 3: Diseño del motor de amoniaco e hidrógeno

Este tercer bloque del proyecto se centrará en la adaptación de un motor de combustión interna alternativo (MCIA), también a menudo llamados motor de pistón o motores de explosión o diésel, de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno y amoniaco como combustible.

No se trata pues de realizar un análisis o diseño estructural de un motor, sino de diseñar un sistema depósito-motor-escape donde se genere un trabajo mecánico proveniente de la combustión de amoniaco e hidrógeno.

A modo de descripción general, el estudio de viabilidad, con objeto de esquematización de un motor de combustión interna alternativo al amoniaco e hidrógeno, trata las siguientes fases:

- 1) El amoniaco, en estado líquido con el objetivo de que quepa el mayor volumen posible, se introduce en el depósito de vehículo como carburante.
- 2) Para conseguir hidrógeno, el amoniaco líquido se transformará en gas a través de un intercambiador de calor.
- 3) Este amoniaco gasificado pasará por un catalizador donde se descompondrá en hidrógeno y nitrógeno.
- 4) Es posteriormente, en el pistón, donde, tras redirigir el hidrógeno, se mezclarán el hidrógeno y amoniaco con el aire y se realizará la reacción y como consecuencia, la transformación de energía calórica en trabajo mecánico.
- 5) En último lugar, se requiere del estudio de los gases de escape y en caso de necesidad, aportar catalizadores de reducción.

El siguiente esquema representa todos los sistemas involucrados en el diseño (véase figura 11).

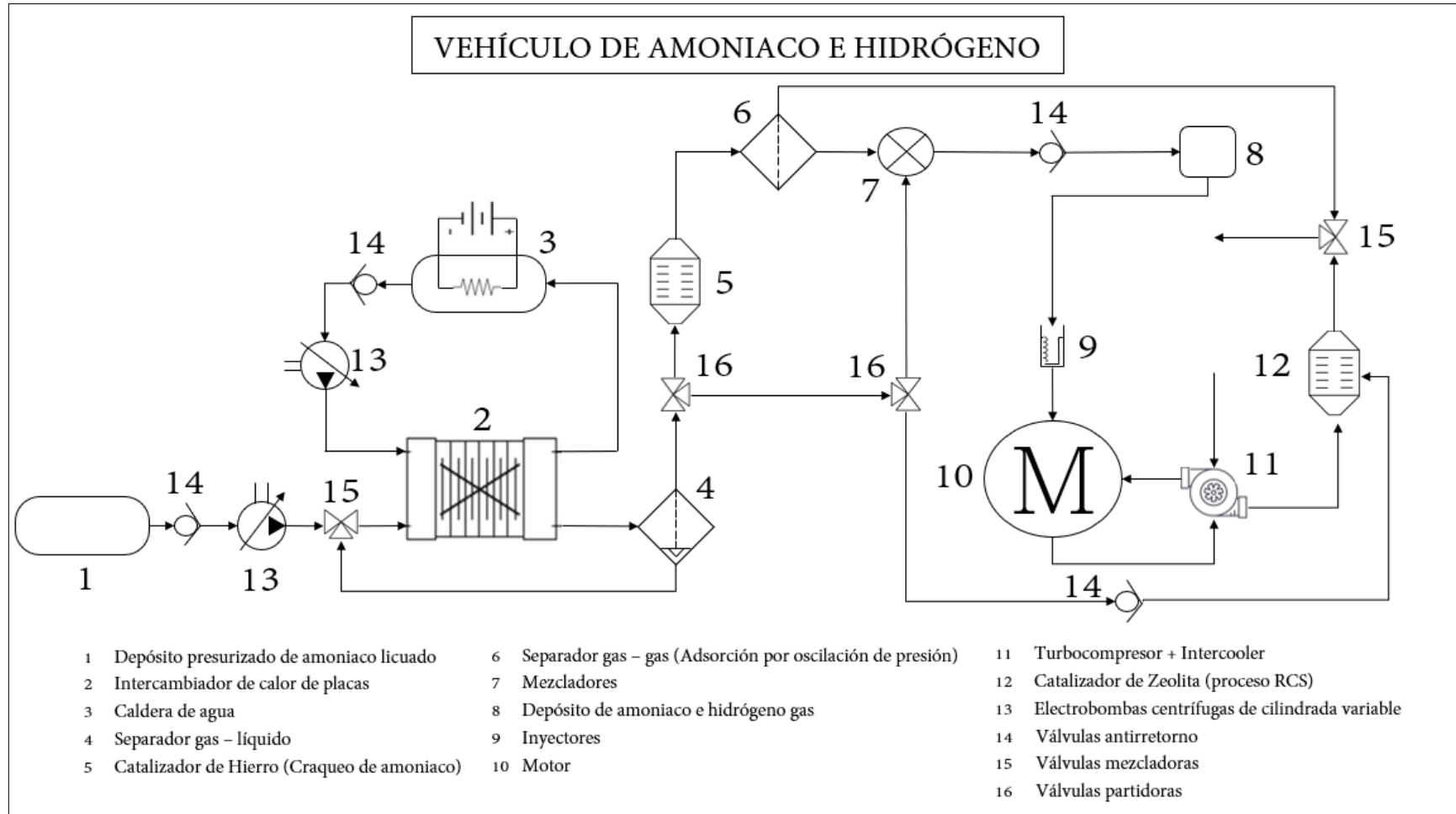


Figura 11: Esquema general de los componentes del vehículo (Elaboración propia)

Nota: este esquema se ha elaborado con el programa "PowerPoint"

3.1 Tanque de combustible

La primera parte del proceso comienza, como es natural, por introducir el combustible en el tanque del depósito del vehículo a través de los surtidores de las distintas estaciones de servicio. Los mecanismos que regulan el funcionamiento de la inyección del amoniaco en el depósito no son de estudio en este proyecto, ya que se utilizarán los existentes surtidores con sus correspondientes modificaciones para adaptarlos a las necesidades del amoniaco líquido.

Siguiendo las especificaciones establecidas en el ANEXO B, sobre los requisitos de almacenaje, se va a diseñar un depósito, o tanque de combustible, de amoniaco. Adicionalmente, se aportará en la tabla Excel adjunta las propiedades del amoniaco a la presión y temperatura establecidos en este diseño (ANEXO D).

3.1.1 Tipo de depósito y condiciones de operación

Para este depósito se necesita almacenar el amoniaco en su estado líquido, como ya se ha mencionado anteriormente. El objetivo fundamental es no tener que contar con la dependencia de la variable “temperatura”. Como se ha mencionado en secciones anteriores, una de las ventajas competitivas del amoniaco frente al hidrógeno es que no se necesitan tanques de criogenización ni temperaturas extremadamente bajas para su almacenamiento en estado líquido. Sin embargo, con los existentes depósitos y tanques de presurización la variable “presión” no resulta en un problema grave para el almacenamiento.

Por otra parte, en relación con los distintos tipos de tanques de almacenamiento (ANEXO B) se seleccionará aquel que mejor se adecue a las necesidades del depósito. Un recipiente a presión es un recipiente cerrado, diseñado para soportar gases o líquidos a una presión sustancialmente diferente de la presión ambiental, ya sea por presión interna o presión externa, independientemente de su forma y dimensiones y cuando el diseño interno del contenedor excede 15 psig (1,03421 bar), este será conocido como un recipiente a presión (Días del Castillo Rodríguez, 2018).

Estos depósitos se clasifican en: de almacenamiento refrigerado, de almacenamiento semirrefrigerado con temperatura máxima en servicio inferior a 5 °C y de almacenamiento no refrigerado (véase ANEXO C).

Haciendo uso de las propiedades termodinámicas y físicas del amoniaco expuestas en los ANEXO A y ANEXO B de este proyecto, y la normativa y reglamento de almacenaje y transporte descritos en el ANEXO C, se han seleccionado las siguientes condiciones de operación del depósito:

- Tipo de depósito: presurizado semirrefrigerado.
- Temperatura del amoniaco: 5°C.
- Presión del tanque: 10 bar (1000 kPa).

3.1.2 Cálculos de diseño y resultados

3.1.2.1 Diseño del recipiente a presión

El diseño de los recipientes de presión se ha realizado conforme a las especificaciones de lo figurado en el ANEXO C de este proyecto y siguiendo las directrices del Código ASME BPVC Sección VIII – División 1 para el diseño de recipientes de presión.

La subsección A de dicho código establece los requisitos generales que deben cumplir dichos recipientes a presión. En este proyecto nos centraremos en los siguientes aspectos del código para el diseño del recipiente cilíndrico.

Tras la selección del material, sea AISI 316 con sus correspondientes propiedades mecánicas y físicas (véase ANEXO D), se ha procedido al cálculo de los distintos parámetros dispuestos en dicha subsección A del código ASME.

Las fórmulas pertinentes según los distintos esfuerzos aplicados siguen a continuación:

- Esfuerzo tangencial.

El espesor y presión admisible según esfuerzo tangencial requerido se rigen por las siguientes ecuaciones respectivamente (se ha añadido una tolerancia de corrosión específica de 2mm).

Si $t \leq \frac{R}{2}$ ó $P \leq 0,385 S E$:

$$t_r = \frac{P R}{S E - 0,6 P} + C \quad \text{Ec. 1}$$

$$P_a = \frac{S E t}{R + 0,6 t} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

S	Tensión máxima admisible	R	Radio interior
E	Eficiencia de las juntas de soldadura	Pa	Presión admisible
tr	Espesor mínimo requerido	P	Presión interior de diseño
C	Tolerancia a la corrosión específica	t	Espesor final del cuerpo

- Esfuerzo longitudinal.

El espesor y presión admisible según esfuerzo longitudinal requerido se rigen por las siguientes ecuaciones respectivamente.

$$Si t \leq \frac{R}{2} \text{ ó } P \leq 1,25 S E$$

$$t_r = \frac{P R}{2 S E + 0,4 P} \quad Ec. 3$$

$$P_a = \frac{2 S E t}{R - 0,4 t} \quad Ec. 4$$

Donde:

S	Tensión máxima admisible	R	Radio interior
E	Eficiencia de las juntas de soldadura	Pa	Presión admisible
tr	Espesor mínimo requerido	P	Presión interior de diseño
C	Tolerancia a la corrosión específica	t	Espesor final del cuerpo

Así, y haciendo uso de las ecuaciones anteriores (véase Ec. 1; Ec 2; Ec 3; Ec 4), queda la siguiente hoja de cálculo elaborada en *Excel.exe* para el diseño estructural de las botellas cilíndricas (véase figura 12):

Cálculos de diseño de las botellas cilíndricas			
Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Presión de diseño	P	kPa	1300
Material	-	-	AISI 316
Esfuerzo permisible de material	S	KPa	196000
Eficiencia de la junta de soldadura	E	%	85%
Radio interior		mm	40.105
Tolerancia de corrosión específica	C	mm	2
Espesor de diseño mínimo según esfuerzo tangencial	e1	mm	2.314
Espesor de diseño mínimo según esfuerzo longitudinal	e2	mm	2.156
Espesor de diseño final	e	mm	3
Presión admisible según esfuerzo tangencial	Pa2	kPa	11926.98
Presión admisible según esfuerzo longitudinal	Pa1	kPa	25693.36
Capacidad	Cap	L	25
Longitud	L	mm	1000
Diámetro externo	De	mm	184.412
Diámetro interno	Di	mm	178.412
Peso en vacío aprox	Pe	kg	13.68

Figura 12: Hoja de cálculos del diseño y dimensionamiento de las botellas presurizadas de amoníaco licuado. (Elaboración propia)

Nota: Se ha utilizado el programa "Excel.exe" la elaboración de la tabla

Todas las especificaciones de materiales, dimensiones, condiciones de funcionamiento y datos de diseño están resumidos en el ANEXO D.

A continuación, se muestra una pequeña representación de las botellas de amoníaco licuado (véase figura 13)



*Figura 13: Ilustración de la forma de las botellas de 25L de amoníaco licuado diseñadas.
(Elaboración propia)*

Nota: Se ha utilizado el programa "SolidEdge" la elaboración de las figuras

3.1.2.2 Análisis de la evolución de la presión interna

Se ha realizado un breve estudio sobre la evolución de la presión interna del depósito a medida que se va vaciando.

Durante la fase de vaciado, considerando que el aire es un gas ideal, se recurre a la expresión de la Ley de los Gases Ideales la cual dice que la presión ejercida por una fuerza física es inversamente proporcional al volumen de un cuerpo gaseoso, siempre y cuando su temperatura se mantenga constante (Wikipedia, Ley de los Gases Ideales, 2022). Se asume que la temperatura dentro del depósito permanece constante. Véase Ec. 5.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Ec. 5

En segundo lugar, se ha de tener en consideración la geometría del cilindro horizontal. El volumen correspondiente a una sección del cilindro horizontal, donde la altura del fluido se estudio sea menor al radio del cilindro, y el volumen correspondiente al resto del cilindro son respectivamente las siguientes:

$$V_{sec} = \left(\frac{r^2}{2} \left(\arcseno \left(\frac{2r^2}{(r-h)\sqrt{2rh-h^2}} \right) - \frac{2r^2}{(r-h)\sqrt{2rh-h^2}} \right) \right) L \quad Ec. 6$$

$$V_{res} = \left(\pi r^2 - \frac{r^2}{2} \left(\arcseno \left(\frac{2r^2}{(r-h)\sqrt{2rh-h^2}} \right) - \frac{2r^2}{(r-h)\sqrt{2rh-h^2}} \right) \right) L \quad Ec. 7$$

Donde:

Vsec	Volumen del sector	r	Radio interior
Vres	Volumen restante	L	Longitud
h	Altura del nivel del fluido	Referencia	Base cilindro

En tercer lugar, y de manera más lógica, el volumen del otro fluido restante será la diferencia entre el volumen total del cilindro y el ocupado por el otro fluido, referente a la Ec. 6.

Por tanto, haciendo uso de las ecuaciones anteriores (véase Ec. 5, Ec. 6, Ec. 7) se han realizado las siguientes gráficas en *Excel.exe* que permiten visualizar la evolución del volumen y presión en el interior del cilindro en función de la altura del amoniaco y se han tomado las siguientes consideraciones:

- La presión interior del cilindro se considera igual tanto para el aire como para el amoniaco ya que el término " ρgh " de la ecuación Ec.8 que describe el principio de Bernoulli es muy inferior a la presión de servicio del depósito.

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = cte \quad Ec. 8$$

Siendo el término $P = 1000\text{kPa}$ y el término $\rho gh = 1,012\text{kPa}$ donde:

P	Presión	v	Velocidad	h	Altura
ρ	Densidad	g	Gravedad	cte	Constante

Los cálculos se han realizado para condiciones desde depósito lleno de amoniaco hasta vacío. Sin embargo, y con arreglo al ANEXO C, el punto de comienzo inicial corresponde al de grado de llenado máximo, es decir, para un volumen de amoniaco de 0,02375m³, que corresponde a una altura desde base de 161.191mm.

Se ha de tener en mente que la cantidad de aire que permanece en el depósito es constante, es decir, no existe masa de aire que entre o salga del mismo y por tanto podemos afirmar que responde al comportamiento de la ecuación Ec. 5. Sin embargo, el amoniaco, no responde a este comportamiento que ya en primer lugar es un líquido, y en segundo lugar existe masa de amoniaco que sale del depósito y por tanto PV no es constante.

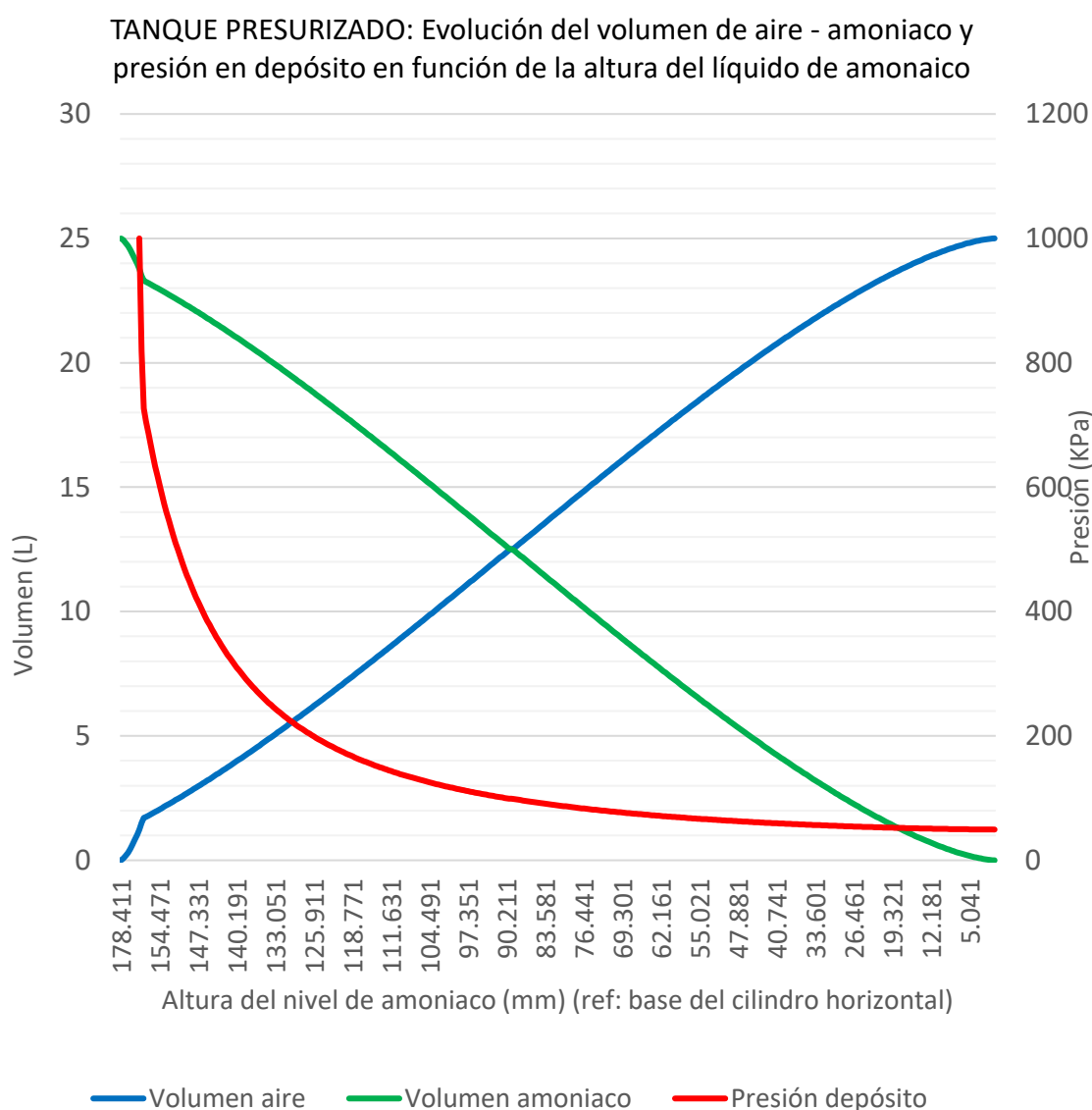


Figura 14: Gráfico de la evolución natural de la presión en los depósitos (Elaboración propia)

Nota: Se ha utilizado el programa "Excel.exe" la elaboración de la gráfica.

Como se puede observar en la gráfica (véase figura 14), la presión disminuye a medida que aumenta el volumen de aire dentro del recipiente, siendo la masa de este último constante. Según la tabla de propiedades termodinámicas adjuntas en el ANEXO A, a el amoniaco a 5°C se evapora a 510kPa aproximadamente. Por tanto, y como se puede observar en la figura anteriormente adjuntada (véase Figura 14), el depósito alcanza una presión de 510kPa a los escasos 155.122mm de altura, que corresponde solo a 6,079mm de caída de altura de amoniaco desde su estado inicial.

La solución para este problema reside en los denominados sistemas de control de tanque hidroneumático.

3.1.2.3 Análisis de la evolución de la presión interna con Compresor

Un tanque hidroneumático garantiza que siempre exista la presión deseada dentro de un depósito y esto se consigue entregando más aire al depósito a través de un compresor de aire sin aceite. Generalmente sirven para tanques de aire-agua. El tanque consiste en las siguientes partes (véase figura 15):

- Un compresor de aire sin aceite: inyecta aire a las órdenes del electrodo sensor del nivel de amoniaco.
- Sensor de nivel.
- Interruptor del nivel de líquido con un tiempo de retardo de relé.
- Interruptor de presión: detecta la presión de aire en el tanque. Ambos detectores están programados para mantener el nivel de fluido deseado dentro del tanque de presión a través del control del funcionamiento del compresor de aire.

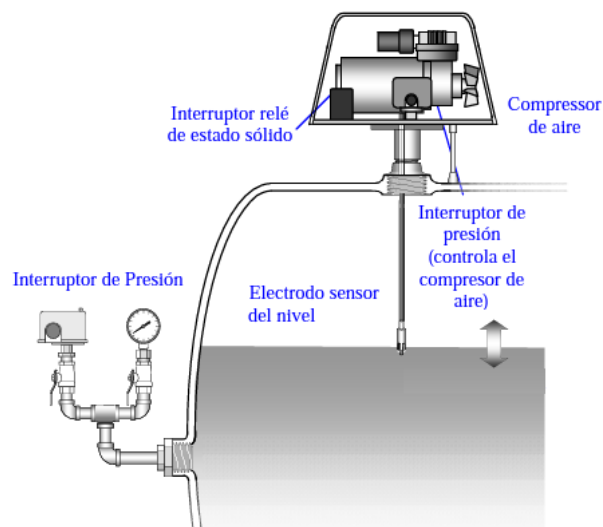


Figura 15: Esquema de los componentes de un tanque hidroneumático (Washington State Department of Health, 2011).

La idea de este apartado es adaptar la tecnología de los tanques hidroneumáticos al beneficio y condiciones del tanque de amoniaco. En este proyecto se recurrirá a los estudios de la evolución de la presión del tanque en función del compresor.

Como se ha observado en la figura 15, la presión cae muy rápido en el depósito. Por tanto, el objetivo es que, ya que el amoniaco evapora a 5°C se evapora a 510kPa, mantener siempre la presión dentro del tanque a más de 600kPa. Por tanto, la solución es que, cuando el sensor de nivel reconozca la altura correspondiente a cada punto de 600kPa o el manómetro digital mida 600kPa se accionará el compresor hasta que la presión vuelva a alcanzar los 1000kPa (véase Figura 16). En la siguiente figura la presión cambia instantáneamente de 600kPa a 1000kPa, lo cual no es realista, pero nos da una idea aproximada de lo que se quiere conseguir en el proyecto.

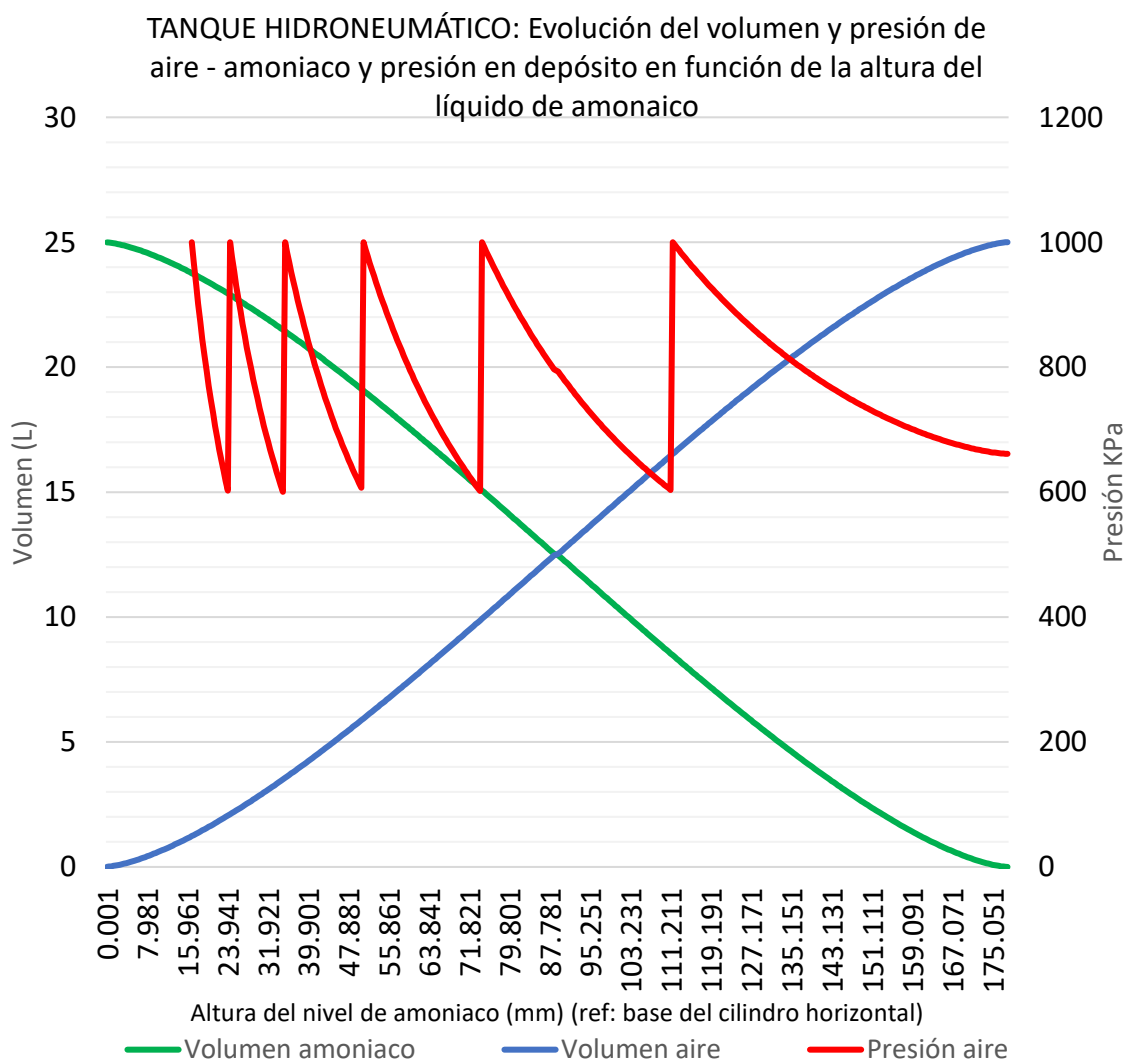


Figura 16: Gráfico de la evolución de la presión en los depósitos con compresor

Nota: Se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de la gráfica

3.2 Circuito cerrado de agua: caldera eléctrica

El amoníaco líquido, con el objetivo de que sea posible realizar un cracking y conseguir así hidrógeno y nitrógeno gas, a la salida del tanque se dirigirá directamente a un intercambiador de calor donde será convertido en gas.

En esta sección se describirá en proceso que sigue el fluido, en este caso agua, que posteriormente evaporará el amoníaco. El agua será la que entre en el intercambiador (descrito en la siguiente sección) en forma de vapor caliente y que evaporará el amoníaco. El mecanismo que se utilizará para calentar el circuito cerrado de agua es una caldera eléctrica.

La caldera eléctrica es una alternativa a las calderas de gas convencionales que funcionan con gas natural o propano. Las calderas eléctricas utilizan unas resistencias que se calientan con el paso de la electricidad y que, a su vez, aumentan la temperatura del agua con la que están en contacto (PrecioGas, 2022).

3.2.1 Tipos y características

Hay dos tipos básicos de calderas eléctricas:

- Las de baja capacidad y tensión: consisten básicamente en resistencia eléctricas, donde la corriente eléctrica genera calor al pasar a través de elementos de resistencias. Estas constan de unos hilos encapsulados y una cubierta metálica aislada eléctricamente y están sumergidas en el agua para generar vapor a presión moderada. Estos tipos de unidades no depende en de la conductividad o resistencia del agua para generar calor (Calderas eléctricas y de aplicaciones especiales, s.f.).
- Las calderas de alta tensión de electrodos separados: controlan la producción regulando la cantidad de agua pulverizada sobre los electrodos que están suspendidos e inmersos en el espacio de vapor. El agua que no se convierte en vapor escurre por los electrodos y cae a un contraelectrodo. Esto crea un segundo camino de la corriente para producción de vapor. El agua restante retoma al depósito (Calderas eléctricas y de aplicaciones especiales, s.f.).

Se elegirán los calentadores consistentes en resistencias eléctricas sumergidas y se considerará un proceso de régimen permanente (es decir, el valor de la temperatura, presión y flujos se mantienen constantes en el tiempo con excepción de pequeñas fluctuaciones), continuo (es decir, las entradas y salidas de fluido fluyen continuamente sin interrupción a lo largo del proceso) y semi intermitente para el cálculo y diseño de la caldera.

La estructura y componentes básicos de la caldera de circulación de agua se explican a continuación a través de una simple ilustración (véase figura 17):

CALDERA DE AGUA Y ELECTRODOS

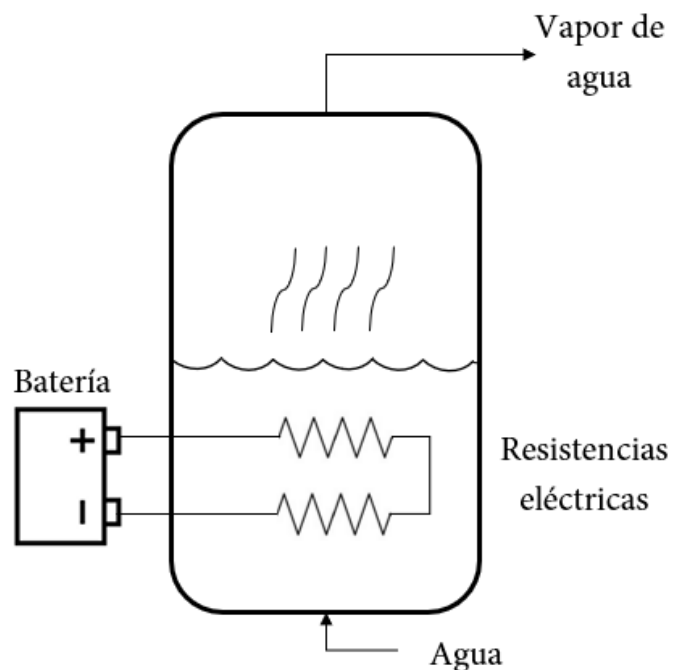


Figura 17: Esquema caldera de agua (Elaboración propia)

Nota: Se ha utilizado el programa "PowerPoint" para la elaboración de la figura.

3.2.2 Cálculos de diseño térmico y mecánico

Cuando el calor dentro de la caldera llegue a su temperatura de ebullición se empezará a evaporar y empezará a fluir por el conducto de escape dirigiéndose al intercambiador de calor. En este proceso el calor generado por las resistencias eléctricas será transferido al agua como calor latente de vaporización y otra se perderá a través de las paredes de la caldera.

La metodología de cálculo se basará en la materia de la transferencia de calor y se regirá por la siguiente ecuación fundamental de la conservación de energía y balance de masa. La masa de la caldera se considerará constante ya que todos los gases de vapor de agua que salen de ella volverán del intercambiador de calor en estado líquido y por tanto no varía el nivel del depósito del agua.

En primer lugar, como ya se ha dicho, la potencia eléctrica que entregan las resistencias eléctricas se define como aquella que captura el agua para evaporarse y aquella que se escapa por las paredes. La potencia eléctrica entregada al agua se define por:

$$P_{H2O} = P_R - P_{perd} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

P_R Potencia eléctrica de resistencias P_{perd} Potencia perdida por paredes
 P_{H2O} Potencia entregada al agua

Entonces, en primer lugar, en lo referente al calor disipado por las paredes, ya que el depósito será un depósito cilíndrico de doble pared, se ha de recurrir al análisis de la transferencia de calor de una pared cilíndrica. La ley de Fourier establece que (sin querer enfatizar en la teoría que explica el desarrollo de las ecuaciones matemáticas se llega a la expresión):

$$P_{per} = \frac{T_i - T_a}{\frac{1}{2 h_i \pi r_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2 \pi k_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2 \pi k_2 L} + \frac{1}{2 h_a \pi r_3 L}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

T_i	Temperatura interior de la caldera	P_{perd}	Potencia perdida por paredes
T_a	Temperatura exterior de la caldera	r_1	Radio interior
h_i	Coficiente de convección del agua*	r_2	Radio exterior de la capa 1
h_a	Coficiente de convección del aire	r_3	Radio exterior del aislante
k_1	Conductividad térmica de la capa 1	L	Altura de la caldera
k_2	Conductividad térmica del aislante		<i>*Para caso de convección forzada</i>

Adicionalmente, se calculará cual es el espesor crítico del aislante se evalúa la derivada de la ecuación frente al radio exterior de la primera capa. Se llegan a la siguiente expresión:

$$r_{2\text{ crít}} = \frac{k_1}{h_i} \tag{Ec. 11}$$

Donde:

$r_{2\text{ crít}}$	Radio crítico de aislante	h_i	Coficiente de convección del agua*
k_1	Conductividad térmica de capa 1		<i>*Para caso de convección forzada</i>

En segundo lugar, se estudia cuanto flujo másico es capaz de evaporar las resistencias (véase Ecuación 12), y cuanta energía adicional se necesita para sobrecalentar el vapor de agua hasta la temperatura deseada (véase Ecuación 13). En este caso, el flujo másico de vapor de agua estará determinado por aquel que necesite el intercambiador de calor (véase figura 23) y se adaptará este valor al número de resistencias y potencia que se necesiten.

$$m_{vapor} = \frac{P_{H2O}}{\lambda_{H2O}} \tag{Ec. 12}$$

$$P_{extra} = (T_f - T_{ev}) m_{vapor} c \tag{Ec. 13}$$

Donde:

λ_{H2O}	Entalpía de vaporización del agua	m_{vapor}	Flujo másico de vapor de agua
P_{H2O}	Potencia entregada al agua	P_{extra}	Potencia adicional
T_f	Tª de vapor sobrecalentado	c	Calor específico del vapor
T_{ev}	Tª de evaporación del agua		

3.2.2.1 Resultados

Teniendo en cuenta las consideraciones y ecuaciones anteriores se procederá a la selección, cálculo y dimensionamiento de los distintos elementos que conforman la caldera.

Dimensionamiento de la caldera y cálculos térmicos			
Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Resistencia del agua	R1	K/W	1.59E-04
Resistencia de primera capa	R2	K/W	1.92E-05
Resistencia de segunda capa	R3	K/W	2.95E+00
Resistencia aire	R4	K/W	1.77E-02
Resistencia total	R	K/W	2.96E+00
Potencia eléctrica disipada por las paredes	Pp	W	2.53E+01
Potencia eléctrica entregada al agua	PH2O	W	1.20E+05
Potencia eléctrica total en agua*	Pt1	W	120000
Potencia eléctrica por resistencia para agua	P1	W	15000
Número de resistencias eléctricas en agua	N1	-	8
Tension de operación	V1	V	400
Intensidad por electrodo	A1	A	37.5
Flujo másico de vapor	ma	kg/s	5.31E-02
Tiempo para calentar agua hasta 373K (toda caldera)	t1	s	328.07
Potencia en subcámara para sobrecalentar vapor hasta 918K	Wvs	W	58153.22
Temperatura aproximada de vapor de agua sobrecalentado	T	K	918
Potencia eléctrica por resistencia en vapor de agua	P2	W	6000
Potencia eléctrica total en vapor de agua*	Pt2	W	30000
Número de resistencias eléctricas en vapor de agua	N2	-	5
Tension de operación	V2	V	400
Intensidad por electrodo	A2	A	15
Radio crítico aislante	e	m	0.26
Calor en función del aislante (con r exterior = 0.4 m)	qe	W	25.3
* existen dos tipos de resistencias. Las enumeradas con un (1) sirven para calentar el agua líquida de la caldera. Las enumeradas con un (2) sirven para sobrecalentar el vapor de agua.			

Figura 18: Hoja de cálculos del diseño y dimensionamiento de la caldera de agua. (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de la tabla.

Para la selección de los electrodos se ha recurrido a aquellos de la marca CETAL. Véase la referencia (CETAL, s.f.). Todas las especificaciones se han adjuntado en la siguiente figura.

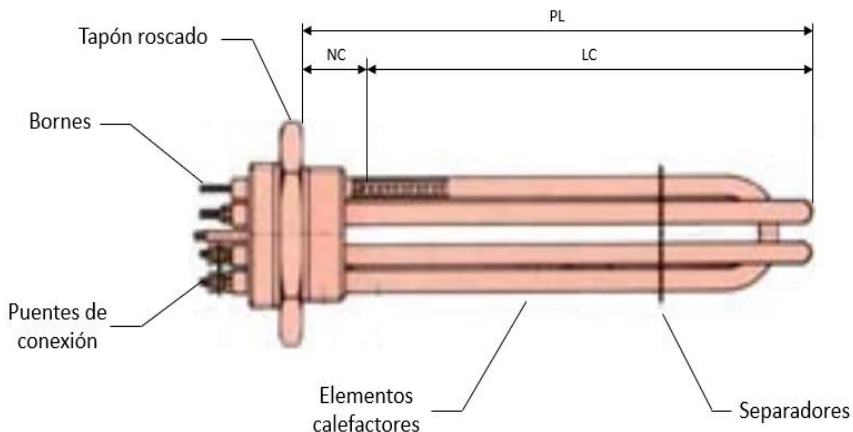
Calentadores de inmersión roscados - CRN TECNOPART, S.A.					
Carga 12 W/cm ² Incoloy 825 - Racor M 77 x 200					
W	PL (mm)	Peso (kg)	Referencia	Características generaes	
6000	265	2.6	77-AA16-060	(1) Formados por 2 o 3 horquillas en cruz soldadas sobre un tapón de latón. (2) De acero o inoxidable. (3) Circuitos a 230V (se incluyen los puentes de conexión). (4) Funda para termostato, opcional. (5) Presión de trabajo máximo: 15 bar.	
9000	350	3	77-AA16-090		
12000	430	3.6	77-AA16-120		
15000	510	4.15	77-AA16-150		
18000	590	4.7	77-AA16-180		
Características constructivas y eléctricas					
24000	760	5.85	77-AA16-240	Diámetros (mm)	8.5 10 13.5 16
30000	930	6.95	77-AA16-300*	Tensión máx. (V)	415 500 750 750
35000	1070	7.4	77-A1A6-350*	Intensidad máx. (A)	14 14 20 60
*Solo voltajes de 400V				Tolerancias potencia > 100 W	5-10 % 5-10 % 5-10 % 5-10 %
Dimensiones					
NC (Longitud zona fría): Racor M 45 o 1 ½" - NC = 40 mm; Racor M77 o 2 ½" - NC = 70 mm.					
LC (PL-NC) (Longitud calentada o útil). Debe estar sumergida.					
La longitud útil o longitud calefactada de un elemento se determina para asegurar un reparto uniforme de calor en el medio a calentar. Se calcula de acuerdo con la formula siguiente: $LC = p/c*s$ donde: LC (cm) = longitud útil; p (W) = potencia nominal; c (W/cm ²) = carga específica (12 para el agua); s (cm) = circunferencia del tubo.					
					

Figura 19: Hoja de especificaciones de las características de los electrodos de la caldera (Elaboración propia).

Nota 1: La imagen del electrodo se ha recuperado de (CETAL, s.f.).

Nota 2: Se ha se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de la tabla.

Todas las especificaciones y selección de electrodos se resumen en el ANEXO G.

3.3 Intercambiador de placas con juntas

Un intercambiador de calor es un equipo utilizado para enfriar un fluido que está más caliente de lo deseado, transfiriendo este calor a otro fluido que está frío y necesita ser calentado o viceversa. La transferencia de calor se realiza a través de una pared metálica o de un tubo que separa ambos fluidos. Las aplicaciones de los intercambiadores de calor son muy variadas y comprender funciones como: realizar la función doble de calentar y enfriar dos fluidos; condensar un vapor o mezcla de vapores; enfriar un fluido por medio de agua; aplicar calor sensible a un fluido; conectado a la base de una torre fraccionadora proporciona el calor de reebulición que se necesita para la destilación; vaporizar parte del líquido (Diseño de equipos e instalaciones, s.f.).

El tipo de intercambiador de calor que se usará para evaporizar el amoníaco es de placas. El intercambiador de calor de placas consta de múltiples placas conductoras de calor que están soldadas o atornilladas entre sí y consisten en cámaras onduladas superpuestas dispuestas en capas. Las sustancias circulan en los espacios entre estas cámaras. La dirección del flujo en forma de contracorriente, cocorriente y flujo cruzado determina la magnitud de la transferencia de energía (Vaillant, s.f.). La transferencia de energía es más alta con el flujo a contracorriente, en el que las dos corrientes fluyen entre sí. La energía térmica se transfiere de la sustancia que emite calor a la sustancia que absorbe el calor (Vaillant, s.f.).

3.3.1 Características

Algunas de las principales razones por las que se ha seleccionado este tipo de intercambiadores para implementarlo en el vehículo son (Laval, Intercambiador de calor de placas con juntas, s.f.).

- El coeficiente de transferencia de calor es más alto, lo que permite que los equipos sean más compactos y con menor tiempo de residencia de los fluidos dentro de él; totalmente contrario al de carcasa y tubos.
- Las unidades tienen un diseño flexible y son fáciles de reparar y mantener.
- Máximo tiempo de funcionamiento menos ensuciamiento, estrés, desgaste o corrosión.

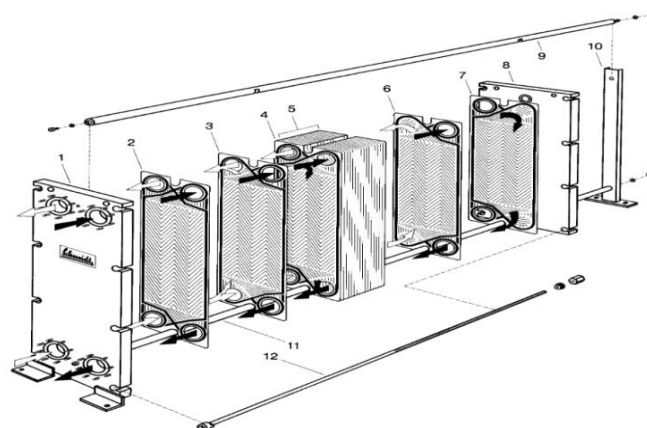
Se ha de recalcar en esta sección que es la empresa “Alfa Laval” quien es puntera en el sector de esta clase de intercambiadores y gran parte de las bases sobre las que se sustenta este apartado se basan en los estudios de este grupo empresarial. Durante casi 90 años, Alfa Laval ha avanzado en el desarrollo de tecnologías de transferencia de calor utilizadas en un amplio espectro de industrias, procesos y aplicaciones (Laval, Calefacción y refrigeración, s.f.).

3.3.2 Componentes

Un intercambiador de placas tiene los principales componentes, además de tuercas, tornillos y demás elementos de unión: placa fija y móvil, bastidor, placas de transferencia de calor y juntas.

- Bastidor: el intercambiador se compone de un bastidor con placa frontal fija, placa de cierre móvil, barras guías superior e inferior y apoyo. Tornillos, tuercas y arandelas de apriete (J. Negre C., s.f.)
- El paquete de placas: consiste en placas corrugadas con un canal perimetral para la colocación de las juntas. El número de placas, así como el tamaño y dimensión, dependen del diseño térmico. Dependiendo de la aplicación, podrían usarse placas de acero inoxidable, de titanio, o materiales exóticos (Haasen, s.f.). Están unidas por las juntas y apretadas por pernos de tornillos de sujeción.
- Juntas: el propósito de esta junta es evitar que se mezclen los fluidos, fuguen hacia el exterior, direccionando los fluidos en sus canales alternos frío y caliente (Haasen, s.f.).

Un esquema ilustrativo se muestra a continuación.



- | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 1 Placón fijo con conexiones | 5 Paquete de placas | 9 Eje superior |
| 2 Placa inicial (con junta final) | 6 Placa cambio flujo izquierdo | 10 Soporte |
| 3 Placa de flujo izquierdo | 7 Placa cambio flujo derecho | 11 Eje inferior |
| 4 Placa de flujo derecho | 8 Placón móvil | 12 Tornillos de apriete |

Figura 20: Esquema de un intercambiador de placas con juntas (Schmidt-Bretten, s.f.)

3.3.3 Diseño térmico y mecánico

Para entender mejor el funcionamiento del intercambiador se expondrán a continuación algunas de las variables que describen las lacas corrugadas en V (véase figura X). Como ya hemos mencionado anteriormente, en la actualidad es la empresa Alfa Laval la puntera en este tipo de intercambiadores y trabaja un ángulo de 60° para la placa tipo L (la cual permite que las caídas de presión bajas), y para las placas tipo H con un ángulo de 45° (las cuales mejoran la transferencia de calor), que es la que se ha seleccionado en este proyecto (véase figura 21)

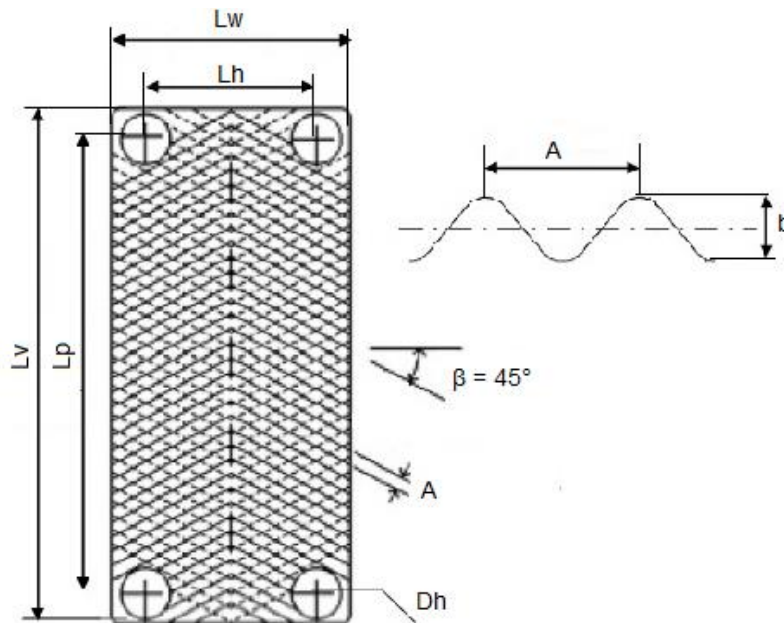


Figura 21: Representación de los parámetros de una de las placas del intercambiador (Angel, Burgos, Hidalgo, Yeison, & Raygmare, s.f.).

El diseño térmico del intercambiador de calor se ha realizado con lo dispuesto en el trabajo realizado por Sadik Kakac, Hongtan Liu y Anchasa Pramuanjaroenkij en "Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design" (Kakac, Liu, & Pramuanjaroenkij, Selection, Rating and Thermal Design).

Todas las fórmulas, reglas de diseño y variables expuestas en las siguientes ecuaciones han sido seleccionadas con arreglo a los estudios realizados en el libro anteriormente mencionado (véase ecuaciones 14 – 39).

$$Q = \dot{m}_{H_2O} c_{H_2O} (T_{f_{H_2O}} - T_{i_{H_2O}}) \quad \text{Ec. 14}$$

$$T_{med_{H_2O}} = \frac{T_{f_{H_2O}} - T_{i_{H_2O}}}{2} \quad \text{Ec. 15}$$

$$T_{med_{NH_3}} = \frac{T_{f_{NH_3}} - T_{i_{NH_3}}}{2} \quad \text{Ec. 16}$$

$$T_m = \frac{(T_{i_{H_2O}} - T_{f_{NH_3}}) - (T_{f_{H_2O}} - T_{i_{NH_3}})}{\ln\left(\frac{T_{i_{H_2O}} - T_{f_{NH_3}}}{T_{f_{H_2O}} - T_{i_{NH_3}}}\right)} \quad \text{Ec. 17}$$

$$N_e = N_t - 2 \quad \text{Ec. 18}$$

$$p = b + t \quad \text{Ec. 19}$$

$$L_w = L_h + D_p \quad \text{Ec. 20}$$

$$A_x = b L_w \quad \text{Ec. 21}$$

$$L_p = L_v + D_p \quad \text{Ec. 22}$$

$$A = \frac{A_e}{N_e} \quad \text{Ec. 23}$$

$$A_p = L_w L_p \quad \text{Ec. 24}$$

$$D_h = b F_i \quad \text{Ec. 25}$$

$$N_y = \frac{N - 1}{2} \quad \text{Ec. 26}$$

$$\dot{m}_{H_2O_c} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{N_y} \quad \text{Ec. 27}$$

$$\dot{m}_{NH_3_c} = \frac{\dot{m}_{NH_3}}{N_y} \quad \text{Ec. 28}$$

$$V_{H_2O_c} = \frac{\dot{m}_{H_2O_c}}{A_x} \quad \text{Ec. 29}$$

$$V_{NH_3_c} = \frac{\dot{m}_{NH_3_c}}{A_x} \quad \text{Ec. 30}$$

Ec. 30

$$Re_{H_2O} = \frac{V_{H_2O_c} D_h}{\mu_{H_2O}} \quad \text{Ec. 32}$$

$$Re_{NH_3} = \frac{V_{NH_3_c} D_h}{\mu_{NH_3}} \quad \text{Ec. 33}$$

$$Nu_{H_2O} = 0,3 Re_{H_2O}^{0,663} Pr_{H_2O}^{1/3} \quad \text{Ec. 34}$$

$$Nu_{NH_3} = 0,3 Re_{NH_3}^{0,663} Pr_{NH_3}^{1/3} \quad \text{Ec. 35}$$

$$h_{H_2O} = Nu_{H_2O} \frac{K_{H_2O}}{D_h} \quad \text{Ec. 36}$$

$$h_{NH_3} = Nu_{NH_3} \frac{K_{NH_3}}{D_h} \quad \text{Ec. 37}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{H_2O}} + \frac{1}{h_{NH_3}} + \frac{t}{K}} \quad \text{Ec. 38}$$

$$L_c = N p \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

Q	Calor transferido entre fluidos	$T_{f_{H2O}}$	Tª final del vapor
\dot{m}_{H2O}	Flujo másico de vapor	$T_{i_{H2O}}$	Tª inicial del vapor
c_{H2O}	Capacidad calorífica específica del vapor	$T_{med_{H2O}}$	Tª media de vapor
c_{NH3}	Capacidad calorífica específica del amoniaco	$T_{f_{NH3}}$	Tª final del amoniaco
N_e	Número efectivo de placas	$T_{i_{NH3}}$	Tª inicial del amoniaco
N_t	Número total de placas	$T_{med_{NH3}}$	Tª media de amoniaco
p	Paso de placa	L_h	Distancia horizontal entre dos puertos
b	Paso medio de canal	D_p	Diámetro del puerto
t	Espesor de placa	L_v	Longitud efectiva entre puertos
A_x	Área de flujo de un canal	L_p	Alto efectivo de la placa
L_w	Ancho efectivo de placa	A_e	Área efectiva de una placa
A	Área efectiva de una placa	A_p	Área proyectada de placa
D_h	Diámetro hidráulico	N_y	Número de canales por paso
F_i	Factor de ampliación	\dot{m}_{H2Oc}	Flujo másico por cada canal de vapor
V_{H2Oc}	Velocidad de masa por área de vapor	\dot{m}_{NH3c}	Flujo másico por cada canal de amoniaco
V_{NH3c}	Velocidad de masa por área de amoniaco	Re_{H2O}	Reynolds del vapor
μ_{H2O}	Viscosidad dinámica del vapor	Re_{NH3}	Reynolds del amoniaco
μ_{NH3}	Viscosidad dinámica del amoniaco	Nu_{H2O}	Nusselt del vapor
U	Coficiente global de transferencia de calor	Nu_{NH3}	Nusselt del amoniaco
L_v	Longitud placas comprimidas	Pr_{H2O}	Prant del vapor
h_{H2O}	Coficiente de transferencia por convección H2O	Pr_{NH3}	Prant del amoniaco
h_{NH3}	Coficiente de transferencia de calor por convección NH3	K_{NH3}	Conductividad térmica NH3
K_{H2O}	Conductividad térmica H2O	K	Conductividad térmica Acero Inoxidable
Tm	Temperatura media logarítmica		

3.3.4 Resultados

Diseño Intercambiador de placas con juntas							
A elección				Propiedades de los fluidos y materiales			
Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor	Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
T. inicial H2O	T0h2O	K	298	Capacidad calorífica específica H2O	cpx	J/(K*kg)	4.184
T. final H2O	Tfh2O	K	918	Capacidad calorífica específica NH3	cpy	J/(K*kg)	4.700
T. inicial NH3	T0nh3	K	278	Densidad H2O	rhox	kg/m^3	985.2
T. final NH3	Tfhn3	K	800	Densidad NH3 liquido	rhoy	kg/m^3	639.8
Flujo másico NH3	mnh3	kg/s	0.0205	Viscosidad dinámica H2O	etax	N*s/m^2	0.001
Número total de placas	N	-	50	Viscosidad dinámica NH3	etay	N*s/m^2	1.963E-06
Área efectiva total	Ae	m^2	1.5	Conductividad térmica H2O	Kx	J/(s*K*m)	0.647
Longitud efectiva entre puertos	Lv	m	0.4	Conductividad térmica NH3	Ky	J/(s*K*m)	0.487
Paso medio de canal	b	m	2.40E-03	Conductividad térmica Acero	K	J/(s*K*m)	0
Espesor de la placa	t	m	5.00E-04	Datos según teoría			
Distancia horizontal entre dos puertos	Lh	m	6.00E-02	Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Diámetro del puerto	Dp	m	4.00E-02	Contante Kp	Kp	-	1.441
Factor de ampliación	Fi	-	1.2	Constante m	m	-	0.206
				Prant H2O	Prx	-	3.68
				Prant NH3	Pry	-	2.05

Figura 22: Hoja de de parámetros de diseño del intercambiador de placas (Elaboración propia).

Nota: se ha utilizado el rograma “Excel.exe” para la elaboración de la hoja

Cálculos del intercambiador			
Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Calor trasferido entre fluidos	Q	W	72059.35
Temperatura media H2O	Tmh20	K	608
Temperatura media NH3	Tmnh3	K	539
Temperatura media logarítmica	Tm	K - °C	55.21
Flujo másico NH3	mnh3	kg/s	2.94E-02
Flujo másico H2O	mh2o	kg/s	5.78E-02
Número efectivo de placas	Ne	-	38
Paso de placa	p	m	2.80E-03
Área de flujo de un canal	Ax	m ²	2.28E-04
Ancho efectivo de la placa	Lw	m	9.50E-02
Alto efectivo de placa	Lp	m	3.65E-01
Área de transferencia de una placa	A	m ²	5.26E-02
Área proyectada de una placa	Ap	m ²	3.47E-02
Diámetro hidráulico	Dh	m	4.00E-03
Número de canales por paso	Ny	-	19.5
Número de pasos para cada H2O	nx	-	1
Flujo masico por cada canal H2O	mh2oc	kg/s	2.97E-03
Flujo masico por cada canal NH3	mh2oc	kg/s	1.51E-03
Velocidad de masa por área (canal) H2O	vh2o	kg/(s*m ²)	13.006
Velocidad de masa por área (canal) Nh3	vnh3	kg/(s*m ²)	6.606
Reynolds H2O	Reh2o	-	92.650
Reynolds NH3	R3nh3	-	13461.461
Nusselt H2O	Nuh2o	-	9.327
Nusselt NH3	Nunh3	-	208.270
Coeficiente de transferencia por convección H2O	hh2o	J/(s*K*m ²)	1507.519
Coeficiente de conducción de calor por convección NH3	hnh3	J/(s*K*m ²)	25356.908
Coeficiente global de transferencia de calor	U	J/(s*K*m ²)	1375.476
Cálculos par caidas de presiones			
Caida de presión por fricción H2O	Pch2o	N/m ²	19.466
Caida de presión por fricción NH3	Pcnh3	N/m ²	2.773
f H2O	fh2o	-	0.567
f NH3	fnh3	-	0.203
Caida de presión por fricción H2O	Pch2o	N/m ²	19.466
Caida de presión por fricción NH3	Pcnh3	N/m ²	2.773
Caida de presión en conducto H2O	Pph2o	N/m ²	2.566
Caida de presión en conductoNH3	Ppnh3	N/m ²	1.020
Velocidad de masa por área puerto H2O	vph20	kg/(s*m ²)	60.100
Velocidad de masa por área puerto NH3	vpnh3	kg/(s*m ²)	30.528
Caida de presión total H2O	Pth20	N/m ²	22.032
Caida de presión total NH3	Ptnh3	N/m ²	3.793
Potencia máxima de intercambiador	Qmax	W	74383.841
Efectividad	ε	%	96.88%

Figura 23: Hoja de cálculos del intercambiador de calor (Elaboración propia).

Nota: se ha utilizado el rograma "Excel.exe" para la elaboración de la hoja

A continuación, se muestra la simulación con los datos recogidos (véase figura 24).

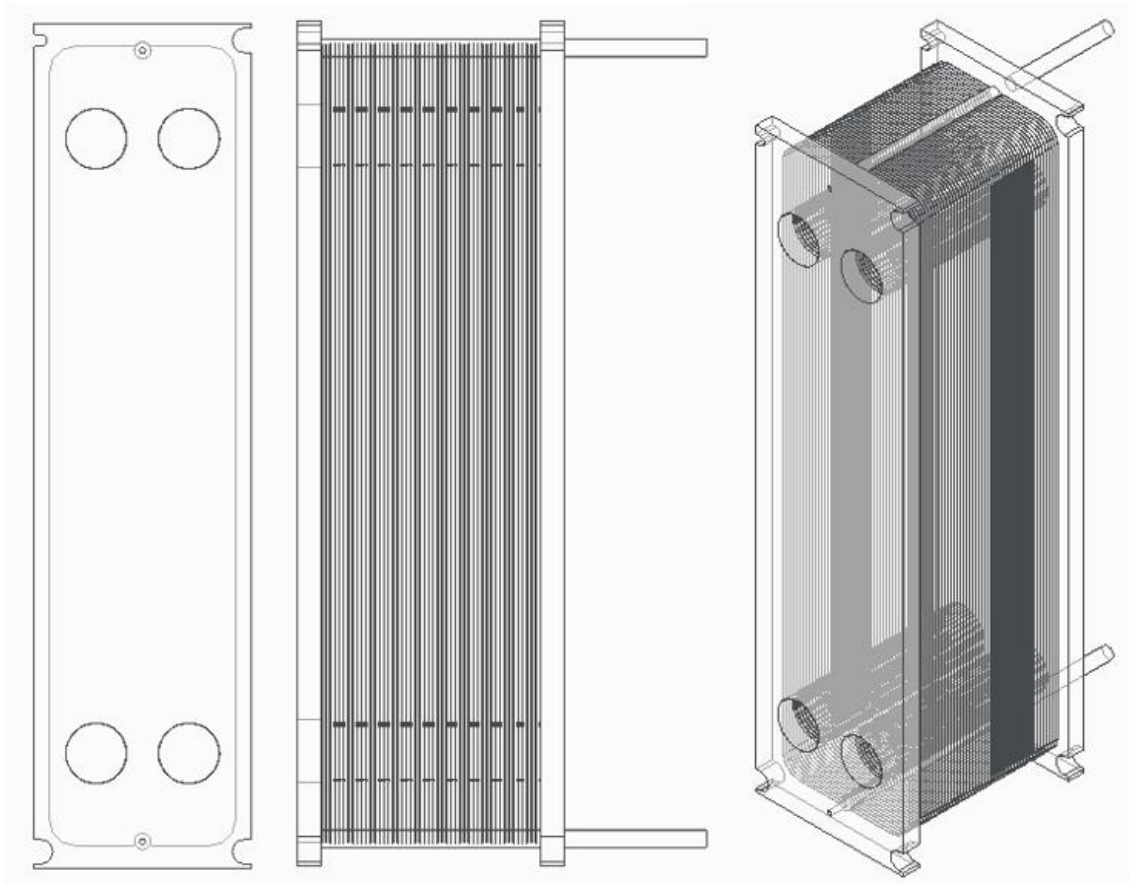


Figura 24: Diseño final del intercambiador de calor (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "SolidEdge" para la elaboración de las figuras

3.4 Separador gas – líquido de amoniaco

En una primera suposición, se podría afirmar que no todo el amoniaco se evapora. Por tanto, se debería añadir un compartimento donde se separe el gas amoniaco de las pocas gotas o partículas líquidas que puedan llegar a quedar al final del intercambiador. Este último se denominada separador gas – líquido. Será del tipo bifásico, es decir que separa líquidos y gases.

El colector de gas y separador de líquido se basa en tres principios fundamentales:

- Separación por gravedad: conlleva funciones como la reducción del contenido de líquido no removido por la facilidad de entrada; mejora/enderozamiento del perfil de velocidad del gas (M. Campbell, 2015).
- Momento lineal: cantidad de movimiento que lleva cada fluido, de manera que a la hora de entrar en el separador cada uno sufrirá un cambio violento de dirección.
- Coalescencia: es el fenómeno por medio del cual partículas líquidas de tamaño pequeño se unen entre sí para formar partículas de mayor tamaño (Omaña Pérez , Katrib, & Torres Rodríguez, 2005).

3.4.1 Partes

Un separador de este tipo tiene como función asegurar que el líquido fluye hacia abajo a la sección de recolección de líquidos en el recipiente y el gas hacia la zona de recogida del gas. Cuando el sensor de nivel percibe el líquido entonces activa una válvula donde se empieza a descargar todo el líquido.

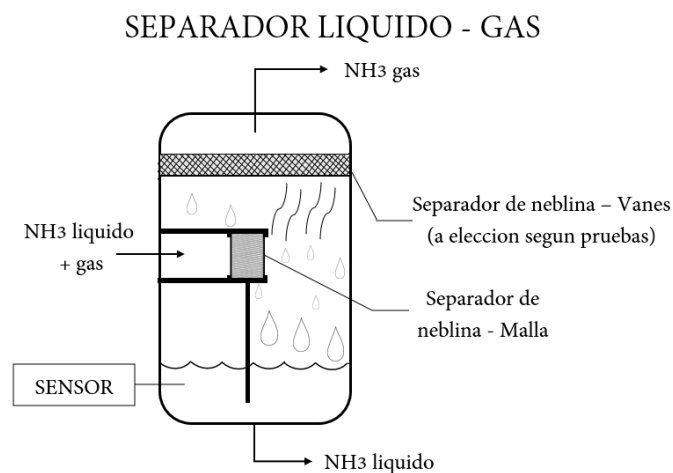


Figura 25: Esquema del separador líquido - gas (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "PowerPoint" para la elaboración de la figura

Cuenta de las siguientes partes mostradas en la figura:

- Sección de cambio de momento lineal: se pueden aprovechar diseños mecánicos a modos de deflectores para aprovechar la mayor separación inicial posible.
- Sección de asentamiento: cómo se puede apreciar en la figura X las gotas de amoniaco por efecto de la gravedad van cayendo al fondo del depósito.
- Sección de coalescencia: cómo se puede apreciar en la figura X las gotas se unen por colisiones formando estructuras de mayor tamaño y peso y en consecución caerán por efecto de la gravedad.
- Extractores de neblina: el extractor de neblina es el último elemento de “separación” (limpieza) instalado en el separador convencional. Los diseños más comunes de estos elementos son los de tipo de malla (fibras metálicas), y las de rejillas, seguidas por los de diseño de ciclones axiales depuradores. El mecanismo principal de separación es pinzamiento del líquido dentro/sobre las fibras, seguido por una coalescencia de las gotas de suficiente tamaño para desprenderse de las fibras de la malla. Adicionalmente, caben destacar los separadores de neblina tipo van, donde a medida que el gas pasa por las placas corrugada, al impactar en las superficies de los vanes, las partículas líquidas se unen al viajar a lo largo de estas superficies hacia las cavidades de los vanes. El gas limpio y seco sale por la salida del separador de vanes. Este elemento será implementado en caso necesario (se requieren pruebas en laboratorio) (WRG, s.f.).
- Sensor de nivel: permitirá evacuar el amoniaco líquido hacia el canal principal anterior al intercambiador, liberando de esta manera el separador del líquido.

A modo de ilustración obtenemos la siguiente imagen:



Figura 26: Imagen de una malla de la marca BOPP (BOPP, s.f.).

3.4.2 Diseño de la malla

El diseño consistirá fundamentalmente en seleccionar el tipo de malla para el extractor de neblinas.

Separador líquido - gas												
Materiales Malla y Vanes												
Tipos	Características											
	Efecto de separación	Baja pérdida de presión	Altos caudales	Estabilidad	Porosidad	Soldadura de punto	Soldadura por costura	Estampado	Recocado	Radio de doblaje	Plisado	
Único filtro de capa	Tejido holandés sarga	C	E	E	D	F	C	C	C	C	C	C
	Tejido holandés liso	C	D	C	C	E	C	C	C	C	C	C
	Betamesh	C	C	B	E	C	C	C	C	C	C	C
	Betamesh R	D	C	B	E	C	C	C	C	C	D	E
	Robusta	D	D	C	C	E	C	C	C	C	D	E
	Dúplex	C	D	D	C	E	C	C	C	C	C	D
	Malla de tejido cuadrado	E	A	A	F	C	C	C	C	C	A	B
Multicapa laminados	Poremet	C	F	F	A	F	C	-	-	-	E	F
	Absolta	C	E	E	B	E	C	-	-	-	F	F
	Malla superior 2	C	D	D	C	D	C	-	-	-	D	C
	Malla superior 3	C	D	D	C	D	C	-	-	-	E	D
	Poreflo	C	F	F	B	F	C	-	-	-	D	E

Figura 27: Tabla de los distintos materiales posibles de la malla (Elaboración propia)

Nota1: la información se ha recogido de (BOPP, s.f.)

Nota 2: se ha utilizado el programa “Excel.exe” para la elaboración de esta tabla

Tipos de mallas											
	Tamaño geométrico del poro	Descripción de malla	Urdimbre / Trama	Número de poros	AsK	AsS	Porosidad	A0rel	Peso/ unidad de area	Espesor	Relación de caudal específico
Unidades	µm	mmxmm	N/cm	Nporos/cm²	mm2/cm	mm2/cm	%	%	kg/m2	mm	Eu
Tejido holandés sarga	6	510 x 3600	40 / 100	142000	0.1	0.25	35	5	0.28	0.05	5033
	8	450 x 2750	35 / 140	94000	0.09	0.33	33	4	0.35	0.06	4959
	8	375 x 2300	60 / 160	63000	0.12	0.42	33	4	0.46	0.08	4766
	10	350 x 2600	55 / 148	72800	0.11	0.39	38	6	0.39	0.08	3064
	10	325 x 2300	65 / 160	54000	0.15	0.42	34	4	0.46	0.08	3196
	14	200 x 1400	140 / 230	21000	0.3	0.67	33	4	0.81	0.15	2505
	18	200 x 2000	65 / 180	32000	0.15	0.48	42	8	0.5	0.11	1193
	21	165 x 1100	130 / 230	14520	0.25	0.69	36	5	0.81	0.16	1472
	21	165 x 1400	130 / 230	17000	0.25	0.67	37	6	0.76	0.15	1320
	46	80 x 700	130 / 480	4500	0.25	1.25	38	7	1.18	0.25	523
	88	40 x 560	200 / 600	1700	0.4	1.67	44	11	1.72	0.38	208
	121	30 x 360	280 / 900	840	0.58	2.5	42	9	2.49	0.55	181
	166	20 x 250	180 / 1300	380	0.39	3.67	39	6	3.34	0.69	168
	30*	+165 x 800	130 / 270	10200	0.25	0.67	46	8	0.74	0.17	532
30*	+200 x 600	110 / 150	9300	0.22	0.38	59	9	0.48	0.15	237	
Tejido holandés liso	45	80 x 400	200 / 210	9400	0.39	0.59	62	19	0.82	0.26	245
	45	80 x 300	210 / 255	7440	0.42	0.75	62	20	0.92	0.31	209
	72	50 x 250	150 / 320	3700	0.3	0.94	65	16	1.03	0.36	103
	91	40 x 200	210 / 400	2400	0.4	1.17	65	15	1.3	0.46	86
	120	30 x 150	260 / 520	1400	0.49	1.5	65	16	1.61	0.59	59
	153	24 x 110	500 / 720	770	0.96	2.17	63	13	2.64	0.88	68
	162	20 x 150	200 / 500	930	0.39	1.5	68	27	1.53	0.61	39
	256	14 x 88	550 / 900	370	1.08	2.67	66	23	3.13	1.14	37
	301	12 x 64	650 / 1200	240	1.34	3.51	65	22	3.9	1.44	29
	306	8 x 85	150 / 900	210	0.32	2.67	69	28	2.44	1	20
Betamesh	15	Betamesh 15	55 / 70	75300	0.14	0.17	65	22	0.25	0.09	556
	20	Betamesh 20	70 / 90	52200	0.17	0.21	64	27	0.32	0.11	520
	25	Betamesh 25	95 / 100	38000	0.22	0.26	64	31	0.37	0.13	431
	30	Betamesh 30	110 / 110	28200	0.27	0.28	64	33	0.45	0.15	410
	35	Betamesh 35	130 / 120	21200	0.32	0.32	64	33	0.51	0.17	353
	40	Betamesh 40	140 / 140	16300	0.35	0.35	65	34	0.57	0.2	299
	50	Betamesh 50	190 / 190	10900	0.45	0.43	64	35	0.72	0.25	244
	60	Betamesh 60	210 / 230	7400	0.53	0.51	65	34	0.86	0.3	209
	75	Betamesh 75	280 / 240	4600	0.69	0.69	64	34	1.11	0.38	176
	90	Betamesh 90	330 / 320	3200	0.82	0.75	65	33	1.31	0.46	139
Betamesh R	28	Betamesh R 25	75 / 210	29100	0.23	0.62	55	24	0.68	0.19	727
	36	Betamesh R 34	90 / 210	20900	0.29	0.65	56	32	0.75	0.22	553
	43	Betamesh R 48	110 / 180	11200	0.38	0.53	63	35	0.73	0.25	271
	80	Betamesh R 80	180 / 220	3800	0.65	0.79	64	32	1.15	0.42	129
Robusta	17	720 x 150	95 / 205	33500	0.27	0.58	52	14	0.69	0.18	1122
	19	625 x 130	100 / 250	25188	0.34	0.68	50	12	0.82	0.21	1071
	21	600 x 125	100 / 220	23300	0.34	0.6	53	17	0.75	0.2	747
	31	600 x 100	100 / 220	18600	0.33	0.61	57	30	0.75	0.22	517
	40	280 x 70	210 / 330	6100	0.71	0.95	56	23	1.34	0.39	326
	53	175 x 50	400 / 480	2700	1.23	1.39	55	15	2.11	0.6	254
	65	140 x 40	600 / 550	1700	1.55	1.79	55	32	2.8	0.76	221
	83	130 x 35	520 / 600	1400	1.63	1.73	57	17	2.7	0.8	154
	151	108 x 24	600 / 330	804	2.09	0.96	63	24	2.5	0.86	59
	175	86 x 21	690 / 360	560	2.39	1.04	64	22	2.8	1	45
75*	+400 x 125	160 / 135	3900	0.55	0.39	58	16	0.75	0.23	119	
Duplex	19	Duplex 15	60 / 130	39200	0.12	0.27	60	11	0.3	0.1	271
	23	Duplex 20	100 / 180	22300	0.21	0.38	57	9	0.47	0.14	310
	37	Duplex 30	100 / 230	11400	0.2	0.47	60	11	0.56	0.18	157
	55	Duplex 35	240 / 400	3700	0.52	0.94	57	7	1.21	0.35	155
	58	Duplex 45	180 / 350	3700	0.39	0.94	57	10	1.1	0.34	123
	82	Duplex 60	540 / 580	1260	1.16	1.67	52	6	2.34	0.65	130
Malla de tejido cuadrado	112	Duplex 75	570 / 660	870	1.16	1.92	54	7	2.59	0.74	92
	20	020 mm - d 0,020	25 / 25	62500	0.08	0.08	63	25	0.13	0.04	136
	25	025 mm - d 0,025	35 / 35	40000	0.1	0.1	63	25	0.16	0.05	111
	32	032 mm - d 0,025	30 / 30	30779	0.09	0.09	68	32	0.14	0.05	65
	42	042 mm - d 0,036	45 / 45	16437	0.13	0.13	66	29	0.21	0.08	57
	50	050 mm - d 0,040	45 / 45	12346	0.14	0.14	67	31	0.23	0.09	45
	63	063 mm - d 0,040	40 / 40	9426	0.12	0.12	71	37	0.2	0.09	28
	71	071 mm - d 0,050	55 / 55	6830	0.16	0.16	70	34	0.26	0.11	29
	80	080 mm - d 0,050	50 / 50	5917	0.15	0.15	72	38	0.24	0.11	23
100	100 mm - d 0,065	70 / 70	3673	0.2	0.2	71	37	0.33	0.14	20	

Figura 28: Tabla que recoge los distintos tipos de mallas que existen (Elaboración propia).

Nota1: la información se ha recogido de (BOPP, s.f.).

Nota 2: se ha utilizado el programa “Excel.exe” para la elaboración de esta tabla.

La selección de malla y el resumen de sus características se adjuntan ANEXO E de este proyecto.

3.4.3 Diseño del sensor y sistema de realimentación del amoníaco líquido

Este sistema surge como respuesta a la posible no gasificación del amoníaco en el intercambiador de calor. Teóricamente, al amoníaco a 800K debería ser un gas sobrecalentado. Sin embargo, y ante la falta de experimentación en laboratorio, debemos plantear la posibilidad de tener un mecanismo que nos garantice la eliminación de cualquier posibilidad de estado líquido de amoníaco.

Por tanto, y como se ha desarrollado anteriormente en este mismo apartado, existe un separador gas – líquido localizado a la salida del intercambiador. Aún más, este sistema de realimentación de amoníaco líquido simplemente garantiza que ese líquido sobrante sea redirigido al sistema principal para que sea convertido en gas de nuevo.

Su diseño consistirá principalmente de:

- 1) Un sensor de nivel de líquido, que estará conectado a un panel de control, emitirá una señal cuando detecte cierto nivel de líquido (amoníaco) prefijado.
- 2) Cuando el sensor emita la señal, al detectar el nivel del líquido, emite una señal y ésta última es amplificada por los transistores y acciona la bomba hidráulica a través del relé.

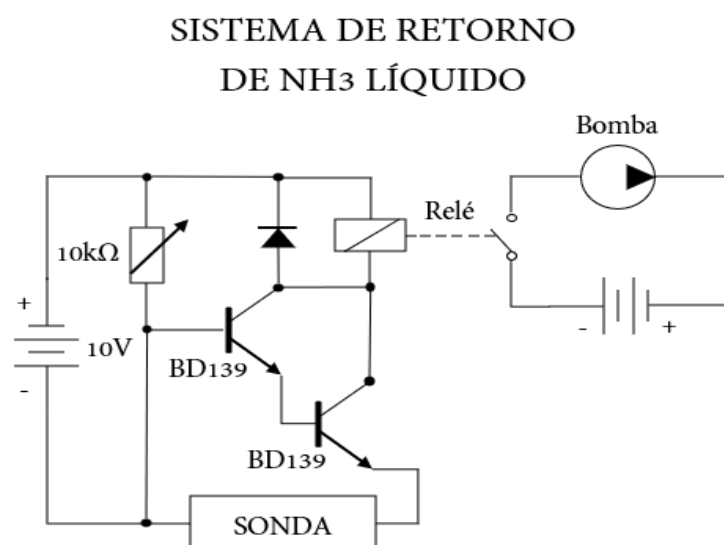


Figura 29: Esquema del sistema de retorno de NH₃ líquido (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "PowerPoint" para la elaboración del esquema

3.5 Proceso y mecanismos de obtención del gas hidrógeno

En esta fase, y siguiendo la correspondencia de la figura X, se analizará el proceso mediante el cual el amoníaco proveniente del depósito se disociará en nitrógeno e hidrógeno con el objetivo de conseguir el hidrógeno para la combustión posterior con el amoníaco y el oxígeno.

3.5.1 Craqueo catalítico del amoníaco

El craqueo o cracking es un proceso químico por el cual se quiebran las moléculas de un compuesto produciendo así compuestos más simple (University, 1999).

El craqueo catalítico es el cual utiliza un catalizador. La catálisis es el proceso por el cual mediante la involucración de una sustancia llamada “catalizador” se aumenta la velocidad de una reacción química. Una de las características más importantes de un catalizador es que su masa no se ve alterada por la reacción química.

3.5.1.1 Características

Las características de un catalizador se pueden agrupar según las siguientes (Wikipedia, Catálisis, s.f.)

- Proporcionan un mecanismo que involucra un estado de transición diferente y una menor energía de activación: más colisiones moleculares tienen la energía necesaria para alcanzar el estado de transición.
- Los catalizadores no cambian el rendimiento de una reacción.
- Los materiales típicos de los catalizadores: los ácidos polipróticos (para muchas reacciones que involucran agua, incluyendo la hidrólisis y su inversa); los sólidos multifuncionales (zeolitas, la alúmina y ciertas formas de carbono gráfico); los metales de transición (para catalizar reacciones redox como la oxigenación o hidrogenación) como el Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cr, W, Ag o Cu, ya que disponen de orbitales “d” parcialmente ocupados que pueden participar en la formación de enlaces de la especie quimiadsorbida.; metales del grupo del platino (procesos catalíticos que involucran hidrógeno) como Rh, Pd y Pt; óxidos aislantes como el Al₂O₃ o SiO₂; óxidos metálicos semiconductores como el NiO, ZnO, V₂O₅, Fe₂O₃ o MgO (Catálisis heterogénea y cinética electroquímica, 2020).

3.5.1.2 Proceso

Las etapas que se siguen en este proceso son las siguientes:

- 1) Contacto de las moléculas de NH₃ con la superficie del sólido catalizador.
- 2) Adsorción química del amoniaco, ya que es la única sustancia reactiva.
- 3) Reacción química entre el NH₃ gaseoso y el catalizador.
- 4) Desprendimiento de los productos N₂ y H₂ gaseoso.

El tipo de catálisis que se usará en la fase de descomposición del amoniaco será un catalizador heterogéneo. Un catalizador heterogéneo es aquel en el cual la reacción se produce en una región interfacial. En esta catálisis el fenómeno catalítico está relacionado con las propiedades químicas de la superficie del catalizador (Catálisis heterogénea y cinética electródica, 2020). La mayoría de los catalizadores heterogéneos son sólidos que actúan sobre sustratos en una mezcla de reacción líquida o gaseosa. El área superficial total del sólido tiene un efecto importante en la velocidad de reacción, donde cuanto menor sea el tamaño de partícula del catalizador, mayor es el área superficial para una masa dada de partículas. (Wikipedia, Catálisis, s.f.).

3.5.1.3 Reacciones y diseño

Hoja de cálculos del craqueo de amoniaco						
Número de átomos de Nitrógeno (x), Hidrógeno (y) y Oxígeno (z) de los reactivos			Características del hidrógeno			
Amoniaco			(1) Gas incoloro, inodoro, insípido. (2) Altamente flamable. (3) Se quema en el aire formando una llama azul pálido casi invisible. (4) Es el más ligero de los gases conocidos en función a su bajo peso específico con relación al aire. (5) Propenso a fugas debido a su baja viscosidad y a su bajo peso molecular.			
X1	Y1	Z1				
1	3	0				
Valores de los coeficientes a, b, c, d						
a	b	c				
2	1	3				
Ecuación química de la reacción (redox): reactivos (α) y productos (β)						
2	NH ₃	→	1	N ₂	+	3 H ₂
Propiedades del hidrógeno						
Nombre	Hidrógeno		Masa molar (g/mol)	2.016		
Fórmula química	H ₂		Densidad energética (MJ/l)	3.8		
Punto de ebullición (°C) a 1bar	-252.87		Poder calorífico inferior (MJ/kg)	120		
Punto de fusión (°C)	-259.34		Octanaje (RON)	-		
Densidad en líq. (kg/m ³) a -253°C y 1bar	70.79		Densidad en gas (kg/m ³) a 20°C y 1atm	0.08		
Presión crítica (atm)	12,98		Temperatura crítica (°C)	-239.92		
Catalizador						
Composición de reactivos (%)	N ₂ : 25; H ₂ : 75		(1) Se puede optar por cualquiera de los materiales mencionados aunque este campo sería estudio del			
Materiales (opciones)	Fe; Pd; Pt;Ni					

Figura 30: Hoja de cálculo de las reacciones y catalizadores involucrados en el crack del amoniaco (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de la hoja

3.6 Adsorción por oscilación de presión (PSA)

Una vez la combinación de gases hidrógeno-nitrógeno ha salido del catalizador se han de separar ambos gases, ya que el nitrógeno se dirigirá directamente a la última fase del sistema sin pasar por el motor. El método que se empleará en este proyecto es el método de separación de gases denominado “adsorción por oscilación de presión”.

La adsorción por cambio de presión (PSA) es una tecnología utilizada para separar algunas especies de gas de una mezcla bajo presión de acuerdo con las características moleculares de la especie y la afinidad por un material adsorbente (Adsorción por oscilación de presión, s.f.).

El proceso de adsorción se basa en la unión de las moléculas de gas a un material adsorbente. El lecho de adsorbente se selecciona especialmente en función del gas a absorber. Lo ideal es que solo se adsorba el gas que se va a separar, mientras que todos los demás pasen por el lecho de adsorción sin quedar atrapados. La pureza del gas adsorbido depende del adsorbente utilizado, la temperatura y la presión (Samson, s.f.). La separación con sólidos porosos se produce por tres posibles mecanismos: exclusión molecular (filtración a nivel molecular), efecto cinético (adsorción de un compuesto de una mezcla gracias a que difunde a mayor velocidad que los otros compuestos a través de los poros del sólido adsorbente) o por equilibrio (se rige por la isoterma de adsorción de cada compuesto para el sólido que se esté empleando) (Brea Prieto, 2018).

Por tanto, se puede afirmar que la capacidad de absorción queda determinada en función de la presión del adsorbato y la temperatura. Para las tecnologías PSA es la variable de operación “presión” la que se maneja para modificar la adsorción del lecho. Es de mencionar que existe otro tipo de adsorción denominada “adsorción por cambio de temperatura” (TSA) donde es la temperatura la variable operativa que se maneja.

El proceso de adsorción por oscilación de presión se divide en cuatro etapas que suceden en ciclos (Brea Prieto, 2018).

- Fase 1 - Adsorción: tiene lugar a alta presión (presurización) de hasta 40 bares. La mezcla de gases pasa por un lecho de adsorbente que atrapa las moléculas de gas fácilmente absorbibles, mientras que las que no lo son pasan a través del lecho, que dejará de absorber cuando alcance su capacidad máxima.
- Fase 2 – Despresurización: a medida que la presión desciende, las moléculas de gas del lecho adsorbente se liberan y el gas del lecho se descarga del depósito de adsorción.

- Fase 3 – Purga: el lecho adsorbente se purga con el gas del lecho para regenerarlo completamente. Se puede hacer circulando una corriente de refinado en contracorriente.
- Fase 4 - Represurización: la represurización se hace con la mezcla de gases o con el gas del lecho hasta que se restablecen las condiciones del proceso de adsorción.

SEPARADOR GAS - GAS

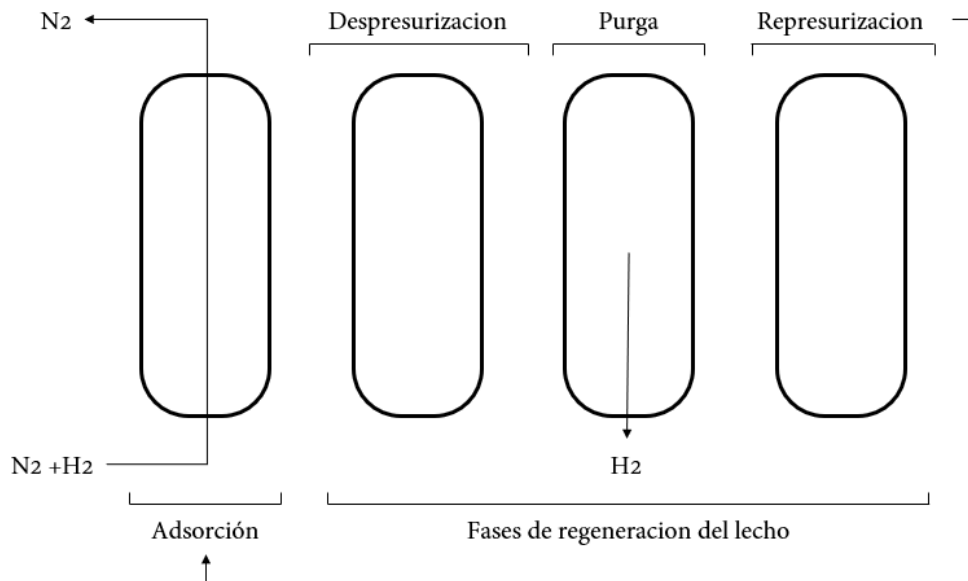


Figura 31: Esquema del sistema de separación de N_2 y H_2 (Elaboración propia).

Nota: se ha utilizado el programa "PowerPoint" para la elaboración de este esquema.

La interacción que resulta entre el lecho de adsorbente y el gas depende de las propiedades de ambos. Respecto al adsorbato, influye el momento dipolar, el tamaño molecular o la configuración espacial de la molécula, y respecto al adsorbente influye la cantidad y distribución de la porosidad y la heterogeneidad de los centros de adsorción. Por tanto, tal y como se representa en la figura 31, se considerará por tamaño molecular que es el hidrógeno el que queda absorbido en el lecho.

Desde el punto de vista que concierne a este proyecto, se trata de separar el hidrógeno del nitrógeno. Como ya se ha descrito en el proceso PSA, se han de seleccionar los materiales a usar en el lecho adsorbente en función de la mezcla que llegue a éste.

3.7 Mezcladores del gas hidrógeno y amoníaco

3.7.1 Mezclador estático

Un mezclador estático o mezclador inmóvil es un dispositivo insertado en una carcasa o tubería con el objetivo de manipular corrientes de fluidos para dividir, agitar o formar capas a medida que pasan por el mezclador. Por lo tanto, los mezcladores se utilizan no solo para requisitos de mezcla estrictos, sino también para reacciones. Hay diferentes diseños disponibles, que normalmente consisten en placas o deflectores posicionado en ángulos precisos para dirigir el flujo, aumentar la turbulencia y lograr mezclando (KLM, 2014).

Los tipos de mezcladores estáticos más comercializados hoy en día son: mezclador general K (incluye los diseños KMS, KMX, HEV); mezclador general G (incluye los diseños SMV, SMX, SMXL, SMR, KVM, KHT, SMF, KFBE); mezclador general M; mezclador general R (incluye los diseños ISG, LPD, LLPD).

Como se puede observar en la tabla anterior, el mezclador general G – KMS da las características más favorecidas para que se dé una mezcla total. A continuación, se han diseñado dos tipos de mezcladores KMS (Kenics Static Mixers).

A continuación, se muestran dos combinaciones del mezclador tipo KMS realizado con Solidedge a modo de esquematización y un Excel con los parámetros y características que conlleva un mezclador simple de este tipo.

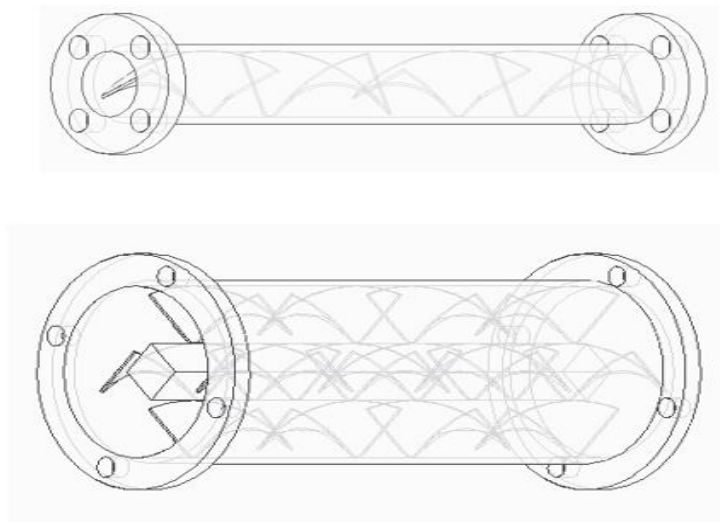


Figura 32: Representación de mezcladores complejos y simples KMS (Elaboración propia)

Nota 1: estos cuerpos se han elaborado utilizando el programa “SolidEdge”.

Nota 2: el mezclador de arriba es un mezclador KMS simple.

Nota 3: el mezclador de abajo es un mezclador KMS complejo de 4 secciones.

3.7.2 Mezclador tipo Venturi

El efecto Venturi consiste en que el fluido en movimiento dentro de un recinto cerrado pasa a un conducto de menor sección lo que provoca un aumento de velocidad y por consiguiente una disminución de presión. En aumento de velocidades grandes, si introducimos un conducto en la sección reducida se produce una depresión que genera la aspiración del fluido de este conducto que se mezcla con el fluido del conducto principal. Se rige por el principio de Bernoulli y el principio de conservación de la masa (S.L, s.f.)

A continuación, se muestra un mezclador tipo Venturi realizado con SolidEdge a modo de esquematización de este tipo de mezcladores.

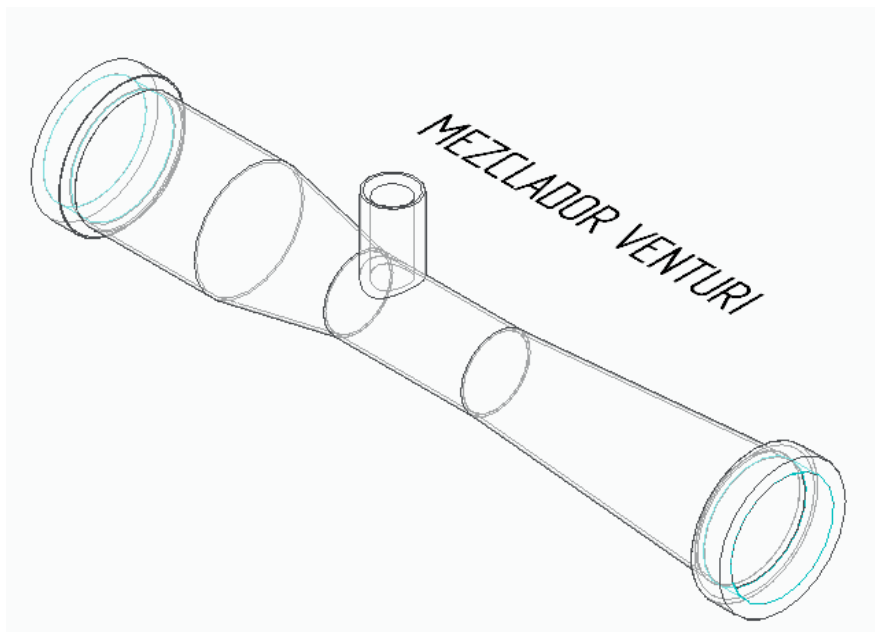


Figura 33: Representación de un mezclador tipo Venturi (Elaboración propia)

Nota 1: este cuerpo se ha elaborado utilizando el programa "SolidEdge".

3.8 Sistema de sobrealimentación

Antes de que el aire se introduzca en el motor debe pasar por un turbocompresor. El turbo es una de las varias opciones para sobrealimentar el motor y conseguir un aumento de potencia sin aumentar el tamaño ni cilindrada de este (DiarioMotor, s.f.)

Un sistema de sobrealimentación es un mecanismo cuya función es comprimir el aire que fluye hacia el cilindro del motor. La principal razón y esencia de funcionamiento es que, cuando el aire se comprime, las moléculas de oxígeno se empiezan a agrupar. Este aumento en el aire significa que se puede agregar más combustible para el mismo tamaño de motor de aspiración natural. Esto luego genera mayor energía mecánica y mejora la eficiencia general del proceso de combustión (Cummins, s.f.).

3.8.1 Turbocompresor

El procedimiento mediante el cual se explica el funcionamiento del turbocompresor es el siguiente: los gases de escape de los cilindros se harán pasar por el turbocompresor, más concretamente por la turbina, y serán expulsados por el área de salida después de haber entrado en contacto con la ya mencionada turbina, la cual va a hacer girar. Debido a que la turbina y compresor por los cuales están formado la turbina están conectados por el mismo eje, el compresor girará a la misma velocidad que la turbina. Consecuentemente, el compresor aspirará el aire atmosférico y o comprimirá. A continuación, el aire comprimido sale por su correspondiente salida hacia el intercooler.

El turbocompresor está compuesto por las siguientes partes, descritas en la figura mostrada a continuación.

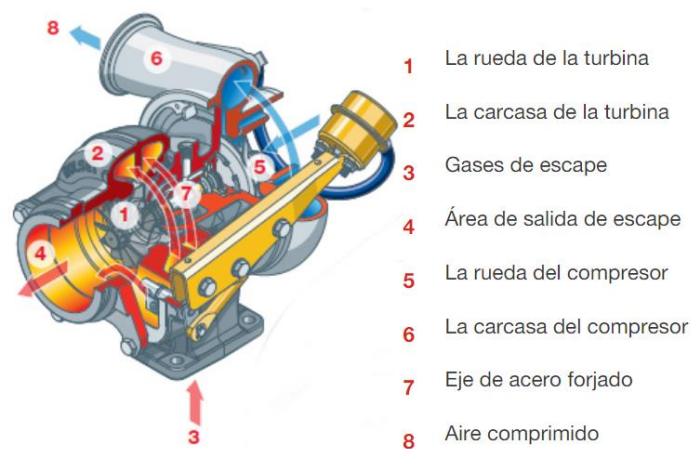


Figura 34: Esquema de un turbocompresor (Cummins, s.f.)

3.8.2 Intercooler

Uno de los mayores problemas del compresor es la temperatura. Como ya se ha explicado anteriormente, cuando el aire se comprime, las moléculas de oxígeno se empiezan a agrupar. Este aumento en el aire significa que se puede agregar más combustible para el mismo tamaño de motor de aspiración natural. El único problema es que el aire que entra a temperatura y presión ambiente se comprime, aumentando en presión y temperatura. Al aumentar la temperatura del aire aumenta su densidad, perdiendo potencia.

En definitiva, el intercooler es un intercambiador de calor, que enfría el aire de admisión que sale del turbo. De esta manera se logra solucionar el problema anteriormente explicado consiguiendo una disminución de temperatura, lo que da lugar a un incremento de la potencia y par del motor (DiarioMotor, s.f.).

El fluido refrigerador más económico y utilizado por los vehículos convencionales es usar el propio aire con el que choca el vehículo en movimiento.

3.8.3 Esquema y diseño

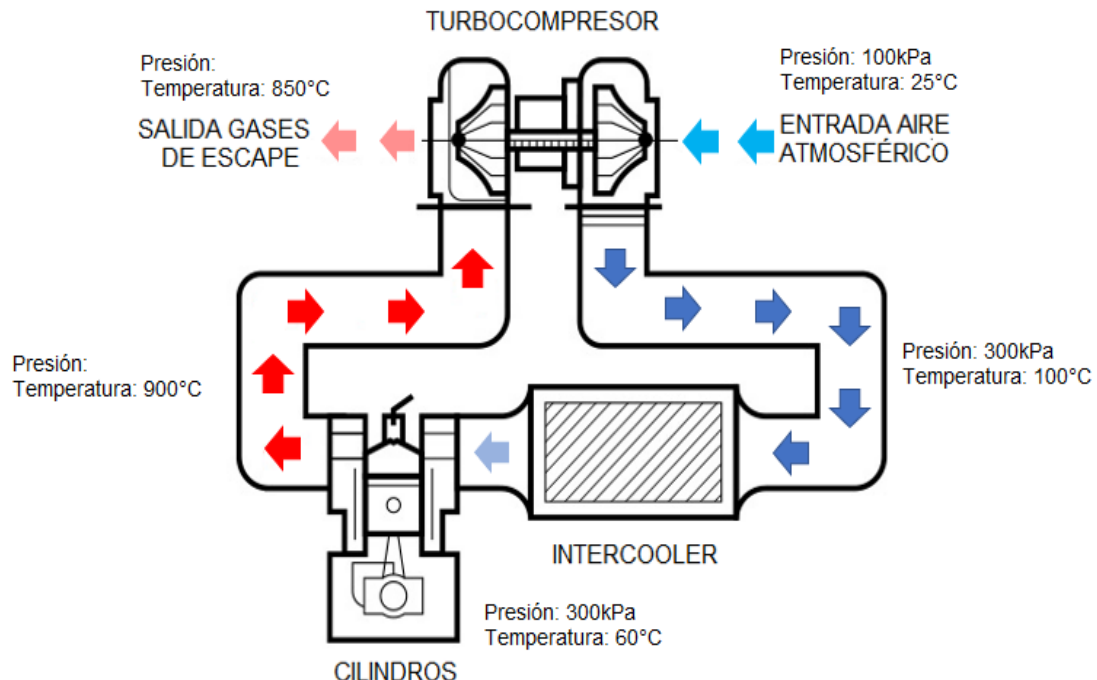


Figura 35: Esquema de sistema Turbocompresor - Intercooler con datos teóricos de gases (Elaboración propia)

Nota: el esquema se ha elaborado utilizando el programa "PowerPoint"

3.9 Motor e inyectores

Para diseñar correctamente esta fase que tiene lugar en el pistón de los cilindros se ha de tener las especificaciones propias de este último, es decir, las relaciones de dimensiones del pistón, reacciones entre el aire y el combustible, la composición de los productos resultantes de la combustión, la relación de compresión, presión media efectiva o la potencia del pistón entre otras (Heano, Romero-Piedrahíta, & Quintero, 2019).

Por tanto, en primer lugar, tras una recopilación de distintos motores de gasolina existentes en el mercado (véase figura 36), se ha seleccionado aquel que tenga una mayor relación de compresión ya que, además de aumentar el rendimiento el motor, ante la escasez de facilidad que tiene el amoniaco para la ignición, ya que tiene un punto de inflamación y de llama muy elevado, es necesario. A continuación, se muestra el vehículo de gasolina con mayor relación de compresión que se ha podido encontrar (véase figura 36).

Especificaciones técnicas motor seleccionado: MAZDA 3 Sedán Origin SKYACTIV-G 2.0	
Características del motor	
Combustible	Gasolina
Potencia máxima (CV/KW)	122/90
Revoluciones potencia máxima (rpm)	6000
Revoluciones par máximo (rpm)	4000
Par máximo (Nm)	213
Número de cilindros	4
Disposición de cilindros	En línea
Diámetro (mm)	83.5
Cilindrada (cm ³)	1998
Carrera (mm)	91.2
Relación de compresión	13:01
Válvulas por cilindro	4
Consumo (L/100km)	5.4
Tipo de inyección	Directa

Figura 36: Hoja de especificaciones del motor seleccionado (Elaboración propia)

Nora: los datos han sido recogidos de una base de datos de la compañía “km77” (KM77, s.f.).

Adicionalmente, y necesario para los cálculos, es de mencionar que el vehículo tiene una inyección directa, es decir, que el combustible será inyectado directamente en la cámara de los cilindros sin que ocupe espacio. Aunque no se sabe si es inyección directa a través de inyectores, en este proyecto se requiere de la inyección por medio de inyectores electrónicos.

A modo de esquema se representa la figura 37.

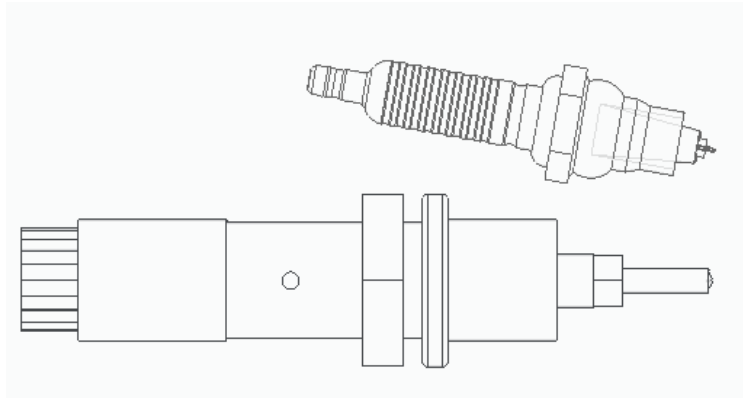


Figura 37: Representación del conjunto inyector - bujía (Elaboración propia).

Nota: se ha utilizado el programa "SolidEdge" para la elaboración de estos cuerpos.

En las próximas secciones se va a evaluar el motor con dos distintos tipos de combustible, y, para el combustible más rentable y factible, con y sin un turbocompresor.

3.9.1 Cálculos

Todos los cálculos de las contiguas secciones se han hecho con arreglo a los estudios y campos de la química de reacciones REDOX y estequiometría y el funcionamiento físico y mecánico de los motores de combustión.

$$R_{A/c} = \frac{m_a}{m_c} \quad \text{Ec. 40}$$

$$R_{vol_{A/c}} = R_{A/c} \frac{\rho_c}{\rho_a} \quad \text{Ec. 41}$$

$$V_{cu} = \frac{V_{ccu}}{R_c - 1} \quad \text{Ec. 42}$$

$$V_{tu} = V_{cu} + V_{ccu} \quad \text{Ec. 43}$$

$$V_{ad} = \mu_{vol} V_{tu} \quad \text{Ec. 44}$$

$$m_a = V_{ad} \rho_a \quad \text{Ec. 45}$$

$$m_c = \frac{m_a}{R_{A/c}} \quad \text{Ec. 46}$$

$$Q_c = m_c PCI \quad \text{Ec. 47}$$

$$m_g = m_a + m_c \quad \text{Ec. 48}$$

$$Q_g = m_g Cp_g (T_s - T_\infty) \quad \text{Ec. 49}$$

$$Q_r = 0.2 Q_c \quad \text{Ec. 50}$$

$$Q_{fr} = 0.05 Q_c \quad \text{Ec. 51}$$

$$L_u = Q_c - Q_g - Q_r - Q_{fr} \quad \text{Ec. 52}$$

$$\mu_{term} = \frac{L_u}{Q_c} \quad \text{Ec. 53}$$

$$P_{c-r-fr-u-g} = Q_{c-r-fr-u-g} i \frac{rpm}{60} \quad \text{Ec. 54}$$

$$\mu_{mec} = \frac{P_u}{P_c} \quad \text{Ec. 55}$$

$$P_{me} = \frac{4\pi T}{V_{cc}} \quad \text{Ec. 56}$$

$$P_i = \frac{P_{me}}{\mu_{mec}} \quad \text{Ec. 57}$$

$$T = \frac{P_u}{w} \quad \text{Ec. 58}$$

$$m_{a-c} = m_{a-c} \frac{rpm}{60} i \quad \text{Ec. 59}$$

Donde:

$R_{A/c}$	Dosado estequiométrico	ρ_c	Densidad del combustible
$R_{vol_{A/c}}$	Dosado volumétrico	ρ_a	Densidad del aire
m_a	Masa aire por cilindro	V_{cu}	Volumen de cámara de combustión
m_c	Masa combustible por cilindro	V_{ccu}	Cilindrada unitaria
m_g	Masa gases de escape por cilindro	R_c	Relación de compresión
Q_c	Calor liberado por combustible	V_{tu}	Volumen total de cámara unitaria
Q_g	Calor de gases de escape	V_{ad}	Volumen admisible en cámara

Q_r	Calor perdido por refrigeración	μ_{vol}	Rendimiento volumétrico
Q_{fr}	Calor perdido por fricción y radiación	μ_{term}	Rendimiento térmico
L_u	Calor útil	μ_{mec}	Rendimiento mecánico
$P_{c-r-fr-u-g}$	Potencia de combustible/ refrigeración/fricción-radiación/gases de escape	rpm	Revoluciones por minuto
i	Factor de giro	T	Par motor
P_i	Presión media indicada	w	Velocidad angular
P_{me}	Presión media efectiva	\dot{m}_{a-c}	Flujo másico de aire/combustible

Se han tenido una serie de consideraciones para el cálculo de los términos de las ecuaciones anteriores:

- Se ha considerado la densidad de los gases correspondiente a las condiciones de operación de cada figura mostrada en las secciones siguientes según rangos de temperatura y presión deseados a la entrada de los cilindros por los inyectores. Para el último caso de motores alimentados por hidrógeno y amoníaco se ha tenido en consideración los nuevos parámetros de entrada de aire recogidos en la figura 44.
- Se ha considerado que el combustible no ocupa volumen en el cilindro que ya el motor Mazda inyecta el combustible de forma directa.
- Los valores de temperatura y presión de salida de los gases de escape han sido seleccionados según datos teóricos y experimentales ya recogidos en otros estudios anteriores.
- Los cálculos para cada término de las ecuaciones anteriores se han hecho en arreglo al régimen de máximas revoluciones por minuto establecidos por la ficha técnica del motor, sea así 6000 r.p.m.
- Las variables “presión media efectiva”, “presión media indicada” y “par motor” son meramente informativos ya que deberían ser medidos en un laboratorio.
- Se ha considerado que todas las reacciones son estequiométricas y por tanto se realiza una combustión perfecta. En apartado posteriores se analizará la posibilidad de la existencia de otros gases de escape nocivos antes la realidad que no siempre se produce una combustión perfecta.
- El hidrógeno y el aire se han considerado como gases ideales y por tanto la densidad del gas ha sido calculada con arreglo a la Ley de los Gases Ideales. No se incluye ni considera el amoníaco como gas ideal.

3.9.2 Balance térmico y mecánico para alimentación con amoniaco

Para este primer caso solo se tiene en cuenta amoniaco como combustible. La figura 38 recoge todas las reacciones químicas, cálculos estequiométricos, dosados, condiciones de presión y temperatura de los gases a la entrada y salida del motor y los cálculos de las densidades de sendos gases.

Adicionalmente, la figura 39 recoge todos los cálculos mecánicos y térmicos del motor pertinentes con arreglo a las ecuaciones 40 – 59 (para régimen máximo de trabajo, es decir, 6000rpm).

Cálculos estequimétrico de las reacciones químicas en motor AMONIACO									
Número de átomos de Nitrógeno (x), Hidrógeno (y) y Oxígeno (z) de los reactivos					Observaciones				
Amoniaco (g)					(1) Se han considerado el amoniaco como fuente principal de combustible. (2) Se ha considerado una reacción estequiométrica y una combustión total (no generación de NOx). (3) El aire purificado se considera de un 21% oxígeno y 79% nitrógeno (1 mol O2 por 3,762 N2). (4) Las densidades de los gases se han calculado en relación a la ecuación de los gases ideales (no el amoniaco).				
X1	Y1		Z1						
1	3		0						
Valores de los coeficientes a, b, c, d, e									
a	b		c	d					
4	3		2	6					
Ecuación química de la posible reacción: reactivos (α) y productos (β)									
4	NH3	+	3	O2 + 3.762 N2	→	2	N2	6	H2O
Información de combustible a usar				Relación aire-combustible (A-C). Dosado estequiométrico en masa aire / masa combustible					
Nombre	Fórmula química	Masa Molar (g/mol)	Densidad (kg/m³)	A-C		6.080		kg aire / kg combustible	
Amoniaco (g)	NH3	17.021	0.723	Relación aire-NH3 (A-C). Dosado estequiométrico en volumen aire / volumen H2					
Hidrógeno (g)	H2	2.016	0.202	Vol aire / Vol H2 = A-C * (densidad comb / densidad H2)		3.413		m³ aire / m³ H2	
Oxígeno (g)	O2	32.000	1.429						
Nitrógeno (g)	N2	28.174	1.251	%CO2 seco = (moles CO2 producidas / moles totales de los productos sin H2O)*100% = 0%					
Aire	O2 + 3.762 N2	29	1.288	%CO2 húmedo = (moles CO2 producidas / moles totales)*100% = 0%					
Condiciones de presión y temperatura de los gases involucrados									
Amoniaco		Hidrógeno		Aire		Nitrógeno (salida)		Agua (salida)	
Temperatura	Presión	Temperatura	Presión	Temperatura	Presión	Temperatura	Presión	Temperatura	Presión
600K	500kPa	600K	500kPa	298K	120kPa	333K	180kPa	1173K	180Kpa

Figura 38: Hoja de cálculos de las reacciones que intervienen en los cilindros (Motor de Amoniaco) (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa “Excel.exe” para la elaboración de esta hoja

MOTOR AMONIACO (1 cilindro)			
Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Cilindrada	Vcc	cm ³	1998
Relación de compresión	Rc	-	13:01
Volumen cámara de combustión	Vcu	cm ³	41.625
Cilindrada unitaria	Vccu	cm ³	499.500
Volumen total cilindro	Vtu	cm ³	541.125
Rendimiento volumétrico	Ev	%	85%
Volumen admisible cilindro	Vad	cm ³	459.956
Masa de aire por cilindro	ma	kg	5.92E-04
Masa NH3	mnh3	kg	9.74E-05
Poder calorífico inferior NH3	PCInh3	MJ/kg	18.57
Calor liberado por NH3	Qnh3	MJ	1.81E-03
		J	1809.333542
Masa gases de escape N2	mgn2	kg	2.36E-04
Masa gases de escape H2O	mgh2o	kg	4.53E-04
Masa gases de escape	mg	kg	6.90E-04
Calor específico a presión constante del vapor de agua	Cph2o	J/K kg	2000
Calor específico a presión constante del nitrógeno	Cpn2	J/K kg	1040
Temperatura de salida	Ts	K	1173
Temperatura ambiente	Ta	K	298
Calor liberado por H2O	Qh2o	J	793.58
Calor liberado por N2	Qn2	J	215.11
Calor gases de escape	Qg	J	1008.69
Calor por refrigeración	Qr	J	361.87
Calor por fricción y radiación	Qfr	J	90.47
Rendimiento térmico útil	Eu	%	19.25%
Trabajo útil	Lu	J	348.31
Revoluciones por minuto máx.	ñma	1/min	6000
Revoluciones por segundo	ñnh3	1/s	100
Velocidad angular	w	rad/s	628.32
Factor de giro	i	-	0.5
Potencia combustible	Pc	kW	90.47
Potencia útil	Pu	kW	17.42
Potencia gases de escape	Pg	kW	50.43
Potencia por refrigeración	Pr	kW	18.09
Potencia por fricción y radiación	Pfr	kW	4.52
Rendimiento mecánico	Emec	%	19.25%
Presión media efectiva	Pme	kPa	174.33
Presión media indicada	Pmi	kPa	905.57
Par motor	T	Nm	27.72
Flujo másico de aire por cilindro	ñma	kg/s	2.96E-02
Flujo másico NH3 por cilindro	ñnh3	kg/s	4.87E-03

Figura 39: Hoja de cálculo de los parámetros que intervienen en los cilindros del motor de amoniaco (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

3.9.3 Balance térmico y mecánico para la alimentación con hidrógeno

Para este segundo caso solo se tiene en cuenta hidrógeno como combustible. La figura 40 recoge todas las reacciones químicas, cálculos estequiométricos, dosados, condiciones de presión y temperatura de los gases a la entrada y salida del motor y los cálculos de las densidades de sendos gases.

Adicionalmente, la figura 41 recoge todos los cálculos mecánicos y térmicos del motor pertinentes con arreglo a las ecuaciones 40 – 59 (para régimen máximo de trabajo, es decir, 6000rpm).

Cálculos estequimétrico de las reacciones químicas en motor HIDRÓGENO						
Número de átomos de Nitrógeno (x), Hidrógeno (y) y Oxígeno (z) de los reactivos				Observaciones		
Hidrógeno (g)				(1) Se han considerado el hidrógeno como fuente principal de combustible. (2) Se ha considerado una reacción estequiométrica y una combustión total (no generación de NOx).		
X1	Y1	Z1				
0	2	0				
Valores de los coeficientes a, b, c, d, e				(3) El aire purificado se considera de un 21% oxígeno y 79% nitrógeno (1 mol O2 por 3,762 N2).		
a	b	c				
2	1	2	(4) Las densidades de los gases se han calculado en relación a la ecuación de los gases ideales.			
Ecuación química de la reacción: reactivos (α) y productos (β)						
2	H2	+	1	O2 + 3.762 N2	→	2 H2O
Información de combustible a usar				Relación aire-combustible (A-C). Dosado estequimétrico en masa aire / masa combustible		
Nombre	Fórmula química	Masa Molar (kg/kmol)	Densidad (kg/m ³)	A-C	34.224 kg aire / kg combustible	
Amoniaco (g)	NH3	17.021	0.723	Relación aire-H2 (A-C). Dosado estequiométrico en volumen aire / volumen H2		
Hidrógeno (g)	H2	2.016	0.20206	Vol aire / Vol H2 = A-C * (densidad comb / densidad H2)		5.369 m ³ aire / m ³ H2
Oxígeno (g)	O2	32.000	1.429	%CO2 seco = (moles CO2 producidas / moles totales de los productos sin H2O)*100% = 0%		
Nitrógeno (g)	N2	28.174	1.251	%CO2 húmedo = (moles CO2 producidas / moles totales)*100% = 0%		
Aire	O2 + 3.762 N2	29	1.288			
Condiciones de presión y temperatura de los gases involucrados						
Amoniaco		Hidrógeno		Aire		Agua (salida)
Temperatura	Presión	Temperatura	Temperatura	Presión	Temperatura	Presión
600K	500kPa	600K	298K	120kPa	1173K	180Kpa

Figura 40: Hoja de cálculos de las reacciones que intervienen en los cilindros (Motor de Hidrógeno) (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa “Excel.exe” para la elaboración de esta hoja

MOTOR HIDRÓGENO (1 cilindro)			
Variable	Unidades	Valor	Nomenclatura
Cilindrada	Vcc	cm ³	1998
Relación de compresión	Rc	-	13:01
Volumen cámara de combustión	Vcu	cm ³	41.625
Cilindrada unitaria	Vccu	cm ³	499.500
Volumen total cilindro	Vtu	cm ³	541.125
Rendimiento volumétrico	Ev	%	85%
Volumen admisible cilindro	Vad	cm ³	459.956
Masa de aire por cilindro	ma	kg	5.92E-04
Masa H2	mh3	kg	1.73E-05
Poder calorífico inferior H2	PCInh3	MJ/kg	120
Calor liberado por H2	Qnh3	MJ	2.08E-03
		J	2077.23
Masa gases de escape H2O	mgh2o	kg	6.10E-04
Calor específico del vapor de agua	Cph2o	J/K kg	2000
Temperatura de salida	Ts	K	1173
Temperatura ambiente	Ta	K	298
Calor liberado por H2O	Qg	J	1067.03
Calor por refrigeración	Qr	J	415.45
Calor por fricción y radiación	Qfr	J	103.86
Rendimiento térmico útil	Eu	%	23.63%
Trabajo útil	Lu	J	490.89
Revoluciones por minuto máx.	ñma	1/min	6000
Revoluciones por segundo	ñmh3	1/s	100
Velocidad angular	w	rad/s	628.32
Factor de giro	i	-	0.5
Potencia combustible	Pc	kW	103.86
Potencia útil	Pu	kW	24.54
Potencia gases de escape	Pg	kW	53.35
Potencia por refrigeración	Pr	kW	20.77
Potencia por fricción y radiación	Pfr	kW	5.19
Rendimiento mecánico	Emec	%	23.63%
Presión media efectiva	Pme	kPa	245.69
Presión media indicada	Pi	kPa	1039.65
Par motor	T	Nm	39.06
Flujo másico de aire por cilindro	ñma	kg/s	2.96E-02
Flujo másico H2 por cilindro	ñmh2	kg/s	8.66E-04

Figura 41: Hoja de cálculo de los parámetros que intervienen en los cilindros del motor de hidrógeno (Elaboración propia).

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

3.9.4 Balance térmico y mecánico para alimentación con amoniaco e hidrógeno

Para este tercer caso se tienen en cuenta ambos combustibles, tanto hidrógeno como amoniaco. La figura 42 recoge todas las reacciones químicas, cálculos estequiométricos, dosados, condiciones de presión y temperatura de los gases a la entrada y salida del motor y los cálculos de las densidades de sendos gases. Adicionalmente, la figura 43 recoge todos los cálculos mecánicos y térmicos del motor pertinentes con arreglo a las ecuaciones 40 – 59 (para régimen máximo de trabajo, es decir, 6000rpm).

Cálculos estequimétrico de las reacciones químicas en motor AMONIACO - HIDRÓGENO													
Número de átomos de Nitrógeno (x), Hidrógeno (y) y Oxígeno (z) de los reactivos						Observaciones							
Amoniaco			Hidrógeno			(1) Se han considerado el hidrógeno como fuente principal de combustible. (2) Se ha considerado una reacción estequiométrica y una combustión total (no generación de NOx). (3) El aire purificado se considera de un 21% oxígeno y 79% nitrógeno (1 mol O2 por 3,762 N2). (4) Las densidades de los gases se han calculado en relación a la ecuación de los gases ideales.							
X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2								
1	3	0	2	0	0								
Valores de los coeficientes a, b, c, d, e													
a	b	c	d	e									
2	6	1	14	9									
Ecuación química de la REACCIÓN: reactivos (α) y productos (β)													
4	NH3	+	2	H2	+	4	O2 + 3.762 N2	→	17	N2	+	8	H2O
Información de combustible a usar				Relación aire-combustible (A-C). Dosado estequiométrico en masa aire / masa combustible									
Nombre	Fórmula química	Masa Molar (g/mol)	Densidad (kg/m³)	A-C	7.654		kg aire / kg combustible						
Amoniaco (g)	NH3	17.021	0.73	Relación aire-combustible (A-C). Dosado estequiométrico en volumen aire / volumen combustible									
Hidrógeno (g)	H2	2.016	0.20205733	Vol aire / Vol comb = A-C * (densidad comb / densidad aire)			3.785	m³ aire / m³ combustible					
Oxígeno (g)	O2	32.000	1.429	%CO2 seco = (moles CO2 producidas / moles totales de los productos sin H2O)*100% = 0%									
Nitrógeno (g)	N2	28.174	1.2505	%CO2 húmedo = (moles CO2 producidas / moles totales)*100% = 0%									
Aire	O2 + 3.762 N2	29	1.288										
Condiciones de presión y temperatura de los gases involucrados													
Amoniaco			Hidrógeno		Aire		Nitrógeno (salida)		Agua (salida)				
Temperatura	Presión		Temperatura	Presión	Temperatura	Presión	Temperatura	Presión	Temperatura	Presión			
600K	500kPa		600K	500kPa	298K	120kPa	1173K	180kPa	1173K	180Kpa			

Figura 42: Hoja de cálculos de las reacciones que intervienen en los cilindros (Motor de Amoniaco e Hidrógeno) (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

MOTOR HIDRÓGENO + AMONIACO (1 cilindro)			
Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Cilindrada	Vcc	cm ³	1998
Relación de compresión	Rc	-	13:01
Volumen cámara de combustión	Vcu	cm ³	41.625
Cilindrada unitaria	Vccu	cm ³	499.500
Volumen total cilindro	Vtu	cm ³	541.125
Rendimiento volumétrico	Ev	%	85%
Volumen admisible cilindro	Vad	cm ³	459.956
Masa de aire por cilindro	ma	kg	5.92E-04
Masa de combustible por cilindro	mc	kg	7.74E-05
Masa NH3	mnh3	kg	7.31E-05
Masa H2	mh2	kg	4.33E-06
Poder calorífico inferior NH3	PCInh3	MJ/kg	18.57
Poder calorífico inferior H2	PCIh2	MJ/kg	120
Calor liberado por NH3	Qnh3	MJ	1.36E-03
		J	1357.000157
Calor liberado por H2	Qh2	MJ	5.19E-04
		J	519.3076263
Calor liberado por combustible	Qc	MJ	1.88E-03
		J	1876.307783
Masa gases de escape N2	mgn2	kg	5.15E-04
Masa gases de escape H2O	mgh2o	kg	1.55E-04
Masa gases de escape	mg	kg	6.70E-04
Calor específico a presión constante del vapor de agua	Cph2o	J/K kg	2000
Calor específico a presión constante del nitrógeno	Cpn2	J/K kg	1040
Temperatura de salida	Ts	K	1173
Temperatura ambiente	Ta	K	298
Calor liberado por H2O	Qh2o	J	271.14
Calor liberado por N2	Qn2	J	468.55
Calor gases de escape	Qg	J	739.69
Calor por refrigeración	Qr	J	375.26
Calor por fricción y radiación	Qfr	J	93.82
Rendimiento térmico útil	Mu	%	35.58%
Trabajo útil	Lu	J	667.54
Revoluciones potencia máxima (rpm)	ma	1/min	6000
Revoluciones por segundo	mnh3	1/s	100
Velocidad angular	w	rad/s	628.32
Factor de giro	i	-	0.5
Potencia combustible	Pc	kW	93.82
Potencia útil	Pu	kW	33.38
Potencia gases de escape	Pg	kW	36.98
Potencia por refrigeración	Pr	kW	18.76
Potencia por fricción y radiación	Pfr	kW	4.69
Rendimiento mecánico	Mmec	%	35.58%
Presión media efectiva	Pme	kPa	334.10
Presión media indicada	Pi	kPa	939.09
Par motor	T	Nm	53.12
Flujo másico de aire por cilindro	ma	kg/s	2.96E-02
Flujo másico NH3 por cilindro	mnh3	kg/s	3.65E-03
Flujo másico H2 por cilindro	mh2	kg/s	2.16E-04

Figura 43: Hoja de cálculo de los parámetros que intervienen en los cilindros del motor de hidrógeno y amoniaco (Elaboración propia).

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

3.9.4.1 Con sobrealimentación

Cálculos estequimétrico de las reacciones químicas en motor AMONIACO - HIDRÓGENO - sobrealimentación													
Número de átomos de Nitrógeno (x), Hidrógeno (y) y Oxígeno (z) de los reactivos						Observaciones							
Amoniaco			Hidrógeno			(1) Se han considerado el hidrógeno como fuente principal de combustible. (2) Se ha considerado una reacción estequiométrica y una combustión total (no generación de NOx). (3) El aire purificado se considera de un 21% oxígeno y 79% nitrógeno (1 mol O2 por 3,762 N2). (4) Las densidades de los gases se han calculado en relación a la ecuación de los gases ideales.							
X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2								
1	3	0	2	0	0								
Valores de los coeficientes a, b, c, d, e													
a	b	c	d	e									
2	6	1	14	9									
Ecuación química de la REACCIÓN: reactivos (α) y productos (β)													
4	NH3	+	2	H2	+	4	O2 + 3.762 N2	→	17	N2	+	8	H2O
Información de combustible a usar				Relación aire-combustible (A-C). Dosado estequimétrico en masa aire / masa combustible									
Nombre	Fórmula química	Masa Molar (g/mol)	Densidad (kg/m³)	A-C	7.654				kg aire / kg combustible				
Amoniaco (g)	NH3	17.021	0.73	Relación aire-combustible (A-C). Dosado estequimétrico en volumen aire / volumen combustible									
Hidrógeno (g)	H2	2.016	0.202	Vol aire / Vol comb = A-C * (densidad comb / densidad aire)				2.588 m³ aire / m³ combustible					
Oxígeno (g)	O2	32.000	2.080										
Nitrógeno (g)	N2	28.174	1.832	%CO2 seco = (moles CO2 producidas / moles totales de los productos sin H2O)*100% = 0%									
Aire	O2 + 3.762 N2	29	1.884	%CO2 húmedo = (moles CO2 producidas / moles totales)*100% = 0%									
Condiciones de presión y temperatura de los gases involucrados													
Amoniaco			Hidrógeno		Aire		Nitrógeno (salida)		Agua (salida)				
Temperatura	Presión		Temperatura	Presión	Temperatura	Presión	Temperatura	Presión	Temperatura	Presión			
600K	500kPa		600K	500kPa	333K	180kPa	1173K	180kPa	1173K	180kPa			

Figura 44: Hoja de cálculos de las reacciones que intervienen en los cilindros (Motor de Amoniaco e Hidrógeno sobrealimentado) (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

MOTOR HIDRÓGENO + AMONIACO + sobrealimentación (1 cilindro)			
Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Cilindrada	Vcc	cm ³	1998
Relación de compresión	Rc	-	13:01
Volumen cámara de combustión	Vcu	cm ³	41.625
Cilindrada unitaria	Vccu	cm ³	499.500
Volumen total cilindro	Vtu	cm ³	541.125
Rendimiento volumétrico	Ev	%	85%
Volumen admisible cilindro	Vad	cm ³	459.956
Masa de aire por cilindro	ma	kg	8.67E-04
Masa de combustible por cilindro	mc	kg	1.13E-04
Masa NH3	mh3	kg	1.07E-04
Masa H2	mh2	kg	6.33E-06
Poder calorífico inferior NH3	PClnh3	MJ/kg	18.57
Poder calorífico inferior H2	PClh2	MJ/kg	120
Calor liberado por NH3	Qnh3	MJ	1.98E-03
		J	1984.9288
Calor liberado por H2	Qh2	MJ	7.60E-04
		J	759.6083602
Calor liberado por combustible	Qc	MJ	2.74E-03
		J	2744.537161
Masa gases de escape N2	mgn2	kg	7.53E-04
Masa gases de escape H2O	mgh2o	kg	2.27E-04
Masa gases de escape	mg	kg	9.80E-04
Calor específico a presión constante del vapor de agua	Cph2o	J/K kg	2000
Calor específico a presión constante del nitrógeno	Cpn2	J/K kg	1040
Temperatura de salida	Ts	K	1173
Temperatura ambiente	Ta	K	298
Calor liberado por H2O	Qh2o	J	396.61
Calor liberado por N2	Qn2	J	685.36
Calor gases de escape	Qg	J	1081.97
Calor por refrigeración	Qr	J	548.91
Calor por fricción y radiación	Qfr	J	137.23
Rendimiento térmico útil	Mu	%	35.58%
Trabajo útil	Lu	J	976.43
Revoluciones potencia máxima (rpm)	ñma	1/min	6000
Revoluciones por segundo	ñnh3	1/s	100
Velocidad angular	w	rad/s	628.32
Factor de giro	i	-	0.5
Potencia combustible	Pc	kW	137.23
Potencia útil	Pu	kW	48.82
Potencia gases de escape	Pg	kW	54.10
Potencia por refrigeración	Pr	kW	27.45
Potencia por fricción y radiación	Pfr	kW	6.86
Rendimiento mecánico	Mmec	%	35.58%
Presión media efectiva	Pme	kPa	488.70
Presión media indicada	Pi	kPa	1373.64
Par motor	T	Nm	77.70
Flujo másico de aire por cilindro	ñma	kg/s	4.33E-02
Flujo másico NH3 por cilindro	ñnh3	kg/s	3.55E-03
Flujo másico H2 por cilindro	ñh2	kg/s	3.17E-04

Figura 45: Hoja de cálculo de los parámetros que intervienen en los cilindros del motor de hidrógeno y amoniaco sobrealimentado (Elaboración propia).

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

3.9.5 Comparativa y elección

Para la determinación de que motor es el adecuado para la utilización de amoniaco se han realizado dos tablas comparativas, mostrada sen las figuras 46 y 47.

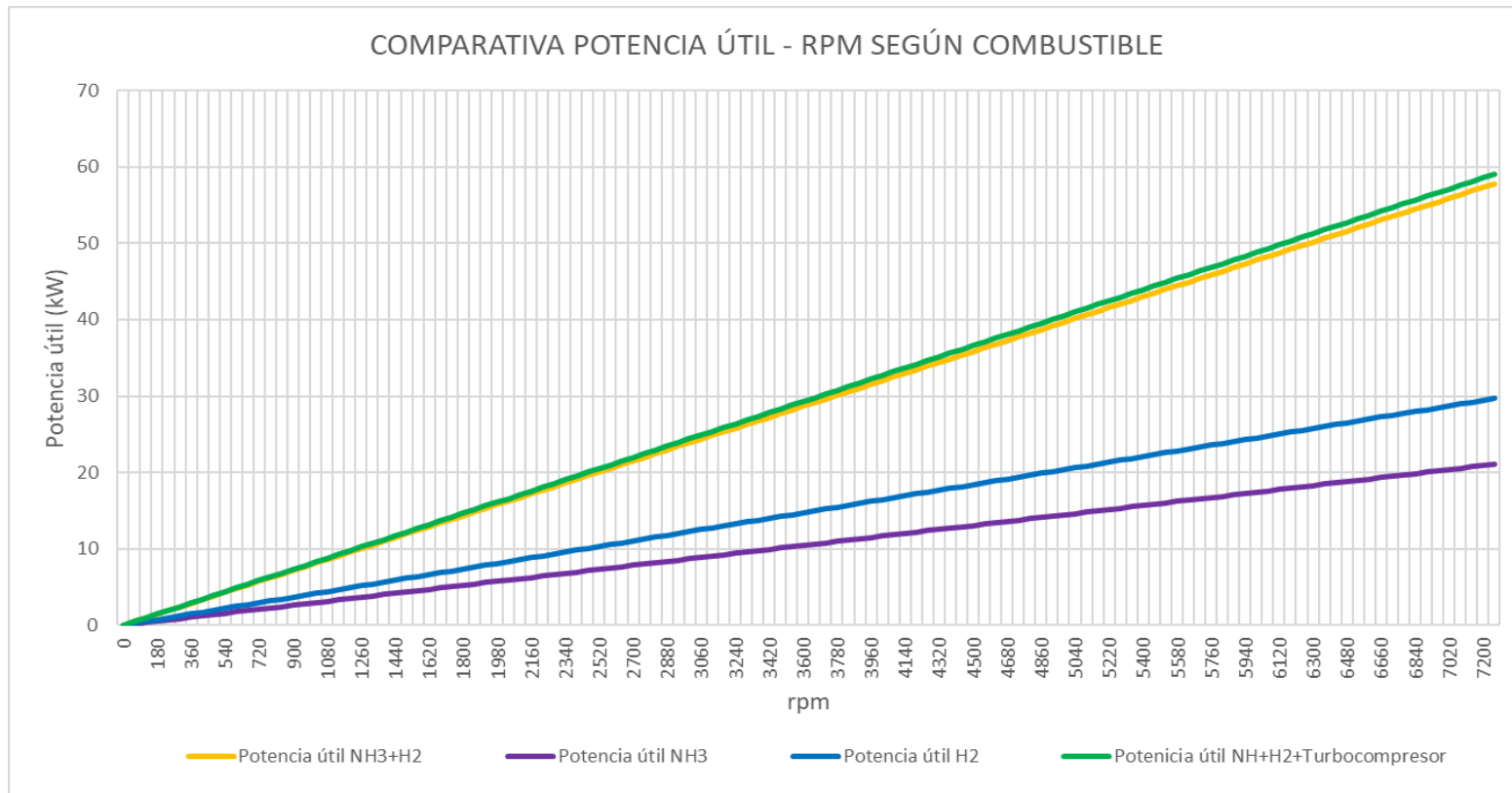


Figura 46: Gráfica comparativa potencia útil según tipo de motor y combustible (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

Comparativa rendimientos - par motor - presión media efectiva/indicada				
	Motor NH3+H2	Motor NH3	Motor H2	Motor NH3+H2+ Sobrealimentación
Rendimiento mecánico (%)	35.58	19.25	23.63	35.58
Par Motor (Nm)	53.12	27.72	39.06	77.7
Presión Media Efectiva (kPa)	334.1	174.33	245.69	488.7
Presión Media Indicada (kPa)	939.09	905.57	1039.63	1373.64

Figura 47: Tabla comparativa de rendimientos, presión media efectiva e indicada y par motor según tipo de motor y combustible (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

Se incluye en el ANEXO F los flujos másicos de los gases que fluyen por el motor y por el sistema en función de las revoluciones por minuto con un motor de amoniaco e hidrógeno sobrealimentado.

Aunque se discutirá posteriormente en la sección "conclusiones" de este proyecto, se va a hacer un pequeño análisis de los resultados.

- La esencia de ser del motor térmico es generar energía mecánica a través de la térmica. Es la energía liberada por esta explosión la que genera un movimiento lineal al empujar el pistón. Sin embargo, la fuerza que hace el pistón sobre el cigüeñal no es constante y ni de cerca tampoco lo es la presión de los gases dentro del cilindro. Por otro lado, la presión media efectiva nos da una idea de cómo va a rendir el motor. En conclusión, a mayor energía térmica mayor par motor y mayor presión media efectiva. Como consecuencia, mayor facilidad para mover el vehículo.
- El rendimiento mecánico depende del diseño del motor. Sin embargo, en este proyecto se ha considerado un motor existente y por tanto solo se puede manejar la variable "calor en la explosión de los gases de combustión". Aun así, se puede observar que al añadir el turbocompresor se logra introducir más aire en el motor, lo que como consecuencia nos da más calor en las reacciones dentro del cilindro. A mayor energía térmica mayor par motor.

3.10 Reducción catalítica selectiva (RCS)

¿Qué es lo que pasa si no existe una combustión perfecta entre el amoniaco e hidrógeno con el oxígeno? Básicamente nos encontraremos ante una situación que se dará con total normalidad y entonces el comportamiento del motor no se regirá por las ecuaciones de las figuras 40, 42 y 44, sino que aparecerán una serie de productos denominados óxido de nitroso. Como ya se ha explicado en la sección 1.1.2 (Efecto invernadero y gases GEI) el óxido nitroso es un gas de efecto invernadero y, por tanto, como es objeto de este proyecto, se debe evitar su emisión a la atmósfera.

La solución reside en un catalizador. Ya se ha utilizado uno anteriormente para dissociar el amoniaco en hidrógeno y nitrógeno. En este caso el proceso se denomina “reducción catalítica selectiva”. La reducción catalítica selectiva (SCR) es un proceso para convertir óxidos de nitrógeno (también conocidos como NOX) en nitrógeno diatómico y agua, con la ayuda de un catalizador (Wikipedia, Reducción catalítica selectiva, 2022).

Para el caso concreto del vehículo de amoniaco e hidrógeno es muy fácil, ya que al poseer amoniaco en el tanque puede usar este último como agente reductor que, al mezclarlo con los gases de escape, reacciona con el catalizador. Las reacciones involucradas en el proceso siguen a continuación (véase figura 48).

Hoja de cálculo de la RCS									
Número de átomos de Nitrógeno (x), Hidrógeno (y) y Oxígeno (z) de los reactivos									
Amoniaco					Oxígeno				
X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2				
1	3	0	0	0	2				
Monóxido nitroso					Óxido nitroso				
X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4				
1	0	1	1	0	2				
Ecuación química de la reacción 1 (redox)									
Reactivos (α1)									
2	NH3	+	2	NO	+	0.5	O2	→	
Productos (β1)									
2	N2	+		3			H2O		
Ecuación química de la reacción 2 (redox)									
Reactivos (α2)									
2	NH3	+	1	NO2	+	0.5	O2	→	
Productos (β2)									
1.5	N2	+		3			H2O		
Catalizador									
(1) El catalizador que se usará será uno hecho de Zeolita. Estos catalizadores tienen la capacidad de trabajar en temperaturas tan elevadas como las de los gases de escape (del orden de 1000K).									
(2) La geometría del catalizador será de panel, ha que son los menos volumétricos, menos costosos aunque conlleve mayores caídas de presión (lo que en principio no nos concierne).									
(3) Como se puede observar, el reductor a utilizar es el propio amoniaco que recogeremos de fases anteriores del sistema.									
(4) Existen dos posibilidades, como se puede ver en la tabla superior.									

Figura 48: Hoja de cálculos de las reacciones químicas en la RCS (Elaboración propia)

Nota 1: Información obtenida de (Wikipedia, Reducción catalítica selectiva, 2022).

Nota2: se ha utilizado el programa “Excel.exe” para la elaboración de esta hoja

3.11 Mecanismos reguladores de presión y caudal por tuberías

3.11.1 Electrobombas centrífugas de cilindrada variable de eje horizontal accionadas por actuadores eléctricos

Una bomba hidráulica es una máquina cuya función consiste en la transformación de energía mecánica en hidráulica, es decir, su misión consiste en impulsar un fluido a lo largo de una tubería o parecido para su distribución.

Para el caso específico usado en el vehículo, la bomba a usar consistirá en una bomba centrífuga, que en un tipo específico de bomba donde la energía mecánica que se usa para conseguir energía hidráulica tiene su origen en la gran velocidad de rotación que se le imprime al fluido. Las partes que conforman la bomba son:

- Carcasa: es la estructura que protege a todos los mecanismos y piezas internas del cual está compuesto la bomba.
- Conductos de entrada y salida: conductos por donde entrará y saldrá en fluido.
- Difusor: pieza mecánica que está encerrada en el interior de la carcasa junto al rodete. El difusor está formado por unos álabes fijos divergentes, los cuales, gracias a su progresivo agrandamiento de área de sección, hacen que aumente la presión.
- Rodete: compuesto por un disco con álabes, y que cuyo tubo circular que lo rodea y sobre el cual gira suele llamarse “caracol”.
- Cojinetes: pieza mecánica que sostiene el eje impulsor.
- Panel de control: permitirá a través de la señal recibida por el sensor el accionamiento y parada de la bomba. La configuración será parecida a la ilustrada en la figura 29.

Su funcionamiento es el siguiente: el fluido entra en el tubo de aspiración (conducto de entrada) y se dirige al centro del rodete. A continuación, los álabes empujan el fluido contra las paredes del caracol por fuerza centrífuga. Posteriormente los álabes fijos divergentes, donde a consecuencia del incremento en la sección de la carcasa, la velocidad del fluido irá disminuyendo, lo que contribuye a transformar la energía cinética en energía de presión, mejorando el rendimiento de la bomba (Bombas hidráulicas, s.f.).

3.11.2 Válvulas accionadas por actuadores eléctricos

Una válvula es por definición un dispositivo que abre o cierra el paso de un fluido por un conducto en una máquina, aparato o instrumento, gracias a un mecanismo, a diferencias de presión, etc (Bazouki, 1989).

Este tipo de válvulas, las conectadas a un actuador eléctrico, están vinculadas a un panel de control que a su vez está ligado a un proceso de automatización. El objetivo fundamental de estas válvulas y el motivo por el cual se usan en este sistema es principalmente para regular el caudal de fluido que transcurre por la tubería. Los actuadores eléctricos incorporan una combinación de motor eléctrico y reductor, especialmente desarrollada y diseñada para la automatización de válvulas, que transmite el par necesario para el accionamiento de una compuerta, válvula de mariposa, de bola o de otro tipo (AUMA, s.f.).

3.11.3 Válvulas de tres vías partidoras

Las válvulas de tres vías partidoras son aquellas que sirven para dirigir un fluido por una salida o por otra o ajustar los caudales de salida para dirigir una cierta cantidad de fluido por una o por otra.

3.11.4 Válvulas de tres vías mezcladoras

Las válvulas de tres vías mezcladoras por otro lado son aquellas que sirven para mezclar dos fluidos por sus sendas entradas o para ajustar los caudales de entrada.

3.11.5 Válvulas sin retorno

Las válvulas antirretornos, también llamadas válvulas de retención, tienen por objetivo cerrar por completo el paso de un fluido en circulación en un sentido y dejar paso libre en el contrario (Wikipedia, Válvula antirretorno, s.f.).

4 Conclusiones

Existen una serie de conclusiones y consideraciones que se pueden hacer para la finalización de este proyecto:

- Todos los cálculos de diseño térmico y mecánico del intercambiador de calor y la caldera de agua se han realizado para satisfacer el flujo máximo de amoníaco y agua que puede fluir por el circuito (véase ANEXO F).
- El flujo máximo de vapor de agua que consigue extraer la caldera es de 0,05308615 kg/s mientras que, para el régimen máximo de rpm el intercambiador solicitaría un flujo másico 0,05782326 kg/s. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el valor de la potencia necesaria en caldera se ha realizado para calentar toda la caldera hasta punto de ebullición. Cuando esta fase haya pasado, la caldera necesitará mucha menos energía para evaporar la misma cantidad de vapor de agua.
- El depósito a un régimen standard de 2100rpm (valor típico para los vehículos de gasolina), el motor demanda 0.0102799 kg/s de amoníaco. A una densidad del amoníaco líquido de 630 kg/m³, y siendo cada botella de 25 L se tienen 15.75 kg de amoníaco por botella. Por tanto, a un régimen estacionario de 2100rpm, cada botella consumiría 37 kg/h que equivaldría a 58,74L/h. A 3 botellas de 25L de amoníaco el vehículo tardaría aproximadamente 1 hora y media en agotarse.
- La posición de las válvulas y bombas hidráulicas es puramente teórico e ilustrativo.
- Las especificaciones de los separadores de fluidos y catalizadores son puramente teóricos.
- En el ANEXO F no se ha tenido en consideración el flujo másico de amoníaco que fluye hacia el catalizador RCS ya que se necesita de su estudio en laboratorio.
- Este proyecto se ha basado en modelos existentes de motores de barcos que usan combustible blending de amoníaco y gasolina.
- El motor más eficiente, que entrega mayor par motor y que trabaja a mayor presión media efectiva es el motor a base de amoníaco, hidrógeno y acoplado a un sistema de turbocompresor e intercooler.

A continuación, se muestran los resultados del comportamiento del motor con los distintos combustibles que se pueden introducir:

Variables	Tipo motor	Motor NH3 + H2	Motor NH3	Motor H2	Motor NH3 + H2 + Sobrealimentación
Rendimiento térmico (%)		35.58	19.25	23.63	35.58
Par Motor (Nm)		53.12	27.72	39.06	77.7
Presión Media Efectiva (kPa)		334.10	174.33	245.69	488.7
Presión Media Indicada (kPa)		939.09	905.57	1039.63	1373.64

Figura 49: hoja que recoge los valores últimos por lo que se rige el motor con distintos combustibles (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Exceñ.exe" para la elaboración de esta hoja

Como se puede observar, el motor obtiene mejores rendimientos térmicos cuando utiliza el combustible blending de NH3 y H2. Aunque es común para todos los valores preestablecidos por el diseñador del motor sobre qué cantidad de calor se disipará por refrigeración o fricción entre otros, son los diferentes gases de escape que capturarán cierta energía calorífica los que marcarán la diferencia. Adicionalmente, como se puede observar, es el turbocompresor el que, al aumentar la densidad del aire, genera más calor en la combustión, generando una presión media efectiva mayor sobre el pistón y como consecuencia un mayor par motor.

En segundo lugar, se muestran en la figura 50 los distintos consumos que sufrirá en depósito a la hora de suministrar el flujo másico de amoníaco que solicite el motor.

rpm	Consumo NH3 (L/h)	Tiempo de vida para 3 botellas (h)
1500	41.96	1.79
2000	55.36	1.35
2500	70.49	1.06
3000	83.92	0.89
3500	97.34	0.77

Figura 50: hoja que expone los distintos consumos de amoníaco en las botellas según rpm (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

4.1 Sigüientes pasos

- Diseñar mecánica y térmicamente las dimensiones y propiedades de las tuberías, así como dimensionar los separadores de fluidos y ajustar la apertura de las válvulas partidoras para regular el flujo deseado de amoniaco por cada consumo.
- Diseñar un código de control de flujos, presiones, temperaturas, rpm y consumos para poder seleccionar y controlar electrónicamente las válvulas (apertura y cierre de estas) y puesta en marcha o apagado de las bombas hidráulicas.
- Diseñar el depósito de amoniaco e hidrógeno gas que precede a los inyectores.
- Poner en práctica todo el conjunto.

5 Objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamado universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad. Como se puede observar en la siguiente imagen adjunta, existen hoy en día 17 ODS.



Figura 51: Objetivos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, s.f.)

De estos posibles ODS se perseguirán cumplir los siguientes:

- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. Como ya se sabe, el continuo crecimiento de la población mundial conlleva un aumento de la demanda energética que, en su mayoría, consiste en combustibles fósiles (véase figura 8). El ODS7 persigue el desarrollo y uso de energías renovables y limpias. Con amoníaco e hidrógeno como combustible y de la mano de la tecnología de catalizadores y RSC conseguiremos cumplir con los requisitos “no contaminantes”.
- Objetivo 8: Trabajo decente y crecimiento económico. Una de las metas de este proyecto también incluye la creación de puestos de trabajo, ya sean de gestión, transporte o de fábrica.
- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura. Los avances tecnológicos también son esenciales para encontrar soluciones permanentes a los desafíos económicos y ambientales, al igual que la oferta de nuevos empleos y la promoción de la eficiencia energética (Naciones Unidas, 2015).
- Objetivo 13: Acción por el clima. De manera intuitiva se puede afirmar que lógicamente la no emisión de CO₂ contribuirá a un menor crecimiento del calentamiento global.

ANEXO A

P (kPa)	T(°C)	v (m³/kg)		h (kJ/kg)			s (kJ/kgK)		
		Liq. sat.	Vap.sat	Liq. sat.	Vap. sat.	Vaporización	Liq.sat.	Vap.sat.	Vaporización
10,9	-70	0,001379	9,045	-131,3	1337,4	1468,7	-0,603	6,629	7,232
21,86	-60	0,001401	4,714	-87,3	1355,4	1442,7	-0,391	6,378	6,769
40,83	-50	0,001424	2,629	-43,8	1372,5	1416,3	-0,192	6,156	6,348
50	-46,52	0,001433	2,175	-28,6	1378,3	1406,9	-0,124	6,084	6,208
60	-43,28	0,001441	1,834	-14,4	1383,6	1398,0	-0,062	6,019	6,081
70	-40,45	0,001448	1,588	-2,0	1388,1	1390,1	-0,008	5,965	5,973
71,71	-40	0,001450	1,553	0,0	1388,8	1388,8	0,000	5,957	5,957
80	-37,94	0,001455	1,402	9,1	1392,0	1382,9	0,039	5,918	5,879
90	-35,67	0,001461	1,256	19,1	1395,5	1376,4	0,081	5,877	5,796
100	-33,6	0,001466	1,138	28,3	1398,6	1370,3	0,120	5,840	5,721
110	-31,69	0,001471	1,041	36,8	1401,5	1364,7	0,155	5,807	5,652
119,5	-30	0,001476	0,964	44,3	1404,0	1359,7	0,186	5,778	5,592
120	-29,91	0,001476	0,960	44,7	1404,1	1359,4	0,187	5,776	5,589
130	-28,25	0,001481	0,890	52,1	1406,5	1354,4	0,217	5,748	5,531
140	-26,69	0,001485	0,831	59,0	1408,7	1349,7	0,246	5,722	5,476
150	-25,22	0,001489	0,779	65,6	1410,8	1345,2	0,272	5,698	5,426
160	-23,82	0,001493	0,733	71,9	1412,8	1340,9	0,297	5,676	5,379
170	-22,49	0,001497	0,693	77,8	1414,6	1336,8	0,321	5,654	5,333
180	-21,23	0,001501	0,656	83,5	1416,3	1332,8	0,344	5,635	5,291
190	-20,02	0,001504	0,624	89,0	1418,0	1329,0	0,365	5,616	5,251
190,1	-20	0,001504	0,624	89,0	1418,0	1329,0	0,366	5,615	5,249
200	-18,86	0,001507	0,595	94,2	1419,5	1325,3	0,386	5,598	5,212
250	-13,66	0,001523	0,482	117,7	1426,3	1308,6	0,477	5,520	5,043
290,8	-10	0,001534	0,418	134,4	1430,8	1296,4	0,541	5,467	4,926
300	-9,23	0,001536	0,406	137,9	1431,7	1293,8	0,554	5,456	4,902
350	-5,35	0,001548	0,351	155,7	1436,3	1280,6	0,621	5,403	4,782
400	-1,88	0,001560	0,309	171,7	1440,1	1268,4	0,680	5,356	4,676
429,4	0	0,001566	0,289	180,4	1442,2	1261,8	0,711	5,331	4,620
500	4,14	0,001580	0,250	199,6	1446,4	1246,8	0,781	5,278	4,497
600	9,29	0,001598	0,210	223,6	1451,4	1227,8	0,866	5,213	4,347
615	10	0,001600	0,206	227,0	1452,0	1225,0	0,878	5,204	4,326
700	13,81	0,001614	0,182	244,9	1455,3	1210,4	0,940	5,159	4,219
800	17,85	0,001630	0,160	264,1	1458,5	1194,4	1,006	5,111	4,105
857,3	20	0,001638	0,149	274,3	1460,1	1185,8	1,041	5,086	4,045
900	21,53	0,001644	0,142	281,6	1461,2	1179,6	1,065	5,068	4,003
1000	24,9	0,001658	0,129	297,8	1463,4	1165,6	1,119	5,030	3,911
1100	28,03	0,001671	0,117	312,9	1465,2	1152,3	1,169	4,995	3,826
1167	30	0,001680	0,111	322,4	1466,3	1143,9	1,200	4,974	3,774
1200	30,95	0,001684	0,108	327,0	1466,8	1139,8	1,215	4,963	3,748
1300	33,68	0,001696	0,09934	340,3	1468,0	1127,7	1,259	4,934	3,675
1400	36,26	0,001708	0,09230	353,0	1469,0	1116,0	1,299	4,906	3,607
1500	38,71	0,001719	0,08617	365,0	1469,8	1104,8	1,337	4,880	3,543
1555	40	0,001725	0,08313	371,4	1470,2	1098,8	1,357	4,866	3,509
1600	41,04	0,001730	0,08078	376,6	1470,4	1093,8	1,373	4,855	3,482
1700	43,25	0,001741	0,07600	387,6	1470,9	1083,3	1,408	4,832	3,424
1800	45,38	0,001752	0,07174	398,2	1471,2	1073,0	1,441	4,809	3,368
1900	47,41	0,001763	0,06790	408,4	1471,4	1063,0	1,472	4,788	3,316
2000	49,37	0,001773	0,06444	418,3	1471,5	1053,2	1,502	4,768	3,266
2033	50	0,001777	0,06336	421,5	1471,5	1050,0	1,512	4,761	3,249
2614	60	0,001834	0,04880	472,8	1469,7	996,9	1,665	4,658	2,993

Figura 52: Tablas termodinámicas del amoniaco (Gómez-Acebo, 2010)

P = 20 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
-61,34	0,001398	-93,1	-0,418
-61,34	5,123	1353,0	6,410
-60	5,157	1355,7	6,423
-50	5,408	1376,2	6,517
-40	5,657	1396,7	6,607
-30	5,906	1417,3	6,693
-20	6,154	1437,9	6,776
-10	6,401	1458,6	6,856
0	6,648	1479,4	6,934
10	6,894	1500,2	7,009
20	7,140	1521,2	7,081
30	7,386	1542,3	7,152
40	7,631	1563,5	7,221

P = 40 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
-55	0,001412	-65,5	-0,290
-50,34	0,001424	-45,3	-0,198
-50,34	2,680	1372,0	6,163
-45	2,748	1383,2	6,213
-35	2,875	1404,2	6,303
-25	3,001	1425,2	6,389
-15	3,127	1446,2	6,472
-5	3,252	1467,2	6,552
5	3,376	1488,2	6,629
15	3,500	1509,3	6,703
25	3,624	1530,5	6,776
35	3,747	1551,8	6,846
45	3,871	1573,2	6,914

P = 60 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
-50	0,001424	-43,8	-0,192
-43,28	0,001441	-14,4	-0,062
-43,28	1,834	1383,6	6,019
-40	1,863	1390,6	6,050
-30	1,949	1412,0	6,140
-20	2,034	1433,4	6,226
-10	2,119	1454,7	6,309
0	2,203	1476,0	6,388
10	2,286	1497,3	6,464
20	2,369	1518,6	6,538
30	2,452	1540,0	6,610
40	2,535	1561,4	6,680
50	2,617	1583,0	6,748
60	2,700	1604,7	6,814

P = 100 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
-40	0,001450	0,0	0,000
-33,6	0,001466	28,3	0,120
-33,6	1,138	1398,6	5,840
-30	1,157	1406,6	5,873
-20	1,210	1428,8	5,962
-10	1,262	1450,8	6,048
0	1,314	1472,6	6,129
10	1,365	1494,3	6,207
20	1,415	1516,0	6,282
30	1,466	1537,7	6,355
40	1,516	1559,4	6,426
50	1,566	1581,2	6,494
60	1,615	1603,0	6,561
70	1,665	1625,0	6,626

P = 200 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
-30	0,001476	44,3	0,185
-20	0,001504	89,0	0,366
-18,86	0,001507	94,2	0,386
-18,86	0,5946	1419,5	5,598
-10	0,6192	1440,5	5,679
0	0,6464	1463,8	5,766
10	0,6732	1486,7	5,848
20	0,6995	1509,4	5,927
30	0,7255	1531,9	6,002
40	0,7513	1554,3	6,075
50	0,7768	1576,6	6,145
60	0,8022	1598,9	6,213
70	0,8275	1621,2	6,279
80	0,8527	1643,6	6,344

P = 300 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
-20	0,001504	89,1	0,365
-10	0,001534	134,4	0,541
-9,23	0,001536	137,9	0,554
-9,23	0,4061	1431,7	5,456
0	0,4238	1454,6	5,542
10	0,4425	1478,9	5,629
20	0,4608	1502,6	5,711
30	0,4787	1525,9	5,789
40	0,4963	1549,0	5,864
50	0,5138	1571,9	5,936
60	0,5311	1594,7	6,006
70	0,5482	1617,4	6,073
80	0,5653	1640,1	6,138
90	0,5823	1662,9	6,202

P = 400 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
-10	0,001534	134,5	0,541
-1,88	0,001560	171,7	0,680
-1,88	0,3094	1440,1	5,356
0	0,3123	1445,1	5,374
10	0,3270	1470,7	5,466
20	0,3413	1495,5	5,552
30	0,3552	1519,8	5,634
40	0,3688	1543,6	5,711
50	0,3822	1567,1	5,785
60	0,3955	1590,4	5,856
70	0,4086	1613,5	5,924
80	0,4216	1636,6	5,991
90	0,4345	1659,7	6,055
100	0,4473	1682,8	6,118

P = 600 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
0	0,001566	180,5	0,711
9,29	0,001598	223,6	0,866
9,29	0,2104	1451,4	5,213
10	0,2111	1453,4	5,220
20	0,2215	1480,8	5,315
30	0,2315	1507,0	5,403
40	0,2412	1532,4	5,486
50	0,2506	1557,2	5,564
60	0,2598	1581,6	5,638
70	0,2689	1605,6	5,709
80	0,2778	1629,4	5,778
90	0,2867	1653,1	5,844
100	0,2954	1676,7	5,908
110	0,3041	1700,3	5,970

P = 800 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
10	0,001600	227,1	0,877
17,85	0,001630	264,1	1,006
17,85	0,1596	1458,5	5,111
20	0,1614	1464,9	5,133
30	0,1695	1493,5	5,229
40	0,1772	1520,7	5,317
50	0,1846	1547,0	5,399
60	0,1919	1572,5	5,477
70	0,1990	1597,5	5,551
80	0,2059	1622,1	5,622
90	0,2127	1646,4	5,690
100	0,2195	1670,6	5,755
110	0,2262	1694,6	5,819
120	0,2328	1718,7	5,881

P = 1000 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
20	0,001638	274,4	1,040
24,9	0,001658	297,8	1,119
24,9	0,1285	1463,4	5,030
30	0,1321	1479,1	5,082
40	0,1387	1508,4	5,178
50	0,1450	1536,3	5,265
60	0,1511	1563,1	5,347
70	0,1569	1589,1	5,424
80	0,1627	1614,5	5,497
90	0,1683	1639,5	5,567
100	0,1739	1664,3	5,634
110	0,1794	1688,9	5,699
120	0,1848	1713,3	5,762
130	0,1901	1737,7	5,823

P = 1400 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
30	0,001679	322,5	1,199
36,26	0,001708	353,0	1,299
36,26	0,09230	1469,0	4,906
40	0,09431	1481,5	4,946
50	0,09942	1513,3	5,046
60	0,1042	1543,1	5,137
70	0,1088	1571,5	5,221
80	0,1132	1598,8	5,299
90	0,1175	1625,4	5,373
100	0,1217	1651,4	5,444
110	0,1258	1677,0	5,512
120	0,1299	1702,4	5,577
130	0,1338	1727,6	5,641
140	0,1378	1752,7	5,702

P = 1800 kPa			
t (°C)	v (m³/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
30	0,001678	322,6	1,198
40	0,001725	371,5	1,356
45,38	0,001752	398,2	1,441
45,38	0,07174	1471,2	4,809
50	0,07380	1487,8	4,861
60	0,07800	1521,4	4,964
70	0,08193	1552,6	5,056
80	0,08565	1582,2	5,141
90	0,08922	1610,5	5,220
100	0,09267	1638,0	5,295
110	0,09602	1664,8	5,366
120	0,09931	1691,2	5,433
130	0,1025	1717,2	5,499
140	0,1057	1743,1	5,562

ANEXO B

Hoja de datos y características físicas y termodinámicas del amoniaco			
Nombre comercial	Amoniaco anhidro	Números de identificación	
Nombre	Amoniaco	No. CAS	7664-41-7 (anhidro)
Fórmula química	NH ₃	No. ONU	1005 (anhidro y d.a > a 50 %)
Masa molecular (g/mol)	17.021		2672 (d.a entre 10% y 35%)
Composición (%)	N: 82.25 ; H: 17.75		2073 (d.a ente 35% y 50 %)
Propiedades físicas y termodinámicas			
Amoniaco Anhidro			
Punto de ebullición (°C)	-33.35	Presión crítica (Kpa)	11.425
Punto de fusión (°C)	-77.70		2097.2 (0°C)
Densidad en líquido (kg/m ³)	682 (-33.35°C; 1 atm)	Calor específico (J/Kg K)	2226.2 (100°C)
	659 (-15°C; 2.332 atm)		2105.6 (200°C)
	639 (0°C; 4.238 atm)	Calor de formación del gas (KJ/mol)	-39.222 (0 K)
	618 (15°C; 7.188 atm)		-46.222 (298 K)
	588 (35°C;13.321 atm)	Calor de vaporización (Kcal/mol)	5.581
Límites de explosividad (%)	16mín. - 25máx.	Capacidad calorífica a 25°C (cal/mol/°C)	
Densidad de vapor (kg/m ³)	0.732	Solubilidad en etanol al 95 % (%)	15 (20°C)
Presión de vapor a 25.7°C (mmHg)	760		11 (30°C)
Temperatura de autoignición (°C)	651	Solubilidad en etanol absoluto (%)	20 (0°C)
Solubilidad	Muy soluble en etanol, cloroformo y éter etílico		10 (25°C).
Solubilidad en metanol (%)	16 (25°C)	Solubilidad en H ₂ O (% peso)	42.8 (0°C)
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	18.57		33.1 (20°C)
Poder calorífico superior (MJ/kg)	22.44		23.4 (40°C)
Densidad energética (MJ/l)	12.7	Octanaje (RON)	130
Generalidades y observaciones			
(1) El amoniaco es un gas incoloro con olor característico. (2) Muy soluble en agua. (3) Las disoluciones acuosas del amoniaco son alcalinas y tienen un efecto corrosivo frente a metales y tejidos. (4) Este gas es más ligero que el aire. (5) En caso de fuga o descompresión rápida, existe el riesgo de congelamiento por contacto debido a que se almacena a presión como líquido.			
Hoja de características químicas del amoniaco			
(1) Arde con dificultad. (2) Es estable a temperatura ambiente, pero a 400-450°C se descompone en N ₂ y H ₂ . (3) La forma correcta de escribir la ionización del amoniaco en disoluciones acuosas es: NH ₃ (ac) + H ₂ O = (NH ₄ ⁺) + (HO ⁻). (4) La velocidad de descomposición depende del material donde se encuentre almacenado. (5) Las disoluciones con concentraciones inferiores a 5 % no producen vapores inflamables a ninguna temperatura. (6) Reacciones violentas e incluso explosivas entre amoniaco y los siguientes reactivos: acetaldehído, acroleína, boro, haluros de boro, calcio, ácido clórico, azida de cloro, monóxido de cloro, trifluoruro de cloro, cromo, anhídrido crómico o cloruro de cromilo entre otros muchos. (7) Resultan peligrosas las disoluciones amoniacaes de plata al exponerse al aire o al calor o al almacenarse por períodos largos de tiempo, ya que se genera nitruro de plata el cual es explosivo. (8) Reacciona con cinc, cobre, estaño y algunas aleaciones. (9) Las disoluciones acuosas de amoniaco generan amoniaco gaseoso y en general son incompatibles con ácidos, cobre, aleaciones de cobre, hierro galvanizado y aluminio.			

Figura 53: Hoja de datos de características físicas y termodinámicas del amoniaco anhidro (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja.

ANEXO C

BOE núm. 164

Viernes 10 julio 1987

21063

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

16024 *ORDEN de 19 de junio de 1987 por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria MIE· APQ-004 «Almacenamiento de amoniaco anhidro» del Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos. BOE núm. 164*

El Real Decreto 668/1980, de 8 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos, faculta al Ministerio de Industria y Energía para dictar las Instrucciones Técnicas Complementarias a las que hayan de ajustarse las correspondientes instalaciones. El logro de unas buenas condiciones de seguridad en el almacenamiento de amoniaco anhidro requiere un correcto diseño y una esmerada construcción, así como la inspección y prueba de los equipos que lo componen y la formación adecuada del personal. A estos efectos, se ha elaborado la anexa Instrucción Técnica Complementaria que contiene la normativa aplicable a los almacenamientos de amoniaco anhidro. En su virtud, este Ministerio ha dispuesto: Se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria MIE.. APQ-004, del Real Decreto 668/1980, de 8 de febrero, sobre almacenamiento de amoniaco anhidro, que se incluye como anexo a la presente Orden.

Capítulo 1: Generalidades**Artículo 4.** Tipos de almacenamiento.

4.1 Almacenamiento refrigerado. Es aquél en el cual la temperatura del amoníaco anhidro es aproximadamente menos 33 °C, con presión prácticamente igual a la atmosférica.

4.2 Almacenamiento semirrefrigerado. Es aquél en el cual la temperatura del amoníaco es sensiblemente superior a menos 33 °C, pero inferior a la temperatura ambiente, con presión superior a la atmosférica.

4.3 Almacenamiento no refrigerado. Es aquél en el cual la temperatura máxima que puede alcanzar el amoníaco anhidro es igual a la máxima temperatura ambiente, con presión muy superior a la atmosférica.

Figura 54: Reglamento sobre almacenamiento de amoniaco anhidro

Capítulo 4: Diseño, construcción, inspecciones y pruebas**Artículo 2: Diseño****2.1) Grado de llenado máximo:**

2.1.1) La capacidad máxima de un tanque o recipiente a presión se determinará de forma que el amoníaco anhidro líquido no ocupe más del 95 por 100 del volumen total, tras dilatarse al incrementar su temperatura hasta la máxima que pueda alcanzar en servicio.

2.1.2) Los grados de llenado máximo de amoníaco anhidro para tanques y recipientes a presión de los distintos tipos de almacenamiento serán los siguientes, expresados en kilogramos de amoníaco anhidro por litro de volumen del tanque o recipiente a presión:

- a) Almacenamiento refrigerado: 0,64.
- b) Almacenamiento semirrefrigerado con temperatura máxima en servicio inferior a 5 °C: 0,60.
- c) Almacenamiento no refrigerado: 0,53.

Estos valores máximos se han determinado según la relación: grado de llenado máximo igual a 0,95 multiplicado por peso específico del amoníaco anhidro líquido a la máxima temperatura de servicio.

2.1.3) La capacidad máxima de un tanque o recipiente a presión se determinará por la siguiente fórmula: amoníaco anhidro (en kg) igual al volumen total (en l) multiplicado por el grado de llenado máximo (en kg/l) indicado en 2.1.1, según tipo de almacenamiento.

2.1.4) El porcentaje de llenado máximo del volumen de un tanque o recipiente a presión, en función de la temperatura del amoníaco anhidro que contiene, será el siguiente: $V=100 \times (G / P)$ siendo: V = Volumen máximo admisible, en porcentaje. G = Grado de llenado máximo según el tipo de almacenamiento. P = Peso específico del amoníaco anhidro líquido a la temperatura a que se encuentre en el tanque o recipiente a presión.

2.2) Datos de diseño

2.2.1) Los tanques y recipientes a presión se diseñarán de acuerdo con las presiones y temperaturas más desfavorables que puedan producirse en servicio y en prueba. La presión de diseño será siempre superior a la presión máxima de servicio. Para los recipientes no refrigerados la presión de diseño será, como mínimo, 22 bar.

2.2.2) Se considerará, como mínimo, 1 milímetro de sobreespesor de corrosión para tanques y recipientes a presión, y 2 milímetros para tubuladuras de las conexiones.

2.4) Materiales

2.4.1) Los materiales a utilizar cumplirán los requisitos del código de diseño. Sus características deberán satisfacer las condiciones más desfavorables de presión y temperatura que puedan producirse durante el servicio y en la prueba, y se controlarán mediante los ensayos adecuados.

2.4.2) El material de los componentes del tanque o recipiente a presión en contacto con amoníaco anhidro y de los demás componentes unidos directamente a los mismos, será acero de límite elástico inferior a 490 N/mm² (50 kg/mm²) y buenas características de soldabilidad, ductilidad y tenacidad. Para recipientes a presión semirrefrigerados y tanques el material de los mismos componentes tendrá también resistencia al impacto.

ANEXO D

Características de cada botella de amoniaco líquido					
Dimensiones y características de cada botella				Propiedades AISI 316	
Capacidad (L)	25	Presión máxima de acero (MPa)	200	Análisis (%)	
Espesor (mm)	3	Presión máxima admisible (MPa)	133.33	Cromo (Cr)	16.25
Longitud (mm)	1000	Presión de servicio (KPa)	1000	Níquel (Ni)	11.5
Diámetro externo (mm)	184.412	Temperatura de servicio (°C)	5	Carbón (C)	0.04
Diámetro interno (mm)	178.412	Material	Acero 316	Manganeso (Mn)	1
Peso en vacío aprox (kg)	13.678	Densidad material (kg/m ³)	8000	Silicio (Si)	0.5
Condiciones de operación del amoniaco en depósito				Fósforo (P)	0.023
Nombre	Amoniaco anhidro	Masa molecular (g/mol)	17.021	Azufre (S)	0.015
Estado de la sustancia	Gas líquido	Composición	N: 82.25 %; H: 17.75 %	Molibdeno (Mo)	2.5
Temperatura de servicio (°C)	0	Densidad a 0°C/5bar (kg/m ³)	698.23	Hierro (Fe)	68.5
Presión de servicio (kPa)	1000	Entalpía (hf) del líquido saturado (kJ/kg)	274.4	Propiedades físicas	
Volumen específico (vf) del líquido saturado (m ³ /kg)	0.0016	Entropía (sf) del líquido saturado (kJ/kg K)	1.04	Densidad específica a 20°C (g/cm ³)	8
Generalidades y especificaciones				Módulo de elasticidad (N/mm ²)	723.95
<p>(1) Se considerará el amoniaco líquido como diferencialmente incompresible y se asociará las propiedades descritas en la tabla a las del amoniaco líquido a 10 bar (1000 kPa).</p> <p>(2) El grado de llenado máximo corresponde a, según el ANEXO B, al 0,95% de la densidad del amoniaco en las condiciones de almacenamiento, es decir: $0,95 \cdot 0.639 = 0.60705 \text{ kg/L}$.</p> <p>(3) Al tener cada depósito una capacidad de 25L entonces le corresponde un llenado máximo de 15.17625kg de amoniaco líquido. Es decir, el amoniaco ocupará 23.75L en el tanque.</p> <p>(4) Se tendrán en total 47.5L de amoniaco en el vehículo.</p>				Calor específico a 20°C (J/K kg)	500
				Conductividad térmica a 20/100°C (W/m K)	15/16
				Coefficiente de dilatación a 100°C (x10 ⁶ C ⁻¹)	16.5
				Intervalo de fusión (C)	13711398
				Propiedades mecánicas	
				Resistencia a tracción (Mpa)	290
				Esfuerzo último (Kpa)	580
				Elongación en 50mm (%)	40
				Brinell BHN	219
				Rockwell B	95
				Propiedades eléctricas	
				Resistividad eléctrica a 68 ° F (ohm)	5.70E-05
				Permeabilidad eléctrica	1.008
				Resistencia térmica	
				Max. temperatura (F)	1400

Figura 55: Características de las botellas de amoniaco (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

ANEXO E

Tipo malla: tejido holandés sarga										
Especificaciones										
Tamaño geométrico del poro	Descripción de malla	Urdimbre/ Trama	Número de poros	AsK	AsS	Porosidad	A _{0rel}	Peso/ unidad de area	Espesor	Relación de caudal específico
µm	mmxmm	N/cm	Nporos/cm ²	mm ² /cm	mm ² /cm	%	%	kg/m ²	mm	Eu
6	510 x 3600	40 / 100	142000	0.1	0.25	35	5	0.28	0.05	5033
8	450 x 2750	35 / 140	94000	0.09	0.33	33	4	0.35	0.06	4959
8	375 x 2300	60 / 160	63000	0.12	0.42	33	4	0.46	0.08	4766
10	350 x 2600	55 / 148	72800	0.11	0.39	38	6	0.39	0.08	3064
10	325 x 2300	65 / 160	54000	0.15	0.42	34	4	0.46	0.08	3196
14	200 x 1400	140 / 230	21000	0.3	0.67	33	4	0.81	0.15	2505
18	200 x 2000	65 / 180	32000	0.15	0.48	42	8	0.5	0.11	1193
21	165 x 1100	130 / 230	14520	0.25	0.69	36	5	0.81	0.16	1472
21	165 x 1400	130 / 230	17000	0.25	0.67	37	6	0.76	0.15	1320
46	80 x 700	130 / 480	4500	0.25	1.25	38	7	1.18	0.25	523
88	40 x 560	200 / 600	1700	0.4	1.67	44	11	1.72	0.38	208
121	30 x 360	280 / 900	840	0.58	2.5	42	9	2.49	0.55	181
166	20 x 250	180 / 1300	380	0.39	3.67	39	6	3.34	0.69	168
30*	+165 x 800	130 / 270	10200	0.25	0.67	46	8	0.74	0.17	532
30*	+200 x 600	110 / 150	9300	0.22	0.38	59	9	0.48	0.15	237
Descripción										
(1) Para los monofilamentos, un tejido de malla holandesa asargada produce los poros más pequeños y una superficie de malla suave, mientras que la sección transversal del material más grande brinda niveles más altos de estabilidad de la malla. (2) Tiene cinco niveles de poros compensados. Esto significa que las partículas oblongas, delgadas, en forma de varilla y fibrosas se retienen de forma segura. (3) Las mallas trenzadas de especificación fina se utilizan para la filtración fina, como la filtración a presión en equipos de dirección hidráulica y filtros de combustible para aplicaciones críticas. (4) Las mallas holandesas trenzadas de especificación más gruesa se utilizan para la filtración a presión y al vacío (filtros de disco, de celda y de tambor) y como medio poroso para aplicaciones de lecho fluidizado. (5) Material: suelen fabricarse en acero inoxidable.										
Características										
Efecto de separación	Baja pérdida de presión	Altos caudales	Estabilidad	Porosidad	Soldadura de punto	Soldadura por costura	Estampado	Recocido	Radio de doblaje	Plisado
C	E	E	D	F	C	C	C	C	C	C

Figura 56: Selección del tipo de malla (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

ANEXO F

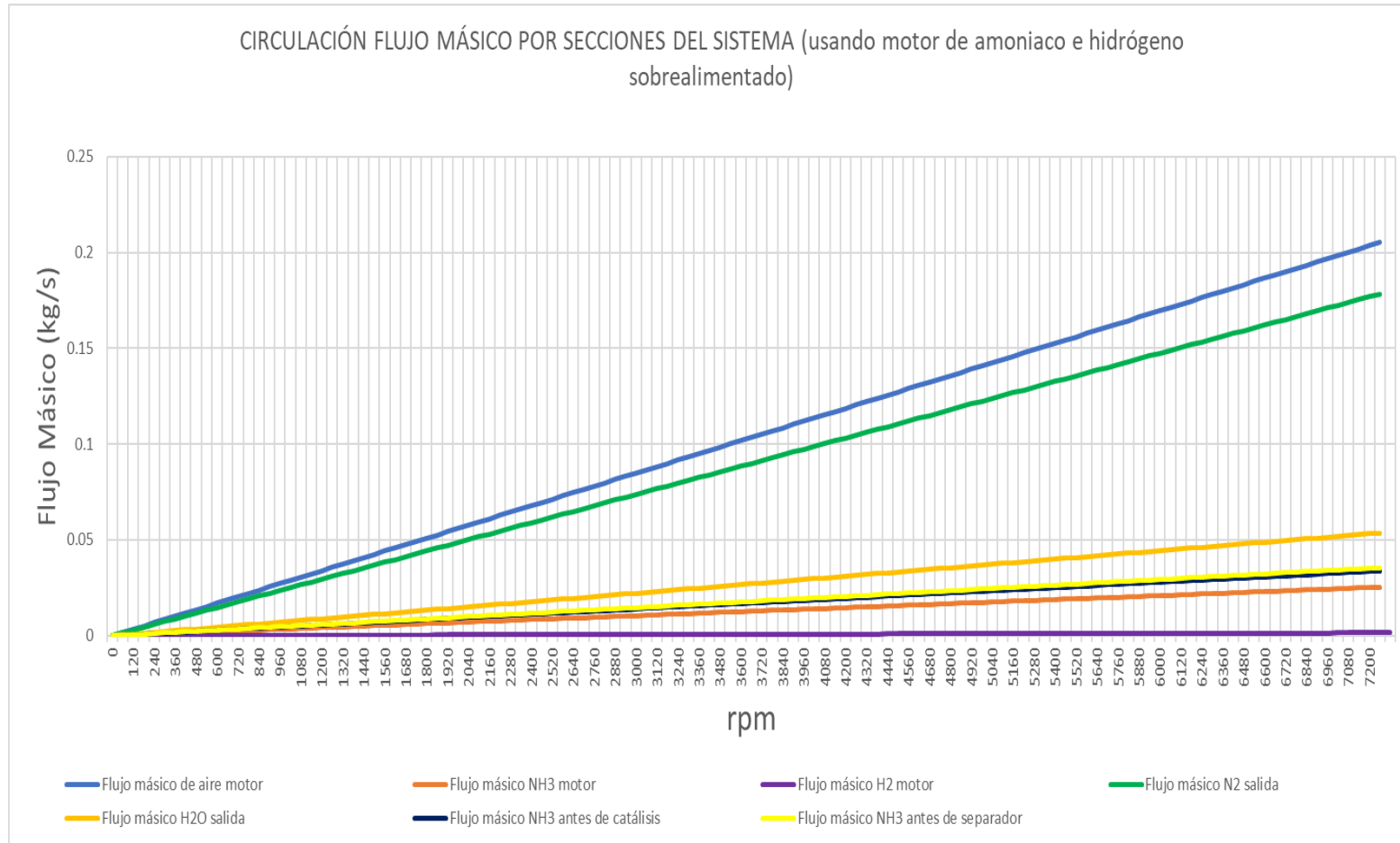


Figura 57: Gráfico del análisis de los flujos mássicos de los fluidos según distintas secciones del sistema (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

ANEXO G

Especificaciones de la caldera, datos preliminares, propiedades del fluido, resistencias y materiales y cálculos de dimensionamiento							
Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor	Características del Silicato de Calcio			
Conductividad térmica de la primera capa: Aluminio	k1	W/m K	205	(1) Muy resistente a la corrosión. (2) Excelente conductor de la electricidad. (3) Propiedades de reflexión. (4) Muy dúctil. (5) Impermeable. (6) Punto de fusión: 1800K			
Conductividad térmica de la segunda capa: Silicato de calcio (aislante)	k2	W/m K	0.058				
Altura del cilindro	L	m	1.00				
Radio interno	r1	m	0.200				
Radio exterior de la capa interior	r2	m	0.205				
Radio externo	r3	m	0.6				
Nivel del agua líquida (referencia base del cilindro)	n	m	1.1	* Se consideran pérdidas nulas en el cálculo Aislamiento del silicato del calcio se utiliza para aislar los tubos de alta temperatura y el equipo y para aplicaciones de resistencia de fuego.			
Temperatura interior inicial del agua	Ti	K	298	Cálculos			
Temperatura interior final del agua	Tf	K	373	Variable	Nomenclatura	Unidades	Valor
Temperatura exterior	Ta	K	298	Resistencia del agua	R1	K/W	0.00015915
Calor específico agua	c1	J/kg K	4184	Resistencia de primera capa	R2	K/W	1.917E-05
Calor específico vapor de agua	c2	J/kg K	2010	Resistencia de segunda capa	R3	K/W	2.94689008
Coefficiente de convección del agua (convección forzada)	hi	W/K m^2	5000	Resistencia aire	R4	K/W	0.01768388
Coefficiente de convección del aire (convección natural)	ha	W/K m^2	15	Resistencia total	R	K/W	2.96475229
Calor latente agua	Lv	KJ/kg	2260	Potencia eléctrica disipada por las paredes	Pp	W	25.297223
Potencia eléctrica por resistencia	P1	W	15000	Potencia eléctrica entregada al agua	PH2O	W	119974.703
Potencia eléctrica total	Pt1	W	120000	Flujo másico de vapor	ma	kg/s	0.05308615
Número de resistencias eléctricas en agua	N1	-	8	Tiempo para calentar agua hasta 373K* (toda caldera)	t1	s	328.074299
Tension de operación	V1	V	400	Potencia en subcámara para sobrecalentar vapor hasta 918K*	Wvs	W	58153.2248
Intensidad por electrodo	A1	A	37.5	Temperatura aproximada de vapor de agua sobrecalentado	T	K	918
Carga específica para agua	c	W/cm^2	12	Potencia eléctrica por resistencia en vapor de agua	P2	W	6000
Diámetro del electrodo	s	cm	16	Número de resistencias eléctricas en vapor de agua	Pt2	W	30000
Altura electrodo (parte sumergida)	Lc	mm	510	Número de resistencias eléctricas en vapor de agua	N2	-	5
Volumen restante caldera con electrodos	Vh20	m^3	0.125458623	Tension de operación	V2	V	400
		L	125.458623	Intensidad por electrodo	A2	A	15
Volumen electrodo (parte sumergida)	Ve	m^3	2.56354E-05	Radio crítico aislante	e	m	0.255
Volumen caldera vacía	Vc	m^3	0.125663706	Calor en función del aislante (con r exterior = 0.4 m)	qe	W	25.2965027

Figura 58: Tabla de cálculo de los parámetros de la caldera de agua (Elaboración propia)

Nota: se ha utilizado el programa "Excel.exe" para la elaboración de esta hoja

6. Bibliografía

- ACEA. (2021). *Fuel types of new passenger cars in the EU*. Obtenido de <https://www.acea.auto/figure/fuel-types-of-new-passenger-cars-in-eu/>
- Adsorción por oscilación de presión*. (s.f.). Obtenido de https://hmong.es/wiki/Vacuum_swing_adsorption
- Angel, A., Burgos, F., Hidalgo, M., Yeison, M., & Raygmare, R. (s.f.). *Transferencia de calor*. Obtenido de Intercambiadores de calor: <http://transferenciadecalorpsm.blogspot.com/2016/09/aplicaciones-de-intercambiadores-de.html>
- AUMA. (s.f.). *Actuadores eléctricos*. Obtenido de [file:///C:/Users/34606/Downloads/pb_modular_range_es%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/34606/Downloads/pb_modular_range_es%20(1).pdf)
- Bazouki, A. (1989). *The Oxford English Dictionary*. Clarendon Press.
- Bombas hidráulicas*. (s.f.). Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/4F8A02B4-A60A-42EA-9017-7C19F8722FA2/305689/Bombas2.pdf>
- BOPP. (s.f.). *Precision woven stainless steel filter mesh*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bopp.com/Bopp2012/media/boppLibrary/Download-Center/English/brochures/Bopp_FI_Metallfiltergewebe_e_2015_WEB.pdf?ext=.pdf
- Brea Prieto, P. (2018). *Recuperación de hidrógeno de mezclas gaseosas mediante un proceso PSA*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://eprints.ucm.es/id/eprint/49043/1/T40158.pdf>
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (10 de Octubre de 2008). *Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de La Tierra*. Obtenido de Revista Digital Universitaria: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf
- Calderas eléctricas y de aplicaciones especiales*. (s.f.). Obtenido de Manual de calderas: http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/Manu_cald/I/cap/04.pdf
- Catálisis heterogénea y cinética electroquímica*. (20 de Enero de 2020). Obtenido de https://www.uv.es/tunon/QFIII/Nuevo_Tema_5.pdf
- CETAL. (s.f.). *Resistencias eléctricas y equipos calefactores*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.crntecnopart.com/images/pdf/ESP/catalog/cetal_es.pdf
- Cummins. (s.f.). *Cómo funciona un turbocompresor*. Obtenido de <https://www.cummins.com/es/components/turbo-technologies/turbochargers/how-a-turbocharger-works>

- DiarioMotor. (s.f.). *Turbocompresor: ¿Cómo funciona y qué componentes tiene? ¿Qué es la válvula de descarga o wastegate?* Obtenido de <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/turbo-funcionamiento-componentes-wastegate/>
- Días del Castillo Rodríguez, F. (2018). *Recipientes a presión*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m5/Recipientes%20a%20presion.pdf
- Diseño de equipos e instalaciones*. (s.f.). Obtenido de Intercambiadores de calor: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/https://www.hidroterm.com.ve/documentacion/intercambiadoresdecalor.pdf
- Dlugokencky, Ed; Houweling, Sander; Dirksen, Ruud; Schröder, Marc; Hurst, Dale; Forster, Piers; , Secretaría de la OMM;. (2016). *Organización Meteorológica Mundial*. Obtenido de Observación del vapor de agua: <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/observacio%CC%81n-del-vapor-de-agua>
- EDGAR. (2020). *Greenhouse Gases Emissions and Climate*. Obtenido de https://edgar.jrc.ec.europa.eu/climate_change
- EEA. (4 de Diciembre de 2019). *Greenhouse gas emissions by aggregated sector*. Obtenido de <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/ghg-emissions-by-aggregated-sector-5/#tab-dashboard-02>
- EPA. (14 de Junio de 2022). *Emisiones de dióxido de carbono*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- Gómez-Acebo, T. (Diciembre de 2010). *Termodinámica: Cuaderno de Tablas y Diagramas*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/5184/4/CuadernoTablas-2010-web.pdf
- Haasen. (s.f.). *Intercambiadores de calor de placa*. Obtenido de Manual de operación y mantenimiento: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/https://haasen.com/descargas/manual-de-operacion-y-mantenimiento.pdf
- Heano, E., Romero-Piedrahíta, C., & Quintero, H. (2019). *Sistematización de los cálculos de prediseño de los motores*. Pereira, Colombia: Revista UIS Ingenierías. Obtenido de file:///C:/Users/34606/Downloads/Dialnet-SistematizacionDeLosCalculosDePrediseñoDeLosMotore-6999986.pdf
- IFA. (20 de Julio de 2018). *Databases and Charts. Production*. Obtenido de <https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>
- J. Negre C., S. (s.f.). *Manual de servicio y mantenimiento*. Obtenido de Intercambiadores de placas Sondex: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/https://jnegre.com/wp-content/uploads/pdf/jnegre-manual-mantenimiento-intercambiadores-sondex-esp.pdf

- Kakac, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (Selection, Rating and Thermal Design). *Heat Exchangers*. U.S: CRC Press. Recuperado el Marzo de 2022, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/https://dl.icdst.org/pdfs/files/b60f426c1c95b48998a3f052a70a65e2.pdf
- KLM. (2 de Abril de 2014). *Static mixer selection, sizing and troubleshooting*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/https://www.klmtechgroup.com/PDF/EDG-SYS/ENGINEERING-DESIGN-GUIDELINES-static-mixer-Rev2.1web.pdf
- KM77. (s.f.). *Precio y ficha técnica de vehículos*. Obtenido de https://www.km77.com/coches/mazda/mazda3/2019/sedan/zenith/3-sedan-zenith-skyactiv-g-20-90-kw-122-cv3/datos
- Laval, A. (s.f.). *Calefacción y refrigeración*. Obtenido de https://www.alfalaval.es/industrias/hvac/heating-and-cooling-hub/heating-and-cooling-hub/
- Laval, A. (s.f.). *Intercambiador de calor de placas con juntas*. Obtenido de https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-de-placas-con-juntas/
- M. Campbell, J. (1 de Septiembre de 2015). *Parametros de Dimensionamiento Separadores Gas- Líquido*. Obtenido de http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/spanish/?p=1487
- Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals
- NASA. (2020). *GISS Surface Temperature Analysis (v4)*. Obtenido de https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/
- NOAA. (2002). *BAMS climate assess boulder water vapor 2002*. Obtenido de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BAMS_climate_assess_boulder_water_vapor_2002_-_2.png
- OCEANA. (2019). *Gases de efecto invernadero*. Obtenido de https://europe.oceana.org/es/node/46897
- Omaña Pérez, M. C., Katrib, A. D., & Torres Rodríguez, M. R. (Septiembre de 2005). *Estado del Arte de las tecnologías utilizadas para minimizar el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/http://repositorios.unimet.edu.ve/docs/31/ATTP155O53P4.pdf
- OMM. (25 de Diciembre de 2019). *La concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanza un nuevo récord*.
- OMM. (25 de Noviembre de 2019). *La concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanza un nuevo récord*. Obtenido de https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-concentraci%C3%B3n-de-gases-de-efecto-invernadero-en-la-atm%C3%B3sfera-alcanza

- ONU. (12 de Diciembre de 2015). *Acuerdo de París*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Oswaldo Benavides Ballesteros , Henry; Esperanza León Aristizabal , Gloria. (Diciembre de 2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Obtenido de IDEAM: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf
- PrecioGas. (21 de Junio de 2022). *Calderas eléctricas: precios, tipos y funcionamiento*.
- RAE. (2021). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/amoníaco?m=form>
- S.L, M. R. (s.f.). *Mezcladores mecánicos, por aire o tipo venturi*. Obtenido de <https://manuelromeu.com/productos/sistema-de-ensado-y-mezcladores/mezcladores-mecanicos-aire-tipo-venturi/#:~:text=MEZCLADORES%20TIPO%20VENTURI&text=El%20efecto%20venturi%20consiste%20en,consiguiente%20una%20disminuci%C3%B3n%20de%20presi%C3%B3n.>
- Samson. (s.f.). *Adsorción por oscilación de presión (PSA)*. Obtenido de <https://www.samsongroup.com/es/equipos-y-aplicaciones/soluciones/adsorcion-por-oscilacion-de-presion/#:~:text=La%20adsorci%C3%B3n%20por%20oscilaci%C3%B3n%20de,de%20una%20mezcla%20de%20gases.>
- Schmidt-Bretten, A. (s.f.). *Manual de Instrucciones para Intercambiadores de Calor de Placas SIGMA*. Obtenido de <https://docplayer.es/4416590-Manual-de-instrucciones-para-intercambiadores-de-calor-de-placas-sigma-manual-de-instrucciones.html>
- University, O. (1999). *Diccionarios Oxford - Complutense*. Mayo: Editorial Complutense.
- Uriarte, A. (2009). *Historia del clima de La Tierra*. Donostia: Gobierno Vasco.
- Vaillant. (s.f.). *Intercambiador de calor de placas*. Obtenido de <https://www.vaillant.es/usuarios/servicios/glosario/intercambiador-de-calor-de-placas/>
- Washington State Department of Health. (Mayo de 2011). *Sistemas de Control de Tanque Hidroneumáticos*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://doh.wa.gov/sites/default/files/legacy/Documents/Pubs//331-380s.pdf
- Wikipedia. (Julio de 10 de 2022). *Amoníaco*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Amon%C3%ADaco#cite_ref-Alchemy_26-0
- Wikipedia. (4 de Julio de 2022). *Ley de los Gases Ideales*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_los_gases_ideales
- Wikipedia. (10 de Febrero de 2022). *Reducción catalítica selectiva*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Reducci%C3%B3n_catal%C3%ADtica_selectiva

Wikipedia. (s.f.). *Catálisis*. Obtenido de

<https://es.wikipedia.org/wiki/Cat%C3%A1lisis#Caracter%C3%ADsticas>

Wikipedia. (s.f.). *Válvula antirretorno*. Obtenido de

https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_antirretorno

WRG. (s.f.). *Separadores Vertical de Vane Tipo 100V para la eliminación de líquidos de Gas*

Natural - Gas de Proceso - Vapor. Obtenido de <https://winston-royalguard.com/filtros-separadores-filtros-para-liquidos-coladores-fabricado/separadores-tipo-vane-para-gas-natural/>