



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Curso Académico:



AGRADECIMIENTOS

“A mi madre Rosa, por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles. Sin ti nada de esto habría sido posible”

“A mi tutor Álvaro Montero, por su dedicación y entrega a pesar de la situación vivida”

“A mis amigos, por estar tanto en los días buenos como en los malos, siempre apoyándome”



RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en proponer una mejora en el proceso de refrigeración y licuación de amoníaco empleado en la fabricación de productos nitrogenados y soluciones amoniacales. Los productos obtenidos se emplean como fertilizantes en la agricultura, siendo fundamentales para garantizar el abastecimiento de alimentos a la población.

El proyecto se realiza en una empresa de producción de fertilizantes, con una planta de refrigeración de amoníaco real.

El sistema de refrigeración comprende: un depósito previo a la aspiración, tres compresores alternativos de baja presión, un depósito de regulación interetapas, tres compresores alternativos de alta presión, en los que se centra el proyecto; dos condensadores y un acumulador de amoníaco; ordenados según el ciclo recorrido por el producto de interés.

Así pues, el proyecto analiza el funcionamiento actual de los compresores de alta presión, calculando el consumo energético y el caudal trasegado a partir de los datos de funcionamiento aportados por la empresa, lo que permite comprender las dificultades de regulación que presentan los tres compresores actuales.

Por ello, el Trabajo de Fin de Grado estudia las posibles alternativas disponibles en el mercado para disminuir el consumo de la planta y mejorar la regulación de los compresores de alta presión. De esta manera, el proyecto propone la instalación de un compresor de tornillo que mejore la eficiencia energética del proceso y, a su vez, cumpla con los requisitos de funcionamiento de la planta.

Por último, el proyecto presenta un estudio del coste de la instalación del compresor de tornillo seleccionado y de los beneficios económicos que se obtendrán debido a la mejora de la eficiencia energética, estimando el tiempo que se tardará en recuperar la inversión inicial.

Palabras clave: refrigeración, compresor, amoníaco, regulación, eficiencia energética.



RESUM

El present Treball de Fi de Grau es centra a proposar una millora en el procés de refrigeració i liquació d'amoniac empleat en la fabricació de productes nitrogenats i solucions amoniacals. Els productes obtinguts s'empren com a fertilitzants en l'agricultura, sent fonamentals per a garantir l'abastiment d'aliments a la població.

El projecte es realitza en una empresa de producció de fertilitzants, amb una planta de refrigeració d'amoniac real.

El sistema de refrigeració comprén: un dipòsit previ a l'aspiració, tres compressors alternatius de baixa pressió, un dipòsit de regulació interetapes, tres compressors alternatius d'alta pressió, en els que es centra el projecte; dos condensadors i un acumulador d'amoniac; ordenats segons el cicle recorregut pel producte d'interés.

Així, doncs, el projecte analitza el funcionament actual dels compressors d'alta pressió, calculant el consum energètic i el cabal trasbalsat a partir de les dades de funcionament aportats per l'empresa, la qual cosa permet comprendre les dificultats de regulació que presenten els tres compressors actuals.

Per això, el Treball de Fi de Grau estudia les possibles alternatives disponibles en el mercat per a disminuir el consum de la planta i millorar la regulació dels compressors d'alta pressió. D'aquesta forma, el projecte proposa la instal·lació d'un compressor de caragol que millore l'eficiència energètica del procés i, al seu torn, complisca amb els requisits de funcionament de la planta.

Finalment, el projecte presenta un estudi del cost de la instal·lació del compressor de caragol seleccionat i dels beneficis econòmics que s'obtindran a causa de la millora de l'eficiència obtinguda, estimant el temps que es tardarà a recuperar la inversió inicial.

Paraules claus: refrigeració, compressor, amoniac, regulació, eficiència energètica.



ABSTRACT

Final Degree Project focuses on proposing an improvement in refrigeration and liquefaction process of ammonia used in the manufacturing of nitrogenous products and ammonia solutions. The products obtained are used as fertilizers in agriculture, being essential to guarantee food supply to the population.

The project is carried out in a fertilizer production company, with a real ammonia refrigeration plant.

The refrigeration system includes: a pre-aspiration tank, three alternative low-pressure compressors, an interstage regulation tank, three high-pressure reciprocating compressors, on which the project focuses; two condensers and an ammonia accumulator; ordered according to the path followed by the interest product.

Therefore, the project analyses current operation of high-pressure compressors, calculating energy consumption and the flow rate transferred from the operating data provided by the company, which helps to comprehend regulation difficulties of the three current compressors.

For such reason, this Final Degree Project studies possible alternatives available to reduce plant consumption and improve the regulation of high-pressure compressors. According to these factors, the project focuses on the installation of a screw compressor that improves energy efficiency of the process and, in turn, complies with plant's operating requirements.

Finally, the project leads to a thorough study of the potential costs originated by the implementation of the selected screw compressor that would show an improvement in energy efficiency, also estimating the time needed to regain the initial investment.

Keywords: refrigeration, compressor, ammonia, regulation, energy efficiency.

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Presupuesto
- Anexo

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	OBJETO Y JUSTIFICACIÓN	2
1.1	Objeto del proyecto.....	2
1.2	Justificación.....	2
2.	ALCANCE.....	3
3.	ANTECEDENTES.....	4
3.1	Historia de los fertilizantes	4
3.2	Producción de amoniaco	6
3.2.1	Proceso de Haber Bosch.....	6
3.2.2	Aplicaciones del amoniaco en la industria	9
4.	NORMATIVA APLICABLE	12
5.	ESTUDIO DE LOS COMPRESORES ACTUALES	14
5.1	Funcionamiento de los compresores alternativos	14
5.2	Cálculo del caudal trasegado	17
5.3	Análisis del funcionamiento de la instalación	21
5.4	Cálculo del consumo eléctrico	29
6.	ESTUDIO DE LA INSTALACIÓN DE UN NUEVO COMPRESOR.....	33
6.1	Nueva lógica de trabajo de los compresores	34
6.1.1	Caso 1. Presión cercana al punto de consigna	34
6.1.2	Caso 2. Presión superior al PSH	35
6.1.3	Caso 3. Presión inferior al PSL	36
6.2	Descripción de los compresores de tornillo.....	36
6.3	Comparativa de las unidades compresoras	39



6.4	Estudio técnico de las propuestas de mejora	40
6.4.1	Propuesta I. Compresor helicoidal de elevado caudal	40
6.4.2	Propuesta II. Compresor helicoidal de bajo caudal	44
7.	SELECCIÓN DE LA PROPUESTA ÓPTIMA	50
8.	ESTUDIO ECONÓMICO DE LA PROPUESTA SELECCIONADA	55
8.1	Coste de la inversión.....	55
8.1.1	Materiales	55
8.1.2	Compresor helicoidal	55
8.1.3	Instrumentación eléctrica y cableado.....	56
8.1.4	Presupuesto de la inversión	56
8.2	Costes de mantenimiento.....	57
8.3	Viabilidad económica del proyecto	58
9.	CONCLUSIONES.....	60
10.	BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	ELEMENTOS DEL PRESUPUESTO	2
1.1	Tablas.....	2
2.	COSTES DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	2
2.1	Material empleado	2
2.2	Desplazamientos a la empresa.....	3
2.3	Mano de obra.....	3
2.4	Presupuesto Total.....	4

ÍNDICE DEL ANEXO

ANEXO I:	Ficha de seguridad del amoniaco	2
ANEXO II:	Plano del proceso de refrigeración del amoniaco actual	9
ANEXO III:	Oferta del compresor de tornillo por Johnson Controls	10

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Cartel publicitario del nitrato de Chile (Wikipedia, 2009)	4
Figura 3.2: Crecimiento de la población desde comienzos del siglo XIX (Worldometer, 2020)	5
Figura 3.3: Síntesis de amoníaco mediante el proceso de Haber-Bosch (García, 2019)	6
Figura 3.4: Diagrama de la síntesis del ácido nítrico (Grupo Fertiberia, 2020)	9
Figura 3.5: Diagrama de la síntesis del NAC (Grupo Fertiberia, 2020)	11
Figura 5.1: Esquema del movimiento realizado por un compresor alternativo (fierrosclasicos, 2015)	14
Figura 5.2: Diagrama de trabajo de un compresor alternativo (Fernández Díez)	15
Figura 5.3: Esquema de apertura de la válvula de succión de los compresores (Instruction Manual for SMC 186-188 Mk2, 2004)	16
Figura 5.4: Esquema de la disposición de las válvulas solenoides de los compresores actuales (Instruction Manual for SMC 186-188 Mk2, 2004)	17
Figura 5.5: Perfil y alzado de los compresores instalados (Instruction Manual for SMC 186-188 Mk2, 2004)	17
Figura 5.6: Rendimientos isoentrópico y volumétrico de un compresor alternativo en función de la tasa de compresión (Atecyr, 2020)	18
Figura 5.7: Obtención de la densidad del amoníaco a partir del diagrama p-h (ASHRAE, 1997)	19
Figura 5.8: Caudal aportado por cada etapa del compresor	21
Figura 5.9: Diferencia entre caudal demandado y caudal aportado por los compresores	23
Figura 5.10: Comparativa del caudal y la regulación de los compresores	24
Figura 5.11: Porcentaje del caudal recirculado por exceso de trasiego en los compresores	25
Figura 5.12: Presión del depósito de regulación interetapas	26
Figura 5.13: Variación de la temperatura de impulsión respecto a la presión de aspiración del interetapas	27
Figura 5.14: Consumo del compresor respecto a la presión de aspiración	27
Figura 5.15: Caudal másico del amoníaco respecto a la presión de aspiración	28
Figura 5.16: Caudal másico respecto a la intensidad del compresor	28
Figura 5.17: Consumo eléctrico para cada etapa de los compresores actuales	30
Figura 5.18: Caudal volumétrico trasegado por cada etapa para 1 kilovatio consumido	30
Figura 5.19: Gasto económico producido por la compresión de 1 m ³ /h de amoníaco	31
Figura 6.1: Fluctuación de la presión del depósito interetapas junto al caudal de los compresores de alta	33
Figura 6.2: Oscilación en torno al punto de consigna establecido	35

Figura 6.3: Variación de la presión para la nueva lógica en el caso de sobrepasar el PSH	35
Figura 6.4: Variación de la presión para la nueva lógica en el caso de sobrepasar el PSL.....	36
Figura 6.5: Compresor de tornillo Lysholm (C. Whitman & M. Johnson, 2000)	37
Figura 6.6: Compresor de tornillo con regulación de la carga mediante válvula deslizante (Fernández Díez)	38
Figura 6.7: Rendimientos isoentrópico y volumétrico de un compresor alternativo en función de la tasa de compresión (Atecyr, 2020).....	39
Figura 6.8: Obtención de los ángulos de la curva de presión en el depósito de regulación interetapas	44
Figura 6.9: Comportamiento de la presión del depósito de interetapas para cada posibilidad de trabajo en la planta.....	46
Figura 6.10: Comparativa de la presión del equipo para los dos compresores estudiados.....	47
Figura 7.1: Comparación del gasto económico producido por la compresión de 1 m ³ /h de amoníaco	51
Figura 7.2: Comparación del gasto por hora de los compresores propuestos y la instalación actual...	53
Figura 7.3: Coste total de cada propuesta para un año de trabajo	53
Figura 7.4: Croquis de la ubicación disponible para el compresor propuesto	54
Figura 8.1: Gasto producido por el mantenimiento de los compresores alternativos.	57



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Promedios trimestrales del caudal másico y volumétrico trasegado por los compresores.	19
Tabla 5.2: Obtención del rendimiento de los compresores a partir del caudal real por trimestres	20
Tabla 5.3: Precios del megavatio en 2019 (CNMC, 2019)	31
Tabla 5.4: Obtención del coste trimestral de los compresores en funcionamiento.....	32
Tabla 6.1: Selección de compresores de tornillo de gran caudal (SABROE® PRODUCTS, 2019)	41
Tabla 6.2: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 233 E	42
Tabla 6.3: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 233 L	42
Tabla 6.4: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 233 S	43
Tabla 6.5: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 120E	48
Tabla 6.6: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 120 L	48
Tabla 7.1: Datos de los compresores seleccionados (SABROE® PRODUCTS, 2019)	50
Tabla 7.2: Datos de caudal y potencia de los compresores estudiados	50
Tabla 7.3: Comparativo de consumos para cada trimestre con un compresor SAB 120 L	51
Tabla 7.4: Comparativo de consumos para cada trimestre con un compresor SAB 233 S	52
Tabla 7.5: Comparativo de consumos para cada trimestre con un compresor SAB 233 L	52
Tabla 8.1: Coste de los materiales complementarios para el compresor de tornillo.....	55
Tabla 8.2: Resumen del presupuesto del compresor de tornillo propuesto.....	56
Tabla 8.3: Flujos de caja de los próximos 5 años	58



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA

MEMORIA



1. OBJETO Y JUSTIFICACIÓN

1.1 Objeto del proyecto

El presente Trabajo de Fin de Grado (en adelante, TFG) tiene como objeto el estudio y la mejora del proceso de refrigeración del amoníaco empleado en la fabricación de productos químicos, necesarios para la obtención de fertilizantes. Dicho estudio, permitirá conocer las carencias que presentan los compresores actuales, con el diseño de mejorar el rendimiento de la instalación.

Por ello, la finalidad del presente proyecto es proponer una posible alternativa que sea viable técnica y económicamente para la empresa, con el propósito de reducir el consumo energético del proceso de refrigeración, así como reducir las intervenciones de mantenimiento en las unidades compresoras de amoníaco.

1.2 Justificación

El amoníaco anhidro es la base principal para la fabricación de los fertilizantes nitrogenados. En la empresa, el consumo anual de NH_3 supera las 150.000 toneladas por lo que es imprescindible disponer de una instalación enfocada en mantener el producto en las condiciones de trabajo necesarias.

En consecuencia, la justificación del proyecto surge de la necesidad de llevar a cabo una mejora tecnológica en el proceso de refrigeración del amoníaco, proponiendo una solución eficiente para las dificultades presentes en la instalación. Asimismo, el proyecto presenta una justificación académica, cumpliendo el requisito establecido por el Grado de Ingeniería Química de redactar un trabajo de carácter profesional relacionado con la materia estudiada.

2. ALCANCE

El alcance del presente proyecto se recoge en los siguientes apartados:

- Analizar el funcionamiento actual de la planta de refrigeración del amoniaco.
- Calcular el caudal trasegado por la instalación para los últimos tres años.
- Obtener el rendimiento de los compresores en funcionamiento para cada trimestre estudiado.
- Estudiar la problemática asociada a la presión en el depósito de regulación interetapas y la temperatura de impulsión de las unidades compresoras.
- Calcular el consumo energético de los compresores instalados.
- Explicar el funcionamiento de los compresores de tornillo propuestos como mejora, así como las soluciones que ofrecen para las deficiencias actuales.
- Comparar la regulación de los modelos propuestos y seleccionar aquel que optimice el proceso de refrigeración del amoniaco.
- Realizar un estudio económico que incluya los costes de instalación y funcionamiento del equipo propuesto.
- Calcular el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial.

3. ANTECEDENTES

3.1 Historia de los fertilizantes

Los fertilizantes han estado presentes a lo largo de la historia para facilitar y mejorar el desarrollo de la agricultura. Desde el nacimiento de la agricultura, hace miles de años, se han ido perfeccionando las técnicas de fertilización de cultivos para aumentar el rendimiento de la producción agrícola.

En sus inicios, los agricultores más primitivos descubrieron la importancia del suelo en el que se cultivaba, así como la necesidad de añadir fertilizantes orgánicos como el estiércol o residuos vegetales para recuperar la fertilidad del suelo cultivado.

Las técnicas de fertilización fueron evolucionando conforme surgían nuevas poblaciones. Las culturas egipcias, romanas y griegas recogen descripciones del uso de fertilizantes orgánicos para la agricultura. Hasta principios del siglo XIX se creía que el único método de fertilización era el hummus. Este modelo de abonado no daba los resultados que se conocen en la actualidad, causando épocas de pobreza y crisis de hambre debido a la constante pérdida de cosechas (Finck, 1988).

Con el inicio del siglo XIX surgieron nuevas ideas sobre el desarrollo de los cultivos, observando la necesidad de los fertilizantes y la rotación de las labranzas agrícolas. Cabe destacar la aparición del conocido Nitrato de Chile (*Figura 3.1*) en el año 1830, consiguiendo una gran aportación a la agricultura de Occidente. El yacimiento de salitre se encontraba en el árido desierto de Atacama debido a la acumulación durante un largo periodo de tiempo de materiales salinos (NO_x , HNO_3 y NH_3). La escasez de plantas en la zona permitió el acopio de nitratos en los suelos. La localización de la explotación de salitre provocó un conflicto armado entre Bolivia, Perú y Chile denominado la *Guerra del Pacífico* (1879-1884) para controlar la explotación del producto puesto que, además de emplearse como fertilizante nitrogenado, se usaba para la fabricación de pólvora. La ayuda de las tropas británicas permitió a Chile controlar el yacimiento de salitre y su explotación.



Figura 3.1: Cartel publicitario del nitrato de Chile (Wikipedia, 2009)

El fuerte desarrollo producido por los fertilizantes a finales del siglo XIX y principios del siglo XX se puede explicar mediante el crecimiento demográfico de la población mundial. Desde la Revolución Industrial, la calidad de vida de los habitantes ha mejorado considerablemente. Así pues, el número de habitantes ha aumentado un 600% a partir del inicio del siglo XIX. Además, las previsiones para dentro de 40 años intuyen una tendencia de crecimiento constante, llegando a los 10 mil millones de habitantes.

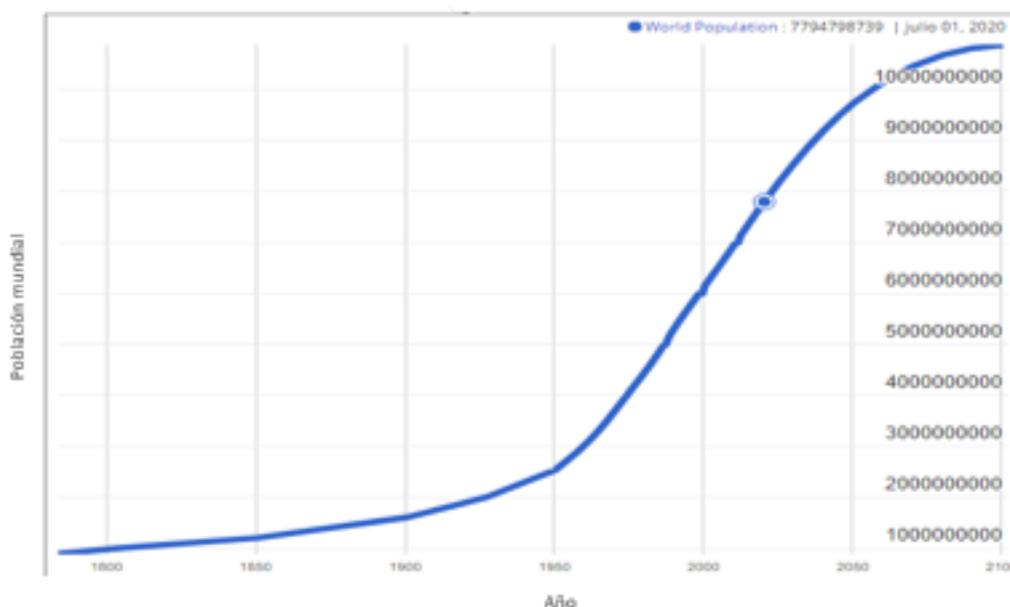


Figura 3.2: Crecimiento de la población desde comienzos del siglo XIX (Worldometer, 2020)

Para incrementar, según las necesidades que plantea la sociedad, la producción en la agricultura existen dos posibilidades:

- Aumentar los terrenos de cultivo, siendo esta posibilidad muy remota debido a los problemas territoriales ocasionados por la superpoblación.
- Aumentar el rendimiento de la producción agrícola empleando fertilizantes que proporcionen los nutrientes necesarios para el próspero crecimiento de los cultivos.

Esta última opción es la única posibilidad viable en vista de la progresión que se estima para la sociedad mundial. Económicamente, el uso de fertilizantes químicos permite un gran ahorro para los agricultores, además de ser la opción más favorable para evitar una problemática ambiental excesiva. En los últimos años, miles de hectáreas de bosques forestales se han visto afectadas para dar lugar a zonas de cultivos, provocando una deforestación irreparable en el medio ambiente.

Los fertilizantes, siempre que sean usados de una forma racional, contribuyen a mejorar el rendimiento de las cosechas, consiguiendo mayores producciones y de mayor calidad. De esta manera, la producción de fertilizantes a partir de procesos industriales se ha convertido en un requisito fundamental para la sostenibilidad de los cultivos agrícolas (Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes, 2012).

3.2 Producción de amoniaco

La producción de amoniaco se ha desarrollado notoriamente durante las últimas décadas. Su producción anual supera los 120 millones de toneladas (t) en todo el mundo, produciéndose entre 1000 y 2000 t de amoniaco diarias en las plantas modernas actuales.

El transporte de amoniaco se realiza mediante vagones de ferrocarril presurizados, tuberías de distancias largas y, en su gran mayoría, vía marítima a través de barcos refrigerados. Para garantizar las medidas de seguridad, así como para reducir el espacio, el NH_3 transportado se encuentra en estado líquido a una temperatura inferior a su punto de ebullición ($33\text{ }^\circ\text{C}$ bajo cero) en condiciones de presión atmosférica (International Plant Nutrition Institute, 2020).

3.2.1 Proceso de Haber Bosch

El salitre procedente del desierto de Atacama estaba controlado por Inglaterra, bloqueando la venta de productos a Alemania con el comienzo de la Primera Guerra Mundial. Este hecho promovió la investigación por parte de los científicos alemanes para la síntesis de nitratos sintéticos. Los científicos Fritz Haber y Carl Bosch lograron desarrollar un método de síntesis amoniacal a nivel industrial mediante altas presiones (Navarro & Navarro, 2014).

El proceso de Haber-Bosch (*Figura 3.3*) se lleva a cabo empleando gas natural como fuente de hidrógeno. Esto se debe a la relación C/H favorable de la materia prima, así como al alto poder calorífico y su reducido precio. Además, se emplea el aire atmosférico para el aporte de nitrógeno necesario en la reacción.

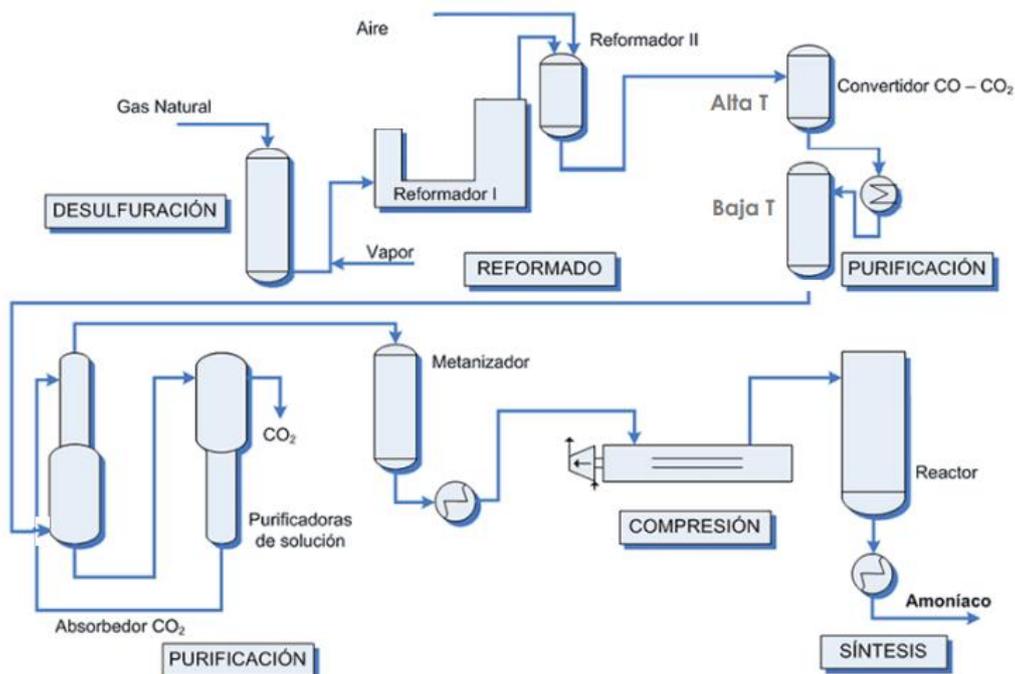
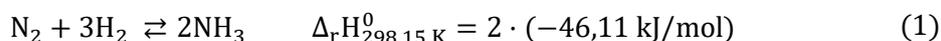


Figura 3.3: Síntesis de amoniaco mediante el proceso de Haber-Bosch (García, 2019)

El fundamento de la producción de amoníaco se basa en la relación directa entre el hidrógeno y el nitrógeno de acuerdo con la siguiente ecuación de equilibrio:



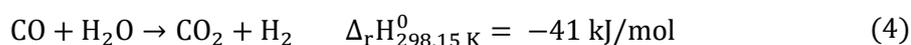
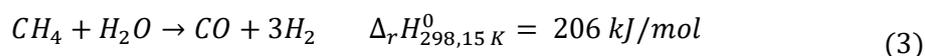
Las principales condiciones teóricas que optimizan el equilibrio implican la aplicación de presiones elevadas, de una temperatura lo más baja posible y la utilización del catalizador activo hierro α .

En la unidad de producción del amoníaco a partir del gas natural, se puede distinguir siete etapas (García, 2019):

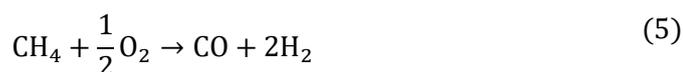
- En primer lugar, se produce la **desulfuración** del gas natural. En la mayor parte de los casos, los gases naturales contienen concentraciones bajas de azufre residual o bien contienen trazas olorosas como el tetrahidrotiofeno. Para eliminar correctamente los compuestos de azufre, se realiza una hidrodesulfuración mediante unas condiciones de trabajo de 400 °C y una presión entre 20 y 40 bar.



- En segundo lugar, se produce el **reformado primario**. El reformado del metano se produce aportando un flujo de vapor de agua con una temperatura de entrada de 520 °C, saliendo a una temperatura cercana a los 800 °C. El catalizador empleado es a base de níquel soportado sobre Al_2O_3 y cargado bajo forma de óxido, previamente reducido. El monóxido de carbono producido en el reformado se emplea para aumentar la producción de hidrógeno. La concentración de metano (CH_4) tras las reacciones producidas es del orden del 11%.

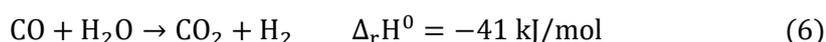


- En tercer lugar, se produce la **post-combustión** o también denominado **reformado secundario**. En esta etapa se produce la introducción del aire atmosférico para la combustión parcial del metano residual, reduciendo su concentración hasta el 0,3%. Además, se produce el aporte de nitrógeno necesario para que tenga lugar la síntesis del amoníaco en etapas posteriores. El gas reformado entra en el reactor a una temperatura de 800 °C junto al aire a 550 °C. La presión de trabajo es cercana a los 30 bar y la temperatura de salida del gas es de 995 °C.



Un ejemplo de composición típica obtenida en la salida de esta etapa sería el siguiente: H_2 56,1%; $\text{N}_2 + \text{Ar}$ 22,7%; CO 12,9%; CO_2 8%; CH_4 0,3%.

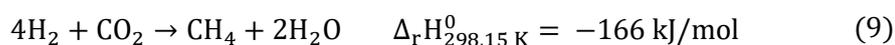
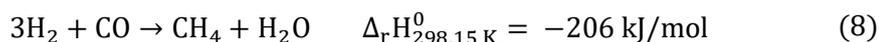
- En cuarto lugar, se produce la **conversión de CO**, realizándose en dos etapas diferenciadas por la temperatura empleada. La primera conversión se realiza a una temperatura próxima a los 450 °C, siendo el óxido de hierro, Fe_2O_3 , el catalizador activado por el óxido de cromo, Cr_2O_3 . La segunda conversión se realiza a temperaturas cercanas a los 250 °C, en la que se emplea como catalizadores los óxidos de cobre y zinc soportados sobre alúmina. La reacción producida en ambas conversiones es exotérmica, por lo que es necesario trabajar a temperaturas moderadas. Tras la conversión del monóxido de carbono, el flujo gaseoso contiene principalmente nitrógeno e hidrógeno, CO_2 y trazas de CO (0,25%).



- En quinto lugar, se produce la **descarbonatación**. De esta manera, a partir de un proceso químico, se consigue eliminar el dióxido de carbono producido en la etapa anterior mediante una absorción en contracorriente, sometida a temperaturas de 60 y 100°C y condiciones de presión. La concentración de CO_2 obtenida en la corriente de interés a la salida del proceso es inferior al 0,15%.



- En sexto lugar, se produce la **metanación**. El objetivo de esta etapa es la eliminación de las trazas de compuestos oxigenados para evitar la corrosión de los catalizadores. De esta manera, se transforman los compuestos CO y CO_2 presentes en el flujo gaseoso mediante las reacciones inversas al reformado, obteniendo un gas inerte como es el metano:



Las reacciones (8) y (9) tienen lugar bajo condiciones de temperaturas cercanas a los 320 °C y presiones de 25 bar, empleando un catalizador constituido de óxido de níquel depositado sobre alúmina.

- Por último, se produce la **síntesis del amoniaco**, *reacción (1)*. Los procesos anteriores tenían el objetivo de purificar el flujo gaseoso para optimizar el proceso de obtención de amoniaco. Así pues, la corriente final es una mezcla gaseosa que contiene, principalmente, hidrógeno (74,09%) y nitrógeno (24,74%), además de trazas de metano (0,87%), argón (0,30%) y una concentración de compuestos oxigenados (CO, CO₂) inferior a 10 ppm. La mezcla se comprime de 25 bar, a presiones comprendidas entre 100 y 250 bar. Lo que se pretende es reducir la temperatura de reacción para poder trabajar a menores presiones y, de esta manera, optimizar la función de los agentes catalizadores (hierro α combinado con pequeñas cantidades de promotores). Las temperaturas de trabajo están comprendidas entre 380 °C y 450 °C.

3.2.2 Aplicaciones del amoniaco en la industria

El amoniaco (NH₃) es la base de las industrias dedicadas a la fabricación de los fertilizantes nitrogenados. Más del 80% de la producción de NH₃ se emplea en fertilizantes, tanto para aplicación in situ en la plantación agrícola como en el desarrollo de distintas variedades de fertilizantes sólidos y líquidos.

Así pues, en la industria fertilizante, el amoniaco se emplea en la síntesis de urea, de nitratos amónicos, sulfatos amónicos y fosfatos amónicos, productos de interés para el sector agrícola.

En el caso de Fertiberia S.A., empresa donde se realiza el proyecto, el amoniaco se emplea para la síntesis del ácido nítrico mediante el proceso Ostwald que, posteriormente, se utilizará para la producción de nitratos amónicos. Dicho proceso se representa a través del siguiente diagrama:

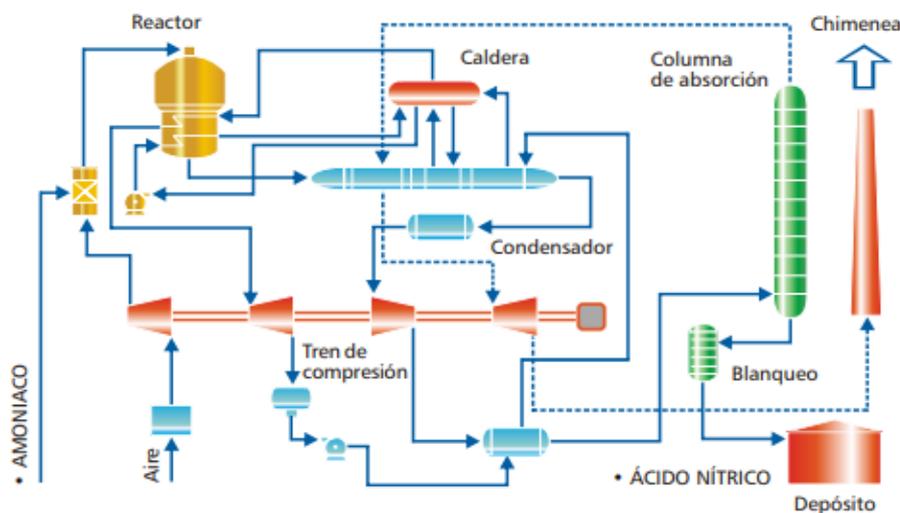
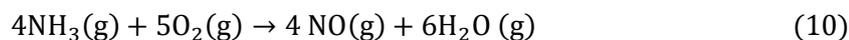


Figura 3.4: Diagrama de la síntesis del ácido nítrico (Grupo Fertiberia, 2020)

En primer lugar, el amoníaco se oxida catalíticamente por el aire primario introducido en el reactor:

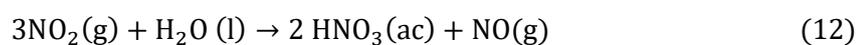


La *reacción (10)* es muy exotérmica ($\Delta H = -905,5$ kJ/mol), siendo necesaria la refrigeración posterior al reactor, lo que permite la recuperación del vapor formado.

El flujo gaseoso formado se mezcla con aire secundario, produciéndose la siguiente reacción:



El dióxido de nitrógeno obtenido se introduce en la columna de absorción por etapas, haciendo pasar una corriente de agua en contracorriente, produciéndose de esta manera el ácido nítrico 60%:



En la absorción, tal y como muestra la *reacción (12)*, solamente dos tercios del nitrógeno se han transformado en ácido nítrico, quedando un tercio transformado en monóxido de nitrógeno que se recircula de nuevo para que se produzca la *reacción (11)*. El ácido nítrico obtenido no puede superar concentraciones del 70% puesto que se produciría la reacción inversa:



En la fábrica de Sagunto se obtienen, anualmente, unas 300.000 toneladas de ácido nítrico, transformadas posteriormente en nitratos amónicos NAC 22, NAC 27 y NA 33,5 que, conjuntamente, supone una producción anual de 500.000 toneladas en NAC 27 equivalente (Grupo Fertiberia, 2020). La producción de nitrato amónico se lleva a cabo a partir de la neutralización del ácido nítrico con amoníaco, de acuerdo con la siguiente reacción:



El nitrato de amonio se utiliza como fertilizante por su alto contenido en nitrógeno. El nitrato es aprovechado directamente por las plantas mientras que el amonio es oxidado por los microorganismos presentes en el suelo, convirtiéndose en nitritos o nitratos que se emplearán como abono durante un mayor periodo de tiempo.

La síntesis tiene lugar en un reactor, produciéndose vapor de proceso y vapor puro que debe recircularse para su aprovechamiento, disminuyendo la cantidad de vapores generados como residuos y mejorando la eficiencia de la planta.

Una vez obtenido el nitrato amónico se produce la granulación mediante la adición de caliza molida. De esta manera, se obtiene un fertilizante con forma de grano pequeño que permitirá su solubilidad en los cultivos agrícolas.

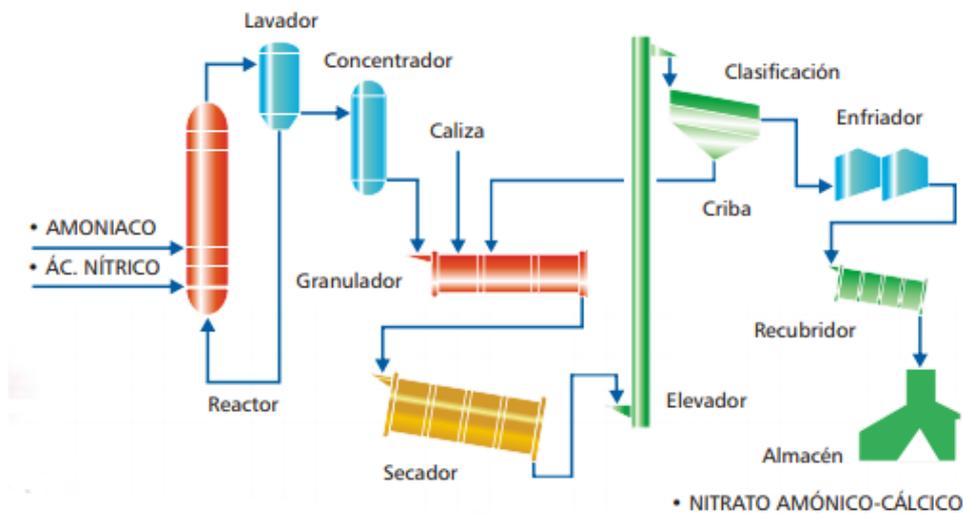


Figura 3.5: Diagrama de la síntesis del NAC (Grupo Fertiberia, 2020)

Los nitratos amónicos producidos se almacenan a granel en dos silos con capacidad para 40.000 toneladas cada uno de ellos. Estos productos son conducidos a la planta de ensacado y carga de graneles para su expedición.

4. NORMATIVA APLICABLE

A continuación, se recoge la normativa vigente aplicable a la elaboración del presente proyecto:

- *Normativa de honestidad académica*, aprobada en Junta de Escuela de 15 de julio de 2014, para la escuela técnica superior de ingenieros industriales de Valencia.
- *Directrices sobre la presentación de Trabajo Final de Grado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales*
- *Normativa Marco de Trabajos Fin de Grado y Fin de Máster, refundido de los acuerdos de Consejo de Gobierno de 7 de marzo de 2013, 21 de enero de 2015 y 28 de mayo de 2015, para la Universidad Politécnica de Valencia.*
- *American Psychological Association, Formato APA*, para referenciar citas en el trabajo de manera clara y concisa.

Asimismo, se describe la normativa vigente aplicable al proceso de refrigeración estudiado en el presente proyecto, así como a la actualización propuesta en la instalación actual de la empresa:

- *Ley 21/1992*, de 16 de julio, de Industria.
- *Reglamento 166/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo*, de 18 de enero, relativo al establecimiento de un registro europeo de emisiones y transferencia de contaminantes.
- *Reglamento (CE) 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo*, de 18 de diciembre de 2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de la sustancias y preparados químicos (REACH).
- *Real Decreto 2060/2008*, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.
- *Ley 27/2014*, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades, concretamente el artículo 12, Correcciones de valor: amortizaciones.
- *Real Decreto Legislativo 1/2016*, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Prevención y control integrados de la Contaminación, concretamente el apartado 4.2 del ANEJO I.
- *Real Decreto 656/2017*, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10, concretamente la instrucción MIE APQ-4 «Almacenamiento de amoniaco anhidro».

Por último, la normativa vigente en asuntos de riesgos laborales y salud de los trabajadores de la fábrica para la instalación analizada se describe a continuación:

- *Ley 31/1995*, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- *Real Decreto 485/1997*, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.



- *Real Decreto 773/1997*, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- *Real Decreto 1215/1997*, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- *Real Decreto 1627/1997*, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción.
- *Real Decreto 374/2001*, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- *Real Decreto 842/2002*, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- *Real Decreto 2267/2004*, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
- *Real Decreto 286/2006*, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- *Real Decreto 330/2009*, de 13 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.
- *Real Decreto 513/2017*, de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios.

5. ESTUDIO DE LOS COMPRESORES ACTUALES

5.1 Funcionamiento de los compresores alternativos

Para comprender como funcionan los compresores instalados en la planta, es necesario entender el comportamiento del fluido trasegado. Los gases son fluidos que no presentan forma ni volumen propio, cuyas moléculas tienden a expandirse indefinidamente. Cuando un gas se encuentra contenido en un volumen, las moléculas que lo conforman golpean las paredes del recipiente.

Enunciando la primera ley de la termodinámica, la energía ni se crea ni se destruye, se transforma. Los compresores emplean energía eléctrica, la cual se transforma en energía de flujo, aumentando la presión y la energía cinética del fluido circulante. De la misma manera, la ley de Boyle permite entender el aumento de la presión. Según Boyle, el volumen de una masa fija de gas es inversamente proporcional a la presión que este ejerce, para una temperatura constante. Por tanto, reduciendo el volumen del fluido, la presión aumentará. A pesar de que no se trabaje con un gas ideal, el comportamiento del fluido se puede describir como tal, aplicando diversos factores de compresibilidad.

Los compresores se encargan de aportar energía al fluido trasegado, aumentando la presión considerablemente. Para ello, los compresores alternativos disponen de un sistema mecánico formado por un cigüeñal, un émbolo dentro de un cilindro y una biela.

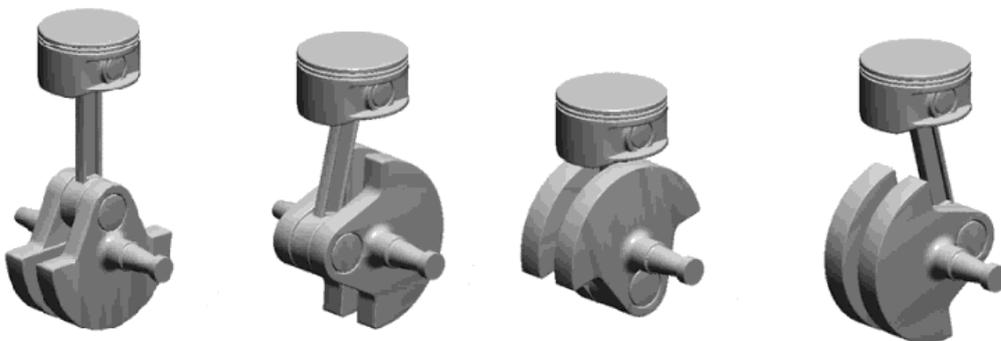


Figura 5.1: Esquema del movimiento realizado por un compresor alternativo (fierrosclasicos, 2015)

El movimiento descrito (*Figura 5.1*) está compuesto por cuatro etapas: aspiración, compresión, descarga y expansión. La entrada y salida del fluido se produce a través de las válvulas antirretorno de admisión y descarga, imponiendo un flujo unidireccional. Así pues, el fluido entra en el cilindro del compresor a medida que el pistón retrocede. Cuando el cigüeñal ha completado media revolución, el pistón se encuentra en su posición más alejada de la parte superior del cilindro, por lo que el volumen de fluido en el interior es máximo. El eje sigue rotando, permitiendo que el pistón recupere la posición inicial. De esta manera, el sistema mecánico del compresor aporta energía al fluido al reducir su volumen, aumentando así la presión y la energía cinética del mismo. Para que se produzca la descarga, la presión en el interior del cilindro debe ser superior que la presión en la línea de descarga, permitiendo la apertura de la válvula.

El diseño del compresor implica que, cuando el pistón finalice la carrera de compresión, el recorrido no es completo por motivos físicos y se genera un espacio entre el pistón y el fondo del cilindro y las lumbreras de las válvulas, denominado volumen muerto. El volumen residual se encuentra a la presión de descarga por lo que, hasta que no se produzca la expansión hasta un valor de presión inferior al de la línea de admisión, la válvula que permite la entrada del fluido permanecerá cerrada. Este suceso se aprecia de manera gráfica en la *Figura 5.2*.

El retraso en la apertura de la válvula de admisión reduce el volumen del fluido en el interior del cilindro, puesto que parte de la carrera de admisión se ha empleado en llevar a cabo la expansión del volumen muerto. Este hecho supone una cantidad comprendida entre el 4% y el 16% del volumen total desplazado para los compresores más comunes.

El volumen muerto es la causa principal de la disminución del volumen desplazado, afectando negativamente a la eficiencia volumétrica del compresor. Dicha eficiencia también se ve afectada, en menor medida, por otros motivos presentes como son las pérdidas de carga, un calentamiento indebido por el rozamiento entre el cilindro y el pistón, las fugas que se puedan producir por el desgaste del equipo y una lubricación del sistema mecánico ineficaz (Bloch & Hoefner, 1996).

Para reducir los problemas ocasionados por el rozamiento del sistema mecánico se dispone de un sistema interno de refrigeración. Los compresores alternativos, tanto de alta como de baja presión, disponen de un flujo continuo de agua en su interior que se encarga de extraer de manera eficaz el calor generado en el proceso de compresión del amoniaco, aumentando la vida útil del equipo y reduciendo las paradas por motivos de sobrecalentamiento.

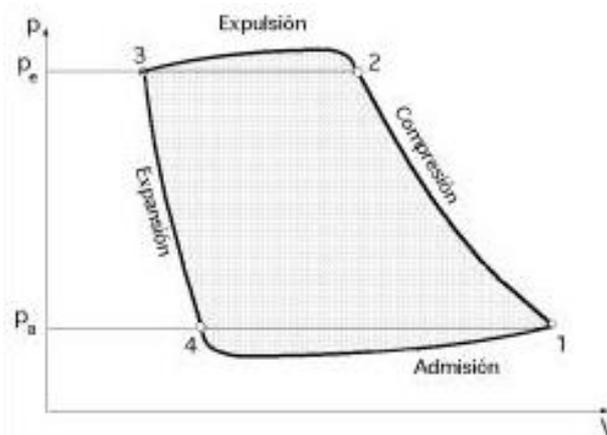


Figura 5.2: Diagrama de trabajo de un compresor alternativo (Fernández Díez)

Los compresores alternativos presentan unas presiones y temperaturas de aspiración e impulsión estables y una velocidad de giro constante, ofreciendo una carga determinada. Debido a las necesidades productivas de la empresa, explicadas posteriormente en el *apartado 5.3*, el proceso debe adaptarse para ser capaz de ofrecer distintas cargas. Es por eso que los compresores actualmente instalados disponen de tres etapas de carga distinta para trabajar, siendo 50%, 75% Y 100%. Asimismo,

presentan la posibilidad de trabajar a una carga del 25% la cual se emplea únicamente en el arranque del compresor, ya que no es recomendable su uso para régimen estacionario.

La regulación de la carga se realiza por medio de una serie de electroválvulas, representadas esquemáticamente en la *Figura 5.3*. Mediante una corriente eléctrica que circula a través de una bobina solenoide, se genera un campo electromagnético en su interior. Dicho campo produce una fuerza magnética que acciona el movimiento de la válvula. En el momento que se detiene la corriente eléctrica aplicada a la bobina, la electroválvula recupera su posición inicial mediante un resorte. Cada válvula solenoide está conectada a un par de cilindros del compresor, regulando de esta manera la carga de las etapas en función de las necesidades de la planta.

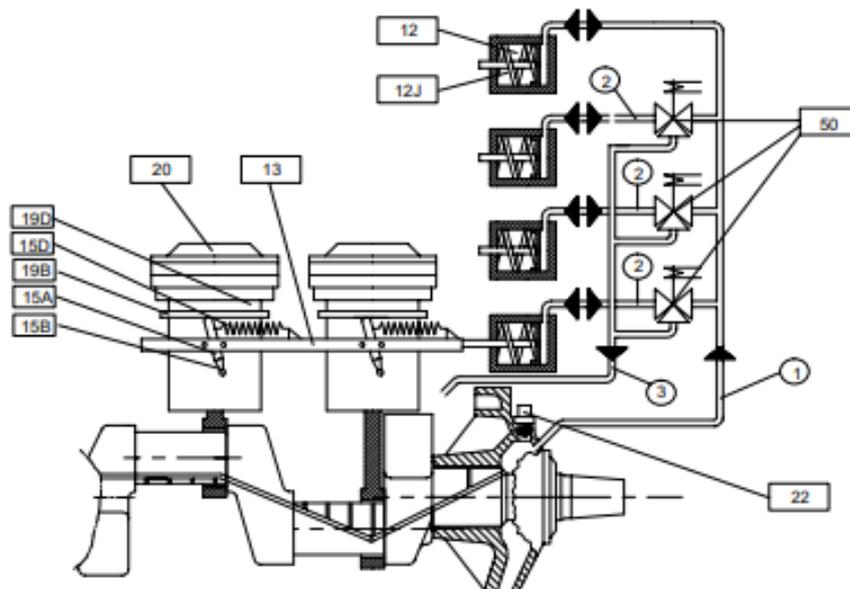


Figura 5.3: Esquema de apertura de la válvula de succión de los compresores (Instruction Manual for SMC 186-188 Mk2, 2004)

Así pues, en el caso de que la electroválvula se encuentre desactivada y, por tanto, la etapa que regula esté parada, los resortes (núm. 12J) descritos en la *Figura 5.3* empujan el bastidor (núm. 13). La fuerza generada se localiza en el tensor (núm. 15D), que logra elevar los balancines (núm. 15A). Este movimiento produce un alivio en los pernos (núm. 19B) que permite abrir la válvula de succión por completo.

En el interior del cilindro, los pistones se mantienen en funcionamiento puesto que, por el diseño del compresor, no es posible detener el trabajo mecánico realizado únicamente en una etapa. La apertura de la válvula de admisión permite la entrada del amoníaco sin llevar a cabo la compresión del fluido. Es por ello que, a pesar de que los pistones sigan en funcionamiento en una etapa que no se encuentra activa, la energía transmitida al fluido es mucho menor por lo que el consumo eléctrico se ve reducido. El empuje que genera el pistón invierte el sentido, generando un flujo de amoníaco en sentido inverso a través de la línea aspiración.

Cabe destacar que el compresor dispone de una válvula solenoide denominada “S”, la cual se encarga del proceso de descarga total del compresor, logrando una capacidad de carga del 0% durante un corto periodo de tiempo. La electroválvula “S” no debe estar involucrada en la regulación habitual del compresor puesto que existe un riesgo de calentamiento al no trasegar ningún fluido durante su funcionamiento. La regulación de la etapa de carga, tanto para activación y desactivación, debe seguir un orden establecido. Tal y como se muestra en la *Figura 5.4*, la descarga del compresor se basa en la secuencia (1-2-3-S), mientras que la carga debe seguir un orden inverso, (S-3-2-1).

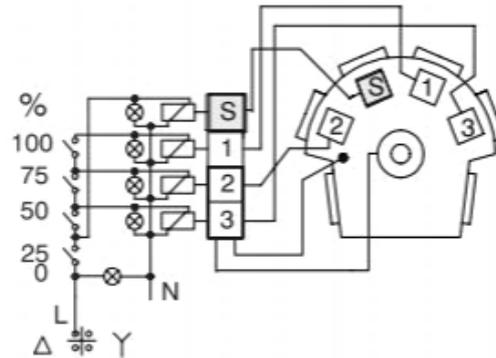


Figura 5.4: Esquema de la disposición de las válvulas solenoides de los compresores actuales (Instruction Manual for SMC 186-188 Mk2, 2004)

5.2 Cálculo del caudal trasegado

En el caso de los compresores alternativos instalados actualmente en la empresa, se conocen las siguientes características:

- Modelo: Sabroe SMC 188
 - Carrera = 140 mm
 - Diámetro pistón = 180 mm
 - Numero de pistones = 8
 - Revoluciones = 1000 rpm
 - Peso= 2840 Kg
 - Tasa de compresión = [3,75 – 4,35]

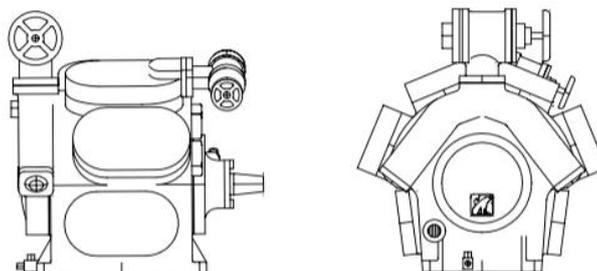


Figura 5.5: Perfil y alzado de los compresores instalados (Instruction Manual for SMC 186-188 Mk2, 2004)

La relación de compresión expresa el cociente entre la presión absoluta obtenida en la descarga del fluido y la presión absoluta en la aspiración. El fabricante indica un intervalo de la relación de compresión, por lo que se elige el valor más desfavorable, siendo $e_c = 4,35$.

La cilindrada total de cada compresor se obtiene a partir de la siguiente ecuación, suponiendo que el diámetro del pistón es el mismo que el diámetro del cilindro:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot z \cdot L = 0,0285 \text{ m}^3 \quad (15)$$

Donde D es el diámetro del pistón, z la carrera y L el número de pistones que forman el compresor.

Por tanto, el volumen desplazado, V_D , es igual a la cilindrada total multiplicado por el número de revoluciones:

$$V_D = V \cdot n = 28,5 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \equiv 1710 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (16)$$

El volumen desplazado en la ecuación (16) no es el caudal real que se obtiene en la línea de descarga. Tal y como se muestra previamente en la Figura 5.2, debido al volumen muerto se obtiene una cantidad de fluido residual que debe expandirse para permitir la entrada del amoniaco que circula por la línea de admisión. La diferencia entre el volumen desplazado teórico y el volumen real trasegado se expresa a través del rendimiento volumétrico.

A partir de una parametrización promedio obtenida mediante el programa *Atecyr*, se ha calculado gráficamente una aproximación certera del rendimiento volumétrico que deberían mostrar los compresores de pistón, siendo $\eta_v = 87\%$.

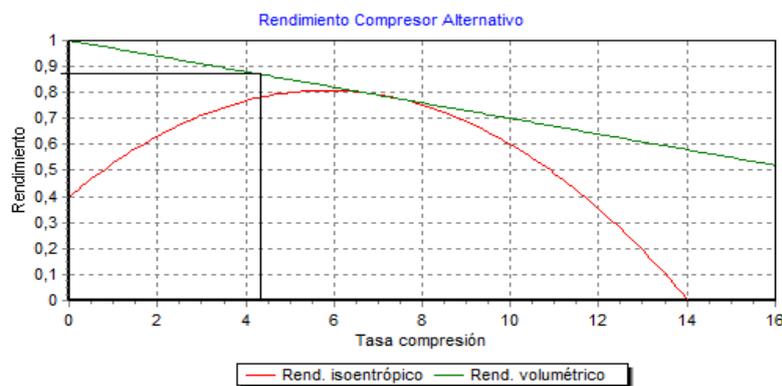


Figura 5.6: Rendimientos isoentrópico y volumétrico de un compresor alternativo en función de la tasa de compresión (*Atecyr*, 2020)

De manera experimental, el rendimiento volumétrico de los compresores se expresa como:

$$\eta_v = \frac{V_D - V_{\text{muerto}}}{V_D} = \frac{Q_{\text{real}}}{V_D} \quad (17)$$

Para poder obtener el rendimiento volumétrico, se dispone de los datos de caudal aportado por los tres compresores de alta presión durante los meses comprendidos entre abril de 2017 y junio de 2019, ambos inclusive. Los datos recogidos muestran el caudal másico del amoniaco, en kg/h, por lo que se debe conocer la densidad del amoniaco (kg/m^3) para poder trabajar en unidades de caudal, m^3/h . Conociendo los datos de presión en la línea de entrada, 3,53 bar, así como la temperatura de aspiración, 0°C , es posible determinar la densidad del fluido empleando una resolución visual a partir del gráfico p-h del amoniaco, tal y como se describe en la *Figura 5.6*.

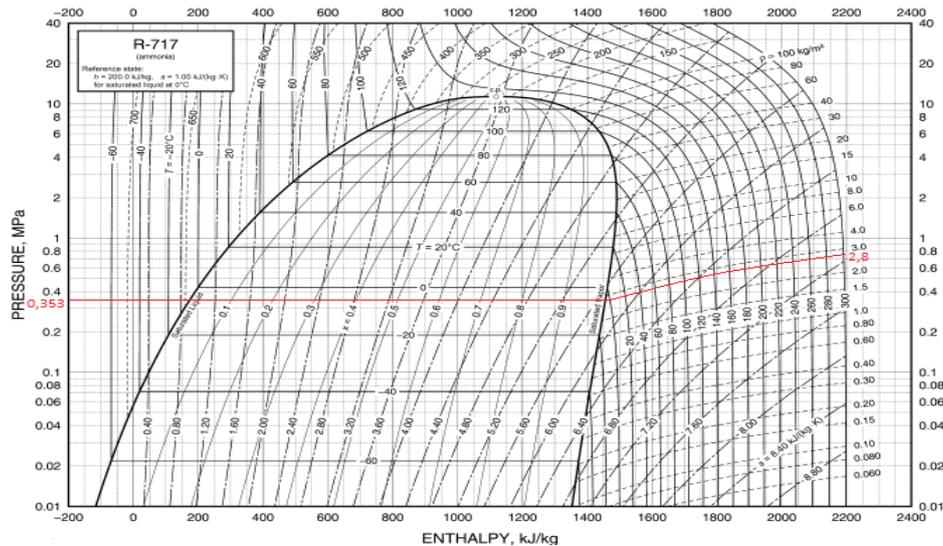


Figura 5.7: Obtención de la densidad del amoniaco a partir del diagrama p-h (ASHRAE, 1997)

La estimación de la densidad a partir del gráfico es muy visual, pero demasiado imprecisa. Por ello, se ha empleado el programa *Atecyr* para calcular el volumen específico del amoniaco dadas las condiciones descritas, siendo $v = 0,3567 \text{ m}^3/\text{kg}$. La densidad se obtiene como:

$$\rho = \frac{1}{v} = 2,803 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (18)$$

Por tanto, el caudal volumétrico se obtiene a partir del caudal másico, simplemente dividiéndolo entre la densidad calculada en la *ecuación (18)*.

Tabla 5.1: Promedios trimestrales del caudal másico y volumétrico trasegado por los compresores.

Fecha	Caudal másico (Kg/h)	Caudal volumétrico (m^3/h)
Abril-Junio 2017	6213	2216,55
Julio-Septiembre 2017	7924	2826,97
Octubre-Diciembre 2017	4193	1495,90
Enero-Marzo 2018	3484	1242,95
Abril-Junio 2018	4644	1656,80
Julio-Septiembre 2018	9296	3316,45
Octubre-Diciembre 2018	4827	1722,08
Enero-Marzo 2019	3956	1411,34
Abril-Junio 2019	4864	1735,28

Así pues, la *Tabla 5.1* refleja la media del caudal real que trasiegan los compresores que se encuentran en funcionamiento para cada trimestre. Como bien se puede apreciar, la demanda de la planta varía sustancialmente según la época del año. Además de dicha variación, dentro de cada trimestre se entiende que el caudal no es constante, existiendo picos y descensos de caudal a lo largo del trimestre. Este hecho implica que la regulación propuesta de los compresores debe contener un margen de trasiego.

Por ello, a los datos experimentales recogidos en la *Tabla 5.1* se les aplica un coeficiente de seguridad del 10% para evitar problemas de abastecimiento de la planta. Teniendo en cuenta el coeficiente mencionado, se calcula el número de compresores que se encuentran en funcionamiento y la regulación que presentan para ser capaces de trasegar el volumen de amoniaco demandado por la planta. Conociendo las etapas activas para cada compresor, se obtiene el volumen ideal que trasegarían las unidades compresoras, siendo este valor V_D . De este modo, aplicando la fórmula descrita en la *ecuación (17)* para cada trimestre estudiado, se obtiene el rendimiento volumétrico de la instalación.

Tabla 5.2: Obtención del rendimiento de los compresores a partir del caudal real por trimestres

Fecha	$Q_{\text{volumétrico}} \text{ (m}^3/\text{h)}$	$Q_{\text{seguridad}} \text{ (m}^3/\text{h)}$	Regulación	$V_D \text{ (m}^3/\text{h)}$	$\eta_v \text{ (%)}$
Abr-Jun 2017	2216,55	2438,21	C100+C50	2565	86%
Jul-Sept 2017	2826,97	3109,67	C100+C100	3420	83%
Oct-Dic 2017	1495,90	1645,49	C100	1710	87%
Ene-Mar 2018	1242,95	1367,25	C100	1710	73%
Abr-Jun 2018	1656,80	1822,48	C75+C50	2137,5	78%
Jul-Sept 2018	3316,45	3648,09	C100+C75+C50	3847,5	86%
Oct-Dic 2018	1722,08	1894,29	C75+C50	2137,5	81%
Ene-Mar 2019	1411,34	1552,48	C100	1710	83%
Abr-Jun 2019	1735,28	1908,81	C75+C50	2137,5	81%

Los volúmenes ideales de los compresores que trabajan en una etapa de carga inferior al máximo, se han calculado como un porcentaje del compresor trabajando con una carga ideal del 100%, siendo dichos caudales $V_{D,75\%} = 1282,5 \text{ m}^3/\text{h}$ y $V_{D,50\%} = 855 \text{ m}^3/\text{h}$

El rendimiento, suponiendo que para los tres compresores es el mismo, se obtiene mediante un promedio del calculado para cada trimestre. Así pues, el rendimiento volumétrico es $\eta_v = 82\%$.

La estimación realizada mediante una parametrización promedio (*Figura 5.6*) ha permitido aproximar el valor del rendimiento volumétrico, existiendo una discrepancia entre ambos resultados del 5%, aproximadamente. Dicha diferencia puede estar asociada a diversos factores de mantenimiento, como pueden ser las reparaciones llevadas a cabo, el tiempo en funcionamiento que presentan los compresores y la antigüedad de los mismos.

Multiplicando el rendimiento volumétrico calculado por el volumen desplazado teórico, se obtiene el caudal real que trasiega cada compresor funcionando en una etapa de carga del 100%.

$$Q = \eta_v \cdot V_D = 1402,2 \frac{m^3}{h} \quad (19)$$

Para las otras cargas en las que puede trabajar el compresor en régimen estacionario se calculan como un porcentaje de la carga máxima, siendo los caudales del compresor trabajando al 75% y al 50% de $Q_{75\%} = 1051,65 \text{ m}^3/\text{h}$ y $Q_{50\%} = 701,1 \text{ m}^3/\text{h}$, respectivamente.

Representando los datos de caudal obtenidos en una gráfica permite entender de manera visual la principal problemática de los compresores actuales.

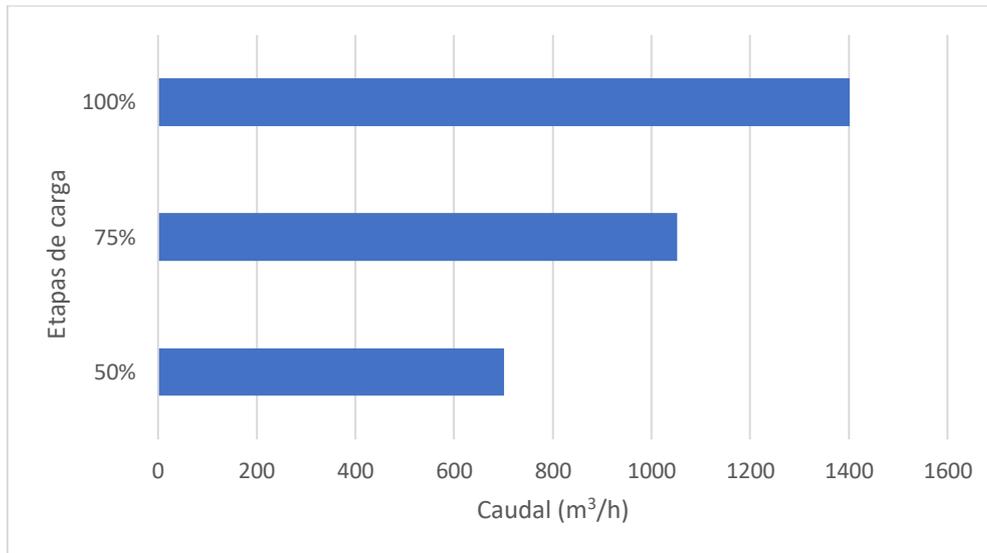


Figura 5.8: Caudal aportado por cada etapa del compresor

El salto producido por la regulación entre las distintas etapas de carga provoca una diferencia de caudal de $350,55 \text{ m}^3/\text{h}$, siendo una variación del trasiego realizado demasiado brusca, lo que dificultará un ajuste correcto a la demanda del proceso productivo de la fábrica.

5.3 Análisis del funcionamiento de la instalación

Para entender mejor el funcionamiento de la instalación, se procede a detallar los procesos que tienen lugar en la planta.

El amoníaco empleado en la empresa debe mantener unas condiciones de trabajo específicas. Para satisfacer la demanda exigida por los procesos productivos de la fábrica, el sistema de compresores refrigera amoníaco procedente de tres procesos de distinta índole.

- En primer lugar, el tanque de almacenamiento de NH_3 se encuentra sometido a la exposición solar durante gran parte del día, provocando un aumento indeseado de la temperatura en su interior. Por ello, en épocas cálidas se produce un efecto denominado boil-off gas, produciendo la evaporación del amoníaco licuado en el interior del tanque. Para mantener las

condiciones de diseño en el mismo, el amoniaco gas producido debe ser evacuado y refrigerado para su licuación.

El caudal máximo requerido por la instalación, procedente del tanque de almacenamiento, supone un caudal de 167 m³/h.

- En segundo lugar, la recepción de materia prima se produce a través de un conducto por el que circula amoniaco anhidro licuado. De esta manera, el producto se descarga en el puerto de Sagunto y es conducido hasta la fábrica. A pesar del calorifugado instalado en el conducto, parte del NH₃ pasa a estado gaseoso, por lo que debe licuarse a través del proceso de refrigeración.

El caudal máximo requerido por la instalación para trasegar el amoniaco gas formado en la recepción de la materia prima es de 3333 m³/h.

- Por último, en el proceso de fabricación de nitrato amónico y ácido nítrico, detallado en el *apartado 3.2.2.*, se producen vapores de proceso que contienen amoniaco. Para evitar una contaminación ambiental excesiva y, además, mejorar la eficiencia del proceso, dichos vapores se recirculan hasta la planta de refrigeración del amoniaco para reutilizarse.

En este caso, el caudal máximo requerido por la instalación para trasegar los vapores de proceso formados es de 2333 m³/h.

El amoniaco gas obtenido de los tres procesos mencionados se almacena en un depósito previo a la aspiración, siguiendo todas las medidas de seguridad requeridas. En el ANEXO I se encuentra la ficha de seguridad del producto con el que se trabaja.

A continuación, tres compresores de baja aspiran el NH₃ a presión atmosférica, siendo la temperatura de aspiración cercana a los -20°C. Al finalizar el proceso de compresión por etapas, el amoniaco es expulsado a través de la línea de descarga a presiones cercanas a los 3,5 bares manométricos (barg).

Cabe destacar que los compresores alternativos presentan un sistema de lubricación interno para evitar daños mecánicos producidos por el movimiento de los pistones. El aceite empleado se mezcla con el producto de interés, por lo que al finalizar la compresión se dirige el amoniaco gas a un separador de aceite.

Posteriormente, el NH₃ exento de aceite entra en el depósito de regulación interetapas. La presión en el interior oscila entre los 2,6 y 3 barg, regulándose mediante la acción de los compresores de alta presión. Debido a las condiciones dadas en el interior, el depósito dispone de amoniaco tanto en estado gaseoso como líquido. Por ello, la recirculación del amoniaco licuado hacia el tanque de almacenamiento principal de NH₃ se produce mediante una línea saliente del depósito de regulación interetapas.

Continuando con el flujo del amoniaco gaseoso, se produce la aspiración hacia los compresores de alta a una presión en la línea de admisión cercana a los 2,5 barg y una temperatura en torno a los 0°C. El amoniaco gas se comprime hasta alcanzar una presión en la línea de descarga de 14,2 barg. De la misma manera que en los compresores de baja, estos equipos necesitan una correcta lubricación para evitar daños mecánicos por lo que el amoniaco gas se dirige hacia otro separador de aceite.

Una vez se ha eliminado el lubricante, el amoniaco comprimido se dirige hacia dos condensadores, en los que se producirá el cambio de fase del producto de interés. Previamente, de la línea de entrada de

dichos condensadores, se produce una bifurcación, donde una parte del amoniaco gas se envía hacia la planta de fabricación del ácido nítrico.

En la salida del condensador, las líneas de ambos condensadores se unen para dirigir el amoniaco licuado hacia un acumulador, donde se extraerá el posible amoniaco gas restante.

Por último, el amoniaco en estado líquido se recircula a distintos equipos de la planta, con finalidades diferentes. Por un lado, se envía al depósito de regulación interetapas para mantener las condiciones de diseño establecidas de presión y temperatura, así como recircular el amoniaco necesario para enviar al tanque de almacenamiento principal de NH_3 . Por otro lado, parte del amoniaco licuado se destina para los separadores de aceite, facilitando la extracción del lubricante al encontrarse en estado líquido.

El proceso descrito se puede observar mediante un plano proporcionado por el tutor de la empresa. Dicho plano se adjunta en el ANEXO II.

Conociendo el proceso de refrigeración del amoniaco, se pretende estudiar la problemática que presentan los compresores de alta presión instalados actualmente y, de esta manera, encontrar una posible solución que mejore la eficiencia del proceso.

En la *Figura 5.9* se puede observar la diferencia entre el caudal requerido por los distintos procesos mencionados anteriormente y el caudal aportado por los compresores.

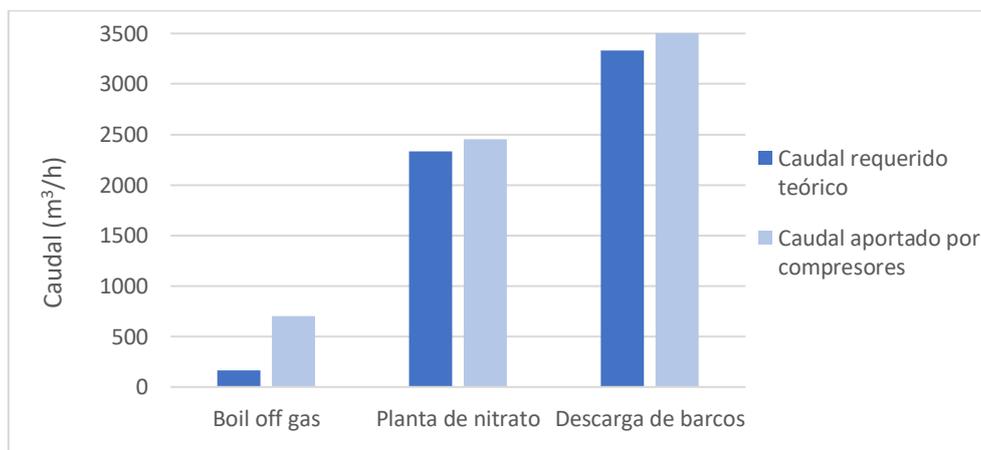


Figura 5.9: Diferencia entre caudal demandado y caudal aportado por los compresores

Como se puede observar en la comparación de caudales, el ajuste realizado por los compresores actuales no se adecúa con precisión a las necesidades de la planta. Por tanto, el exceso de amoniaco comprimido debe recircularse de nuevo al depósito de regulación interetapas, dando lugar a un consumo excesivo de energía por parte de las unidades compresoras.

Además, dichos problemas de regulación se ven significativamente acrecentados dependiendo del trimestre en el que se analice el caudal. Así pues, para analizar correctamente los inconvenientes del proceso, se ha calculado el promedio de cada trimestre del caudal demandado por la planta, a partir de los datos recogidos en la *Tabla 5.1* para denotar las diferencias entre las distintas épocas del año, obteniendo la representación de la *Figura 5.10*.

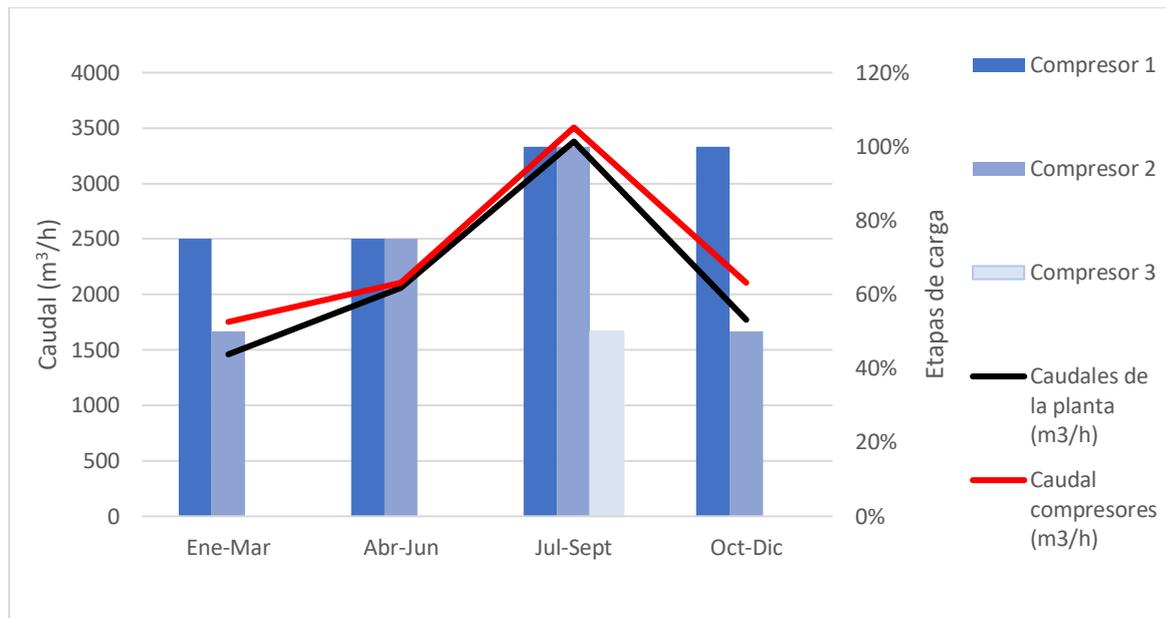


Figura 5.10: Comparativa del caudal y la regulación de los compresores

Las barras de la gráfica representan la etapa de carga en la que trabaja cada compresor, mientras que las líneas muestran el caudal que trasiegan los compresores, en rojo, y el caudal de la planta real multiplicado por el coeficiente de seguridad, en negro. La diferencia entre ambos se trata del caudal recirculado al depósito de regulación interetapas.

Cabe destacar que en el estudio de la regulación de los compresores se trabaja con los datos obtenidos a partir de un promedio de cada trimestre, denotando las diferencias acaecidas dependiendo de la época del año en la que los compresores se encuentren en servicio. El hecho de representar el caudal aplicando un coeficiente de seguridad permite asegurar que las posibles perturbaciones en el trasiego de amoníaco no afectarán a la demanda, evitando problemas de abastecimiento de la planta.

Tal y como se observa en la *Figura 5.10*, en los meses invernales cuando la regulación de los compresores muestra una carga de amoníaco menor y, por lo tanto, una demanda menor de la planta, el desajuste entre el caudal demandado y el caudal trasegado es más notable. En cambio, para los meses estivales, cuando la demanda de la planta es mayor, se aprecia un ajuste mucho mayor del caudal trasegado.

El desajuste provocado por la vasta regulación que presentan los compresores entre la demanda de la planta y el caudal trasegado se ve reflejado en la *Figura 5.11*, donde se muestra el porcentaje del caudal recirculado en el proceso de refrigeración.

Para ello, el cálculo se ha realizado mediante la siguiente ecuación:

$$\%Q_{recirculado} = \frac{Q - Q_{seguridad}}{Q} \cdot 100 \quad (20)$$

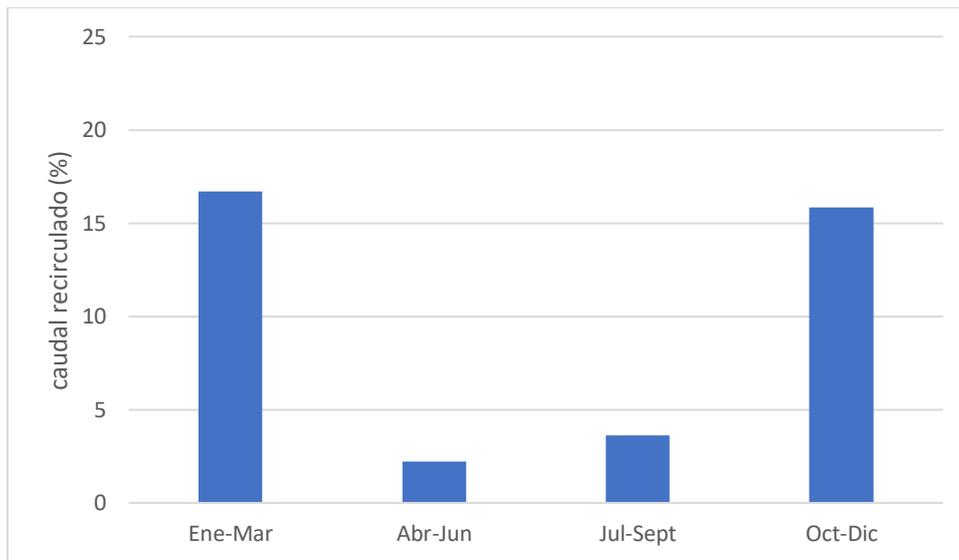


Figura 5.11: Porcentaje del caudal recirculado por exceso de trasego en los compresores

La diferencia porcentual entre los meses estivales e invernales alcanza aproximadamente el 12% del caudal total trasegado. Es por ello que la dificultad de regulación de los compresores actuales muestra un ajuste deficiente a la demanda de la planta, denotado en épocas donde la demanda es menor. Este problema se traduce en un malgasto de la potencia eléctrica empleada y, por consiguiente, unas pérdidas económicas para la empresa.

Asimismo, la problemática que presentan los compresores alternativos se muestra acrecentada por la variación constante de la presión en el interior del depósito de regulación interetapas. Los compresores presentan una presión de aspiración en torno a los 2,5 barg. Debido a las pérdidas de carga sufridas en la línea que conecta el depósito de regulación interetapas y los compresores de alta, el rango de presiones en el interior del depósito oscila entre 2,6 y 3 barg, aproximadamente.

En el caso que la presión sobrepase los límites de diseño establecidos, los compresores entran en funcionamiento para reducir la presión del depósito. De la misma manera, si la presión disminuye por debajo del límite inferior establecido, los compresores reducen su etapa de carga para lograr un aumento en la presión del depósito de regulación interetapas.

Debido a la vasta regulación que presentan los compresores, la pendiente de la curva de presiones es muy pronunciada, produciendo cambios en las etapas de carga constantemente. En la *Figura 5.12* se representa la presión del interetapas para un intervalo de 1 hora del día 17/02/2020, siendo la fecha irrelevante puesto que se realizó la medición de presiones en el momento que el técnico de la empresa estaba disponible.

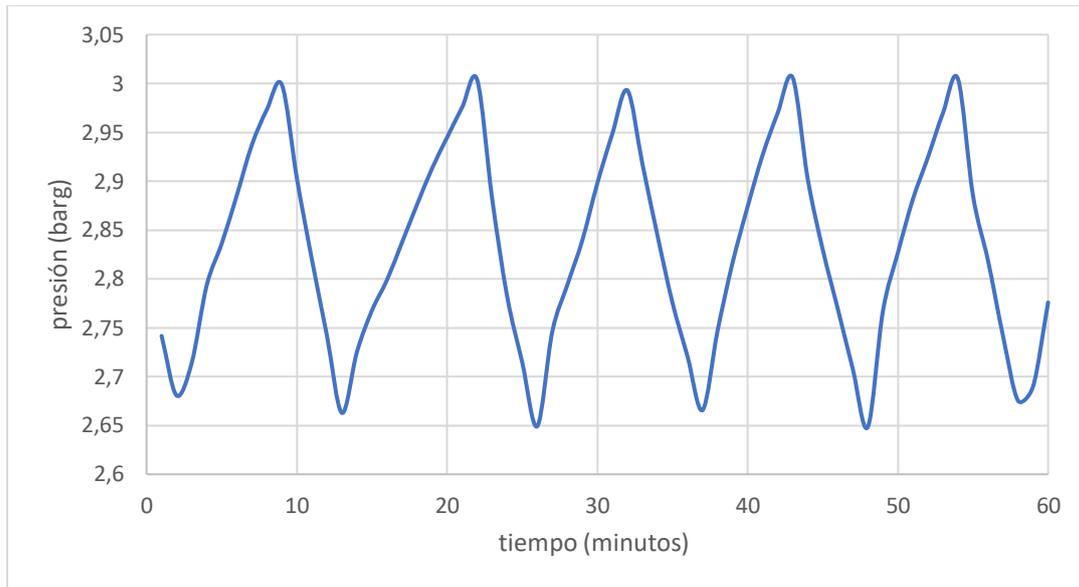


Figura 5.12: Presión del depósito de regulación interetapas

Como se puede apreciar, en 60 minutos la presión en el depósito alcanzó 11 veces el límite, ya sea inferior o superior, del rango de diseño. Esta variación tan acentuada en la presión desemboca en una regulación de la etapa de carga del compresor cada 5 minutos, lo que provoca un desgaste excesivo del equipo.

Además de los problemas de regulación mencionados, los compresores alternativos presentan problemas continuos por la temperatura alcanzada en la impulsión del amoniaco. El diseño de los compresores implica que, por motivos de seguridad, si el sistema alcanza una temperatura de 124 °C el equipo debe apagarse. A partir de los datos de temperatura obtenidos durante el funcionamiento de los compresores, las temperaturas alcanzadas en la impulsión se encuentran en valores cercanos a los 122°C, llegando en ocasiones al límite de seguridad establecido.

A continuación, en la *Figura 5.13* se muestra la variación que se produce en la temperatura de impulsión de uno de los compresores estudiados en referencia a la presión medida en la línea de aspiración del amoniaco.

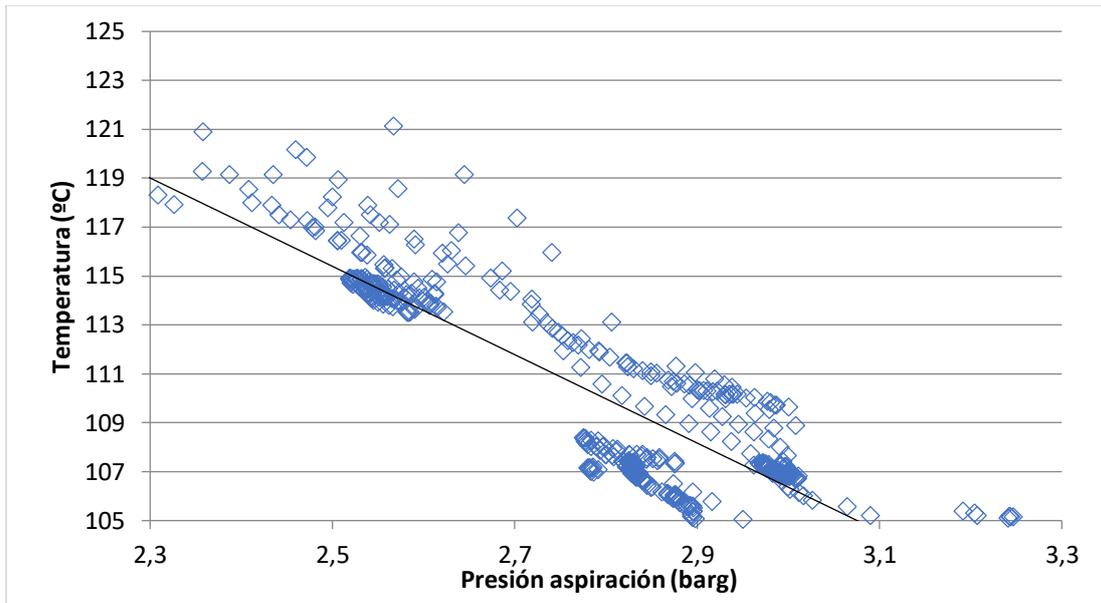


Figura 5.13: Variación de la temperatura de impulsión respecto a la presión de aspiración del intertapas

Como se puede observar en la gráfica anterior, para el rango de presiones obtenido en la línea de aspiración, la temperatura oscila entre los 120 y 105 °C en la temperatura de impulsión, lo que va a provocar una parada del compresor en el caso de que se produzca una perturbación en la presión de diseño.

A partir de la lógica mostrada en la *Figura 5.13*, sería sensato considerar que es posible evitar los problemas de sobrecalentamiento si se trabaja en un rango de presiones de aspiración algo mayor. Este razonamiento conlleva otro problema asociado que agrava la situación actual de los compresores alternativos

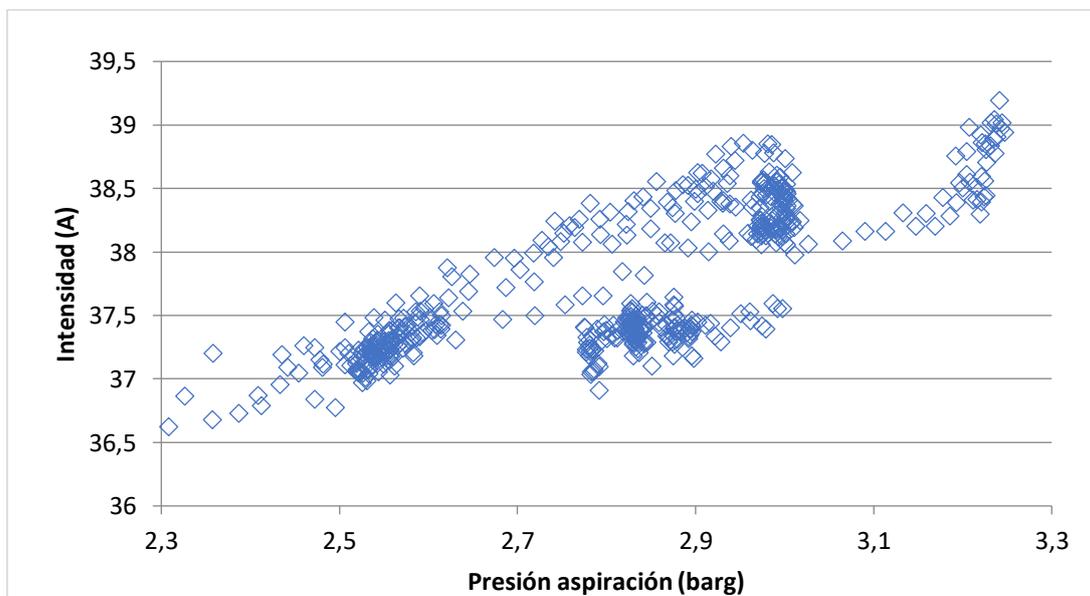


Figura 5.14: Consumo del compresor respecto a la presión de aspiración

Un aumento en la presión de aspiración, tal y como se observa en la *Figura 5.14*, provoca un aumento en la potencia empleada por compresor, lo que se traduce en un mayor gasto económico para la empresa en el consumo de energía eléctrica.

Cabe destacar que el aumento del consumo energético producido por un aumento de la presión de aspiración acarrea consigo una fluctuación en el caudal másico de amoniaco trasegado por los compresores, representado en la *Figura 5.15*:

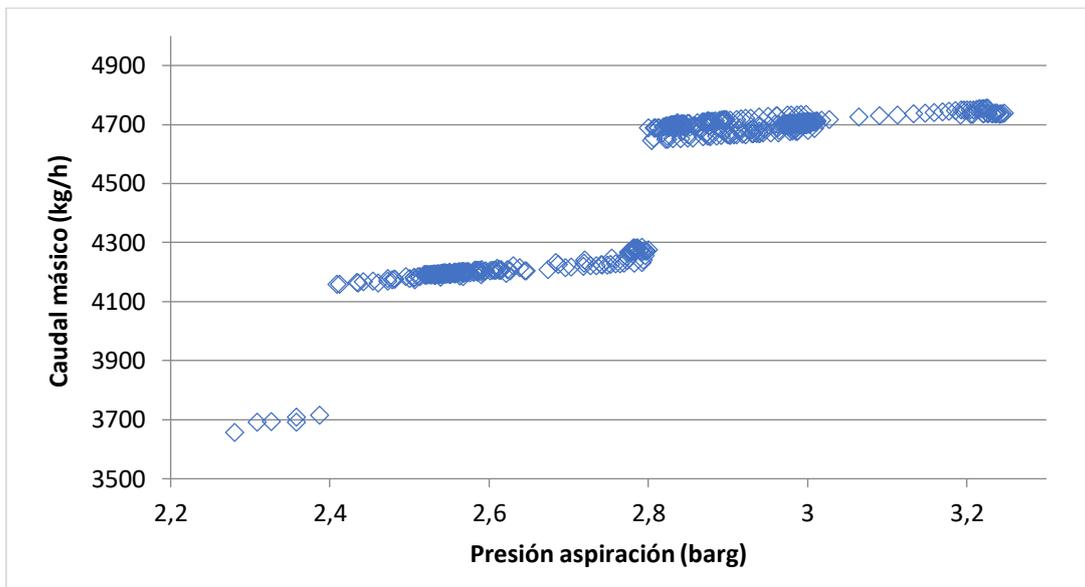


Figura 5.15: Caudal másico del amoniaco respecto a la presión de aspiración

Combinando la gráfica representada en la *Figura 5.14* y la gráfica anterior, se obtiene la relación entre el caudal másico que trasiega la unidad compresora y la intensidad que presenta mostrado en la *Figura 5.16*

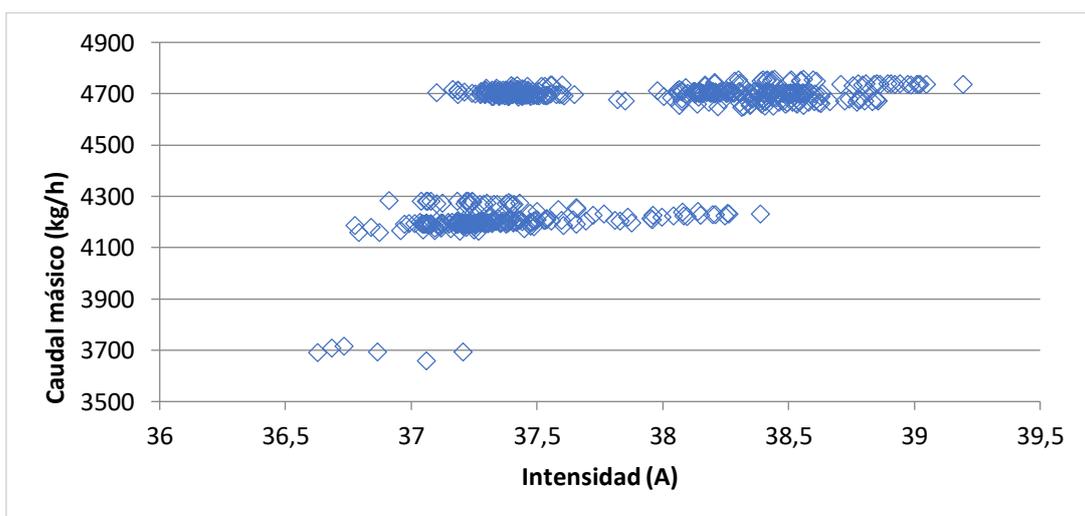


Figura 5.16: Caudal másico respecto a la intensidad del compresor

Como se ha mencionado anteriormente en la explicación de la regulación, la potencia consumida por el compresor depende de la cantidad de amoniaco trasegado. Es por ello que, en el caso de que el equipo trasiegue una cantidad mayor de caudal, los pistones integrados en las etapas del compresor deberán ejercer un mayor trabajo sobre el fluido para lograr mantener la presión de diseño en la línea de descarga. Por consiguiente, esa energía que transfieren los pistones al amoniaco es aportada mediante un mayor consumo de potencia eléctrica.

A partir de las gráficas anteriores se pueden discernir los distintos problemas que presentan los compresores alternativos actuales. A parte de la dificultad mostrada en una regulación demasiado estricta para las constantes variaciones en la demanda de la planta, acrecentadas entre las distintas épocas del año, se suma la dificultad de mantener un intervalo de presiones de diseño en el depósito de regulación interetapas. Asimismo, esas oscilaciones pronunciadas en la presión desembocan en un consumo excesivo de potencia eléctrica, acompañado de valores de caudal superiores.

Por tanto, la problemática actual de los compresores instalados en la fábrica ha generado un malgasto en potencia eléctrica consumida, empleada en trasegar grandes caudales volumétricos de amoniaco para su posterior recirculación, provocando un exceso de trabajo en los equipos en funcionamiento superfluo. Por consiguiente, el gasto económico realizado por la empresa durante los años que lleva en funcionamiento la planta se ha visto acrecentado por el dispendio que provoca la mala regulación de los compresores alternativos.

5.4 Cálculo del consumo eléctrico

Para cuantificar el gasto energético que se produce en la instalación por parte de los compresores de alta presión, se conoce que la potencia activa en un sistema trifásico, como es el motor eléctrico, se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\Phi \quad (21)$$

De la unidad compresora actual se conoce que la tensión eléctrica empleada es $U = 6,3 \text{ V}$, la intensidad de corriente eléctrica es igual a $I = 38 \text{ A}$ para un compresor trabajando en una etapa de carga máxima y el $\cos\Phi$, el cual hace referencia al factor de potencia que presenta el motor eléctrico instalado, es f. d. p = 0,85.

Por tanto, la potencia eléctrica empleada por un compresor alternativo trabajando al 100% de su capacidad de carga será:

$$P_{100\%} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\Phi = \sqrt{3} \cdot 6,3 \text{ V} \cdot 38 \text{ A} \cdot 0,85 = 352,45 \text{ kW} \quad (22)$$

Asimismo, se conoce que la intensidad disminuye de forma lineal cuando se reduce la carga de trabajo, sabiendo que para una regulación del 25% de su capacidad de carga, siendo el punto de consumo más bajo por parte del equipo, la intensidad empleada es $I_{25\%} = 24 \text{ A}$. Dicho dato se ha obtenido a través de mediciones experimentales de la intensidad en los equipos compresores, aportados por el tutor de la empresa.

Para conocer el resto de valores de la intensidad de corriente eléctrica simplemente se ha realizado una interpolación de los dos valores conocidos, obteniendo los siguientes consumos de potencia activa para un trabajo del compresor a carga parcial siendo las intensidades para las etapas de carga del 75% y 50%, $I_{50\%} = 28,66 \text{ A}$ y $I_{75\%} = 33,33 \text{ A}$, respectivamente.

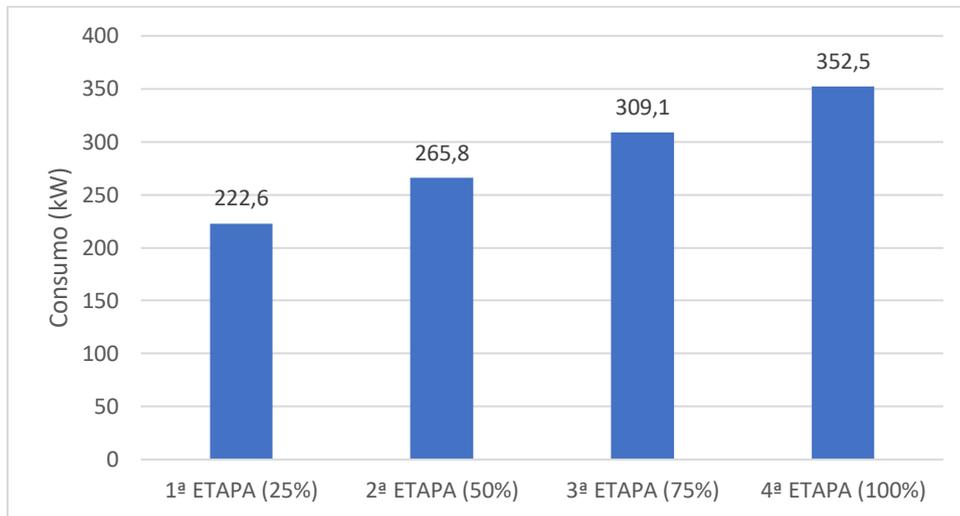


Figura 5.17: Consumo eléctrico para cada etapa de los compresores actuales

Para obtener información útil respecto al gasto actual de energía eléctrica, se obtiene el caudal trasegado en cada etapa por unidad de energía eléctrica, descrito en la Figura 5.18, dividiendo el caudal con el que se trabaja entre la potencia consumida por cada etapa.

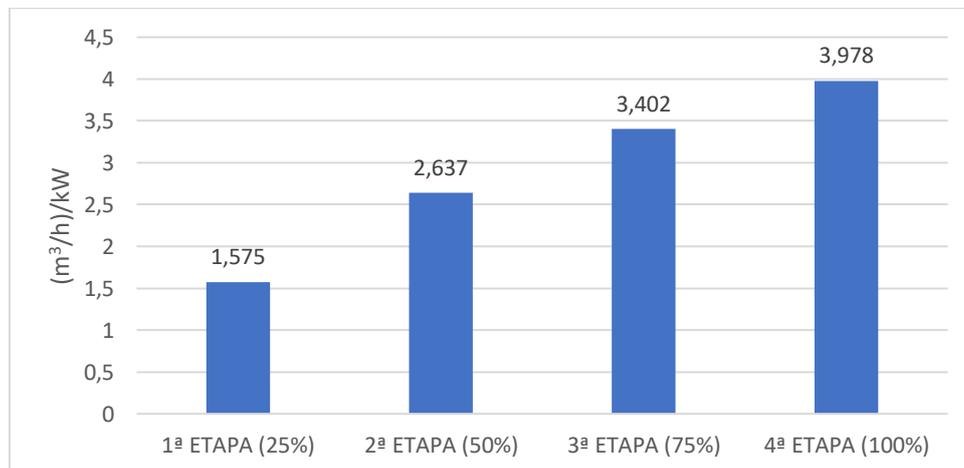


Figura 5.18: Caudal volumétrico trasegado por cada etapa para 1 kilovatio consumido

Como se puede observar, el trabajo de los compresores en la etapa de carga máxima es mucho más eficiente que la compresión realizada con el compresor trabajando en cargas parciales. Cabe destacar que el valor obtenido para la etapa de carga del 25% se emplea únicamente en la puesta en marcha de la unidad compresora. La cantidad de amoniaco trasegada para la etapa del 100% de carga difiere

en torno a $1,5 \text{ (m}^3\text{/h)}/\text{kW}$ respecto al fluido comprimido en la etapa del 50% de carga. Estos datos se traducen en una diferencia notable de eficiencia del compresor entre las distintas etapas de trabajo.

Para el estudio realizado, se ha obtenido el precio del kilovatio a través los datos recogidos por la *Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia*, donde se muestra el precio medio del megavatio para los seis primeros meses del año 2019:

Tabla 5.3: Precios del megavatio en 2019 (CNMC, 2019)

Mes	€/MWh
Enero	67,3
Febrero	59,16
Marzo	53,51
Abril	55,92
Mayo	53,14
Junio	51,82

A raíz de los datos mostrados en la *Tabla 5.3*, se calcula el promedio del precio durante dichos seis meses para conocer el gasto económico aproximado de los compresores de alta presión. La estimación calculada resulta en un gasto de $56,808 \text{ €/MWh}$, es decir, $0,0568 \text{ €/kWh}$.

Cabe destacar que el precio de la electricidad en el mercado varía dependiendo de la compañía y tipo de consumo que se vaya a realizar. Es por ello que el precio calculado es una estimación, pudiendo discernir notoriamente del precio real que paga la empresa. Bien es cierto que en la fábrica se disponen de generadores de electricidad propios a partir de los productos residuales que se generan en la fabricación de fertilizantes como bien puede ser el calor generado. Es por ello que, además de generar su propia energía eléctrica, puede darse el caso de que trabajen con operadores que apliquen descuentos en sus tarifas de electricidad.

Así pues, una vez se ha estimado el precio del kilovatio, se calcula el gasto generado por un compresor para la potencia empleada en cada etapa de carga, en €/h. Con ese dato calculado, se divide entre el caudal trasegado, obteniendo el precio de comprimir 1 m^3 de amoniaco en una hora.

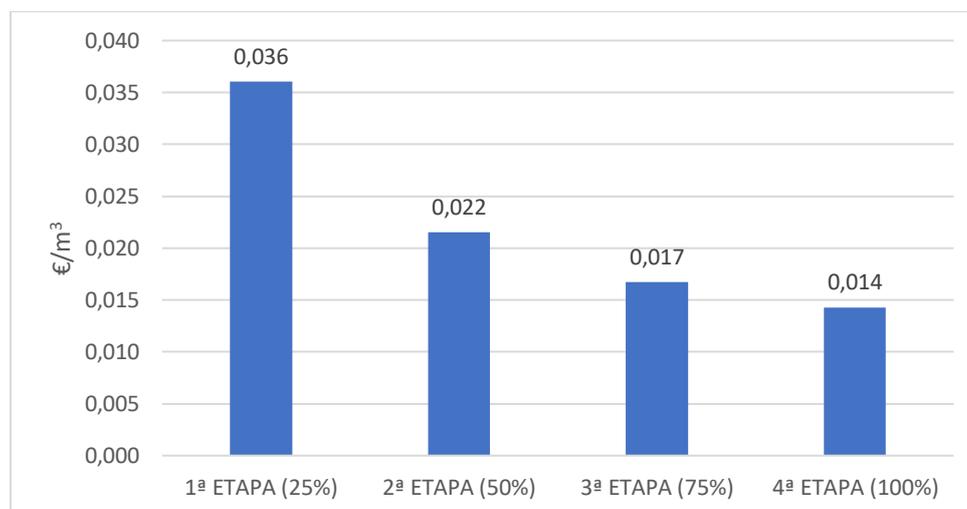


Figura 5.19: Gasto económico producido por la compresión de $1 \text{ m}^3\text{/h}$ de amoniaco

Como se puede observar, el gasto económico realizado cuando los equipos trabajan en su fase de arranque es excesivo, comparado con las demás etapas de carga. Es por ello que, en el caso de una oscilación acentuada en la presión del depósito de regulación interetapas, se producirá un apagado y encendido del equipo compresor en un tiempo muy reducido, lo que provocará un trasego de amoníaco a un precio muy alto.

Respecto a la diferencia mostrada entre las etapas de carga de los compresores, al tratarse de un sistema que trabaja en un estado estacionario, la disparidad del precio por trasegar 1 m³/h de amoníaco es muy significativa.

A partir de los datos de caudal conocidos para el promedio realizado en cada trimestre, se calcula el consumo energético producido en la planta actual por los compresores de alta presión. A los caudales promedio calculados se les aplica un coeficiente de seguridad de 1,10 para evitar problemas de abastecimiento de la planta a la hora de seleccionar la regulación de los compresores alternativos.

Tabla 5.4: Obtención del coste trimestral de los compresores en funcionamiento

	Q _{demandado} (m ³ /h)	Funcionamiento	Q _{real} (m ³ /h)	Potencia (kW)	€/h	Coste (€)
Ene-Mar	1460	C75 + C50	1752,75	574,97	32,66	71.325,15
Abr-Jun	2056	C75 + C75	2103,3	618,28	35,12	76.698,41
Jul-Sept	3379	C100 + C100 + C50	3505,5	970,74	55,14	120.420,88
Oct-Dic	1770	C100 + C50	2103,30	618,28	35,12	76.698,41

Para cada trimestre, se ha obtenido el gasto por hora multiplicando la potencia conocida por el precio del kWh. Posteriormente, dicho valor se ha multiplicado por 24 horas y 91 días, dado que los compresores trabajan en un régimen estacionario. El consumo energético de la instalación actual produce un coste anual de 345.142,86 €.

En definitiva, las dificultades presentadas por los compresores debido a la vasta regulación de su capacidad originan un desajuste notable entre la demanda de la planta y la carga trasegada por las unidades compresoras. Este problema desemboca en un excesivo consumo energético de la planta y, por ende, un malgasto económico relevante para la empresa, a medio y largo plazo.

Por tanto, es necesario solucionar las deficiencias acaecidas en la instalación a través de un profundo análisis de las distintas opciones, teniendo en cuenta su viabilidad en los aspectos técnicos, medioambientales y económicos para la empresa.

6. ESTUDIO DE LA INSTALACIÓN DE UN NUEVO COMPRESOR

Para comprender las necesidades del proceso de refrigeración se procede a estudiar en profundidad las curvas de presiones del depósito de regulación interetapas descritas en la *Figura 5.12*, buscando una posible alternativa que sea capaz de reducir las oscilaciones producidas en la presión del depósito debido a la vasta regulación que presentan los compresores actuales.

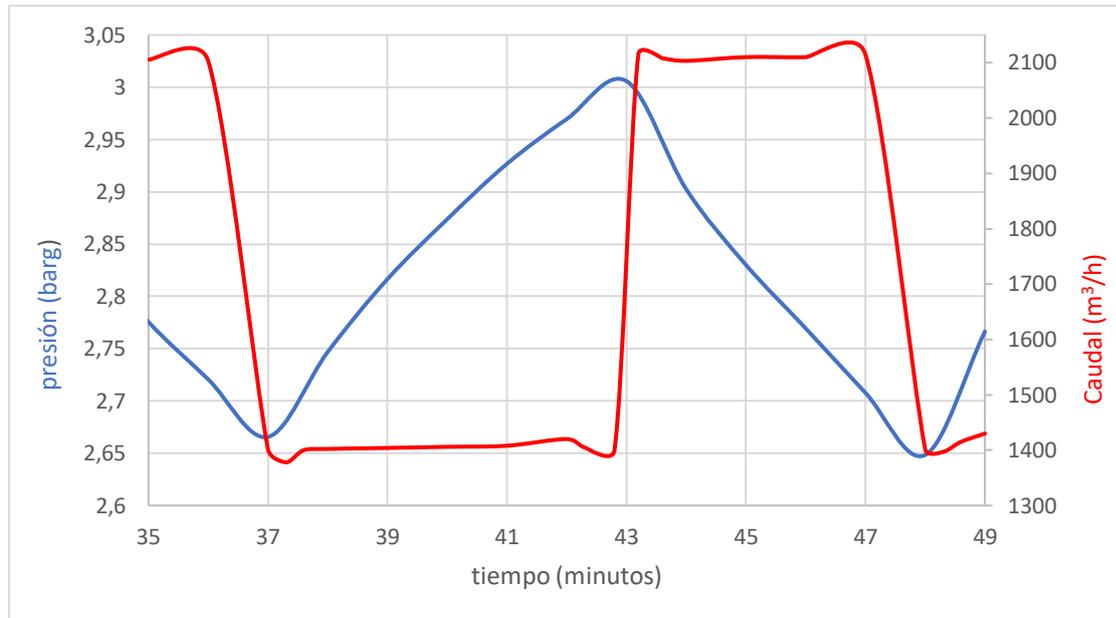


Figura 6.1: Fluctuación de la presión del depósito interetapas junto al caudal de los compresores de alta

El caudal que trasiegan los compresores activos se indica mediante la línea roja, mientras que la presión en el interior del depósito de regulación interetapas se refleja en el gráfico a través de la línea azul. Como se puede observar, en el momento que la presión sobrepasa el límite inferior del rango de presiones establecido, sobre el minuto 37 de los datos recogidos, uno de los compresores que se encuentra trabajando en una etapa de carga del 50% se detiene, dando lugar a una subida pronunciada de la presión del depósito de regulación interetapas. En dicho intervalo de aumento, el proceso de compresión del amoniaco se realiza únicamente empleando un compresor en su etapa de carga máxima. En el minuto 43 de la gráfica, aproximadamente, la presión alcanza su valor máximo, por lo que uno de los compresores parado se pone en marcha para que la presión se mantenga dentro del rango. De la misma manera que ocurría en la fase previa al minuto 37, dos compresores se encuentran en funcionamiento, trabajando en etapas de carga del 50% y del 100% cada uno de ellos. Asimismo, este proceso de encendido y apagado llevado a cabo por los controladores automáticos se repite cíclicamente, tal y como se refleja en la *Figura 5.12*, que muestra un intervalo de estudio de la presión más ampliado.

Debido a las pronunciadas oscilaciones, así como la constante variación de la regulación de los compresores se decide buscar una alternativa que permita estabilizar la presión en el interior del depósito de regulación interetapas, para alargar así la vida útil de los compresores alternativos

actuales, de la misma manera que tenga la capacidad de conseguir una reducción en el malgasto de potencia eléctrica de la instalación.

Para el estudio de alternativas compatibles con el proceso de refrigeración se plantea la instalación de una nueva unidad compresora que disponga de las características de regulación necesarias para el correcto abastecimiento de la planta. Los compresores actuales fueron instalados en el año 1988, por lo que una modificación de los mismos se valora como un proceso demasiado costoso para el bajo rendimiento que puede ofrecer.

Así pues, se decide buscar un compresor acorde a las condiciones de trabajo de la planta en el catálogo aportado por el mismo fabricante de los compresores actuales. Conocido el rango de caudal con el que trabaja el proceso de refrigeración, así como la presión obtenida en la línea de impulsión, siendo este valor cercano a los 15 kg/cm^2 , se considera que la opción más factible es la propuesta de instalar un compresor de tornillo junto a los compresores alternativos actuales. Los equipos de compresión de tornillo disponen de una tecnología puntera en lo que respecta a la refrigeración de productos químicos. Este tipo de compresor conseguirá una regulación mucho más fina, lo que permitirá un ahorro de energía eléctrica en la instalación.

6.1 Nueva lógica de trabajo de los compresores

Debido a la extensa capacidad de regulación del compresor, se requiere trabajar con una lógica más compleja a la existente actualmente. En el momento en que comience a trabajar el nuevo equipo compresor, existen tres posibilidades de trabajo distintas:

- Caso 1: la presión del depósito de regulación interetapas se encuentra en valores cercanos al punto de consigna establecido.
- Caso 2: la presión del depósito de regulación interetapas alcanza el punto de máxima presión permitida (PSH).
- Caso 3: la presión del depósito de regulación interetapas alcanza el punto de mínima presión permitida (PSL).

Para realizar el estudio, se entiende que en la planta se encuentra un único compresor alternativo trabajando al 100% de su capacidad y que, para regular correctamente la presión en el depósito de regulación interetapas, se encuentra en funcionamiento el compresor de tornillo que se plantea instalar.

6.1.1 Caso 1. Presión cercana al punto de consigna

Para esta nueva situación, el compresor de tornillo permitirá asignar un valor de presión concreto en el interetapas, lo que provocará menores paradas del compresor alternativo por sobrepasar los valores límites establecidos. La regulación minuciosa del nuevo equipo dará lugar a pequeñas oscilaciones cercanas al set-point establecido, consiguiendo una mayor estabilidad en la presión del equipo.

El funcionamiento que llevará a cabo la instalación se puede describir mediante la siguiente gráfica, en la que se aprecia la variación ajustada de la presión.

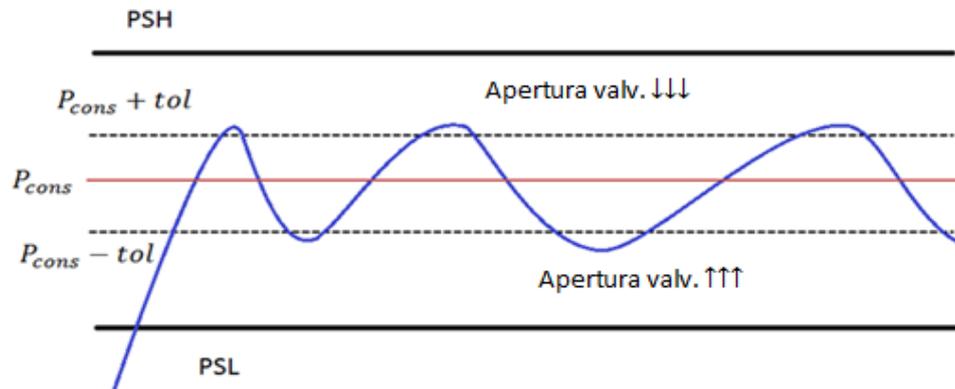


Figura 6.2: Oscilación en torno al punto de consigna establecido

6.1.2 Caso 2. Presión superior al PSH

En la situación donde se alcanza la presión máxima designada, será necesario reducir la pendiente de la curva al máximo para volver a entrar en el rango de presiones establecido. Para producir dicha reducción será necesario introducir una etapa más de los compresores alternativos o, siendo el caso similar al que se ha planteado, para el cual únicamente hay un compresor alternativo activo al 100%, se necesitará arrancar al 50% otro compresor alternativo. Asimismo, para evitar volver a la problemática mostrada en la *Figura 6.1*, se reducirá la regulación del compresor de tornillo a un valor adecuado para controlar la presión del interior del depósito. En el momento que se encuentre en el rango establecido cercano al set-point, se desactivará la etapa del compresor alternativo y el equipo se situará en el *caso 1* de nuevo, donde el compresor de tornillo asumirá la regulación de forma precisa para estabilizar la curva de presiones.

La regulación que se llevará a cabo en el caso de que ocurra lo descrito en este apartado, se representa de manera gráfica mediante el siguiente esquema.

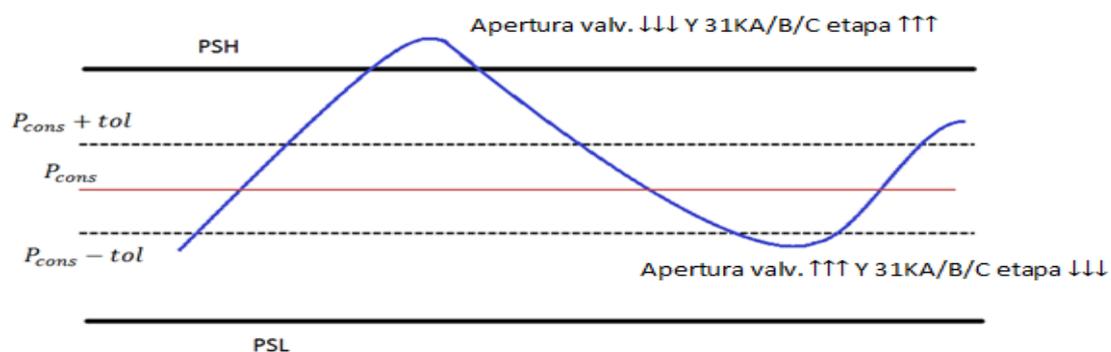


Figura 6.3: Variación de la presión para la nueva lógica en el caso de sobrepasar el PSH

6.1.3 Caso 3. Presión inferior al PSL

Este caso es similar al anterior, con la única diferencia de que se actúa de manera opuesta. En la situación descrita, la presión en el interior del depósito de regulación interetapas se reduciría hasta niveles inferiores al punto de mínima presión permitida. Por consiguiente, el compresor alternativo que se encuentra trabajando deberá reducir una etapa, aumentando la presión del depósito. Una vez que el equipo se encuentre de nuevo trabajando en presiones establecidas dentro del rango, se puede dar la posibilidad de que la regulación necesaria para situar la presión en torno al punto de consigna se produzca mediante el compresor de tornillo, o bien sea necesario aumentar una etapa del compresor alternativo. Al final, se conseguirá aproximar correctamente el valor de la presión al set-point establecido, donde trabajará el compresor de tornillo para mantener las condiciones del *caso 1*.

De nuevo, para explicar el comportamiento de la presión se emplea el siguiente esquema:

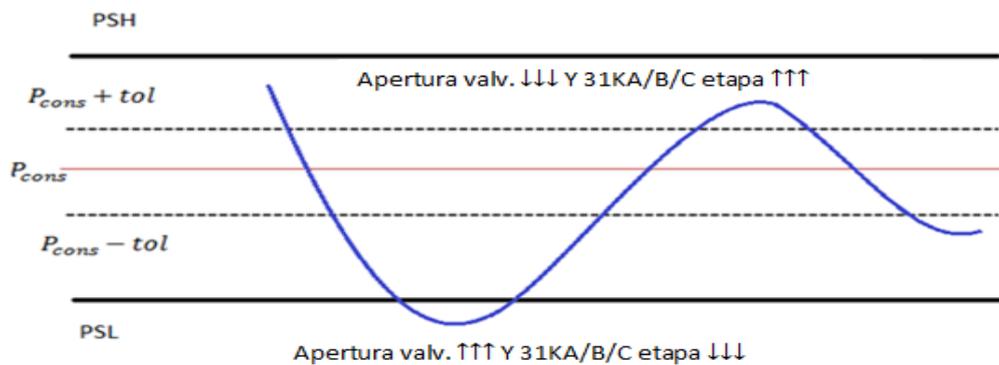


Figura 6.4: Variación de la presión para la nueva lógica en el caso de sobrepasar el PSL

6.2 Descripción de los compresores de tornillo

El funcionamiento del compresor de tornillo se basa en el movimiento de compresión continuo, producido por un único rotor engranado con un par de ruedas satélites dentadas (compresores *Zimmern*), o bien llevado a cabo por dos rotores (compresores *Lysholm*) similares a un tornillo sinfín que producen la compresión del fluido en el volumen interior generado al engranar. En la actualidad, la gran mayoría de fabricantes ofrecen en sus catálogos los compresores de tornillo birrotor. En cambio, los compresores monorrotor solo lo venden fabricantes concretos, puesto que su uso está menos extendido en el ámbito industrial. Por ello, el presente estudio se va a centrar en analizar en profundidad el funcionamiento descrito por los compresores de tornillo birrotor industriales.

En el interior de un cárter de fundición se encuentran dos rotores helicoidales mecanizados con una alta precisión. El rotor macho, el cual posee cuatro lóbulos, encajará perfectamente dentro de las seis cavidades o alvéolos del rotor hembra. Así pues, un motor eléctrico se encarga de traccionar el rotor macho. Mediante el engranaje de sincronización, el accionamiento del rotor conductor permite que el rotor hembra comience a girar en sentido opuesto.

El fluido ingresa a través de la línea de admisión en la cavidad de aspiración. Dicha cámara se encuentra conectada con el cabezal de los rotores, permitiendo que el amoniaco de entrada ocupe las cámaras de trabajo formadas entre lóbulos. Conforme se produce el giro de los rotores, los dientes engranan de forma progresiva para lograr una estanqueidad del fluido. Al terminar de completarse el espacio disponible, se finaliza la fase de aspiración.

Continuando el giro de los rotores, el espacio entre lóbulos se reduce conforme avanza el fluido longitudinalmente a través del compresor. Los lóbulos del rotor macho actúan como un pistón continuo que comprime el amoniaco situado en las cavidades del rotor hembra, reduciendo así el volumen y, por tanto, aumentando la presión del fluido. Cuando el lóbulo del rotor macho alcanza el final de la ranura, el amoniaco que se encuentra en el interior de los engranajes se descarga a través de la lumbrera de escape, permitiendo la expulsión del fluido a través de la línea de descarga. (Stosic, K Smith, Kovacevic, & Mujic, 2016).

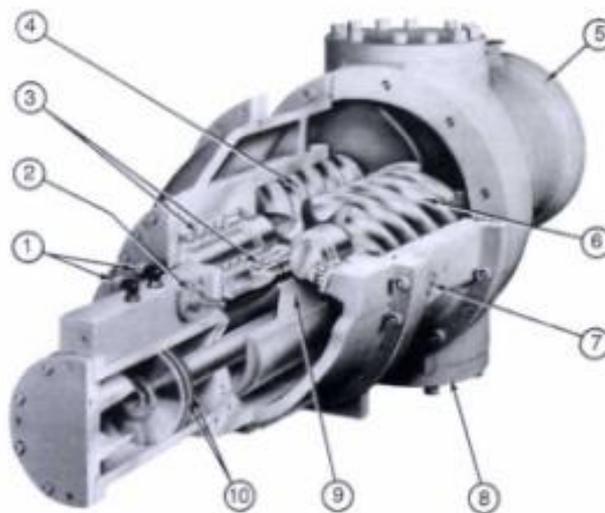


Figura 6.5: Compresor de tornillo Lysholm (C. Whitman & M. Johnson, 2000)

(1) Conductos de control del aceite; (2) Válvula solenoide de control de capacidad; (3) Cojinetes de descarga; (4) Rotor macho; (5) Motor; (6) Rotor hembra; (7) Inyección de aceite al rotor; (8) Brida para la entrada de aspiración; (9) Válvula deslizante de control de capacidad; (10) Juntas de estanqueidad del pistón regulador.

Para garantizar la correcta lubricación del sistema mecánico del compresor se produce un aporte de lubricación constante mediante una bomba de aceite. Asimismo, el lubricante se encarga de llevar a cabo diferentes funciones indispensables para el correcto mantenimiento del equipo (SAB 193-233-283 screw compressors manual, 2012):

- Garantiza el sellado de las cámaras de trabajo, evitando un desgaste de los engranajes por rozamiento.
- Logra una absorción del sobrecalentamiento producido en la compresión del fluido, disminuyendo la temperatura de impulsión hasta valores óptimos
- Proporciona una amortiguación entre los rotores, minimizando el ruido y las vibraciones producidas en la compresión.

Normalmente, la cantidad de aceite inyectada en el interior de los compresores de tornillo supone una cantidad muy reducida, siendo el 1% del volumen de amoniaco desplazado. Aun así, es necesario un filtro de aceite y un separador de aceite al finalizar la compresión para evitar una contaminación indebida del fluido trasegado (Rapin & Jacquard, 2006).

Para llevar a cabo la regulación de la carga trasegada, los compresores de tornillo disponen de tres métodos que permiten mantener la eficiencia de la compresión:

- Incluir un variador de frecuencia en el motor eléctrico instalado para disminuir o aumentar, dependiendo de los requisitos productivos de la planta, la velocidad de giro de los rotores.
- Aumentar la relación de compresión mediante una laminación en la entrada del compresor. Este método es adecuado únicamente para los equipos de tornillo puesto que la elevación de la temperatura de escape no es tan significativa como en el resto de modelos de compresor
- Regular el volumen desplazado empleando una o varias válvulas deslizantes. Mediante un bypass, localizado en la entrada del compresor, se desvía hacia la aspiración una fracción variable de la carga desplazada, retardando el comienzo de la compresión. Un pistón regulador de la capacidad auxiliar realiza el deslizamiento de la válvula reguladora. El movimiento hidráulico del pistón se produce por la acción del aceite introducido en el compresor de tornillo.

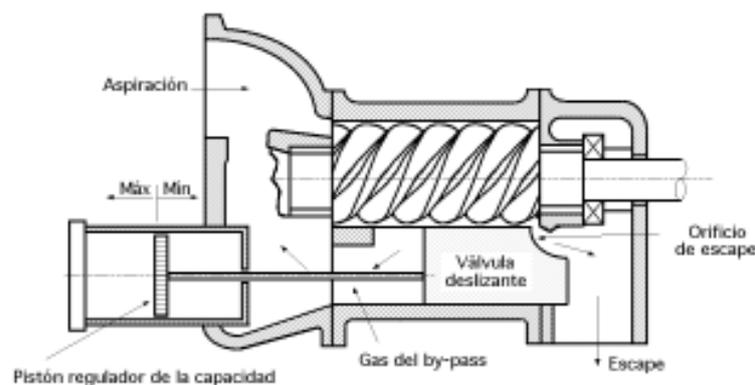


Figura 6.6: Compresor de tornillo con regulación de la carga mediante válvula deslizante (Fernández Díez)

Para el estudio y selección del equipo adecuado se empleará una regulación máxima del 60% de la carga máxima definida, reduciendo la eficiencia del equipo en el caso de trabajar con una regulación superior, tal y como ha informado el fabricante. El porcentaje de regulación expresa el porcentaje de caudal de amoniaco que deja de comprimir, por lo que en el límite para el cual sigue siendo eficiente el compresor, un 60% de la capacidad de trasiego total dejará de comprimirse.

Cabe destacar que el proceso de compresión realizado por los rotores produce un efecto similar al que se podía apreciar en los compresores alternativos. En la expulsión del fluido, aparece un volumen de amoniaco remanente. De la misma manera que ocurría en los pistones, el fluido que produce el denominado volumen muerto debe expandirse, lo que limita la entrada de vapor en la siguiente aspiración. Además, las posibles fugas de amoniaco que puedan ocurrir entre los engranajes de los rotores también limitan la entrada de amoniaco en la próxima aspiración del equipo. Por ello, para

estudiar los compresores de tornillo hay que tener en consideración el rendimiento volumétrico (Torrella Alcaráz, 2000)

Para calcular correctamente el rendimiento del compresor de tornillo se emplea de nuevo la herramienta *Frío* del programa *Atecyr*. En este caso, como se debe obtener el rendimiento volumétrico lo más exacto posible ya que no se dispone de datos experimentales, se utiliza la ecuación de la recta obtenida.

$$\eta_V = 1 - 0,02 \cdot e_c = 0,913 \quad (23)$$

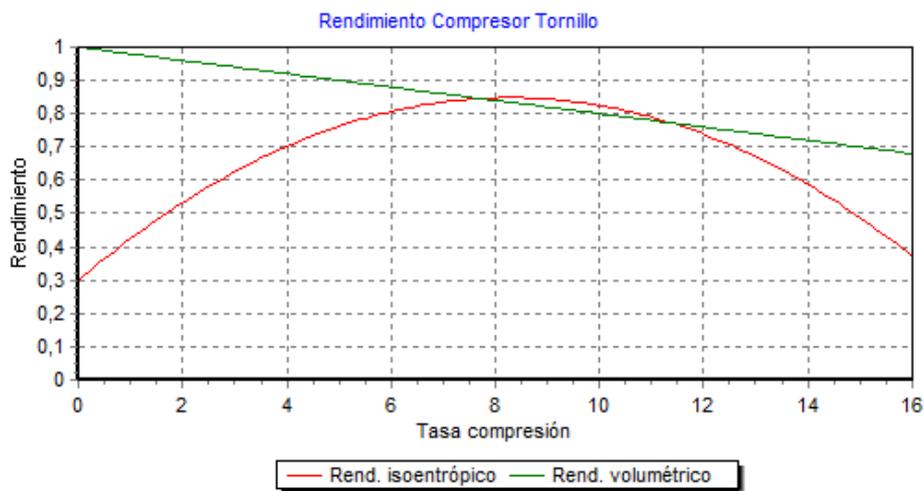


Figura 6.7: Rendimientos isoentrópico y volumétrico de un compresor alternativo en función de la tasa de compresión (Atecyr, 2020)

La tasa de compresión debe ser la misma ($e_c = 4,35$) para ambos tipos de compresores puesto que la línea de admisión y de expulsión, las cuales se encuentran comunicadas para todos los compresores de alta presión, deberán trabajar con presiones similares.

6.3 Comparativa de las unidades compresoras

Los compresores de tornillo se sitúan entre los compresores alternativos y los centrífugos en lo que respecta al campo de utilización de los mismos. Los compresores helicoidales abarcan caudales comprendidos entre 600 y 4000 m³/h, dependiendo de la marca y modelo empleado. Además, las presiones obtenidas en la descarga del fluido se ajustan perfectamente a las necesidades de la planta.

A continuación, se detallan las distintas características presentes en los compresores de tornillo que permiten una mayor eficiencia en la compresión del producto:

- Los lóbulos del rotor macho se comportan como pistones compresores, con la ventaja de eliminar las válvulas de admisión y escape.

- La regulación presentada en los compresores de tornillo facilita el ajuste del equipo a las posibles variaciones en la demanda de la planta. Esto se traduce en una mayor eficiencia energética del sistema y, por tanto, un menor consumo eléctrico.
- El diseño de los rotores exhibe al sistema mecánico de rozamiento, alargando la vida útil de la unidad compresora y evitando pérdidas de eficiencia por desgastes excesivos en sus piezas.
- En líneas generales, la tecnología de los compresores de tornillo permite obtener un rendimiento volumétrico mayor que el obtenido en los compresores alternativos.
- Los compresores alternativos se encuentran limitados por el sobrecalentamiento en la impulsión del fluido. En cambio, los compresores de tornillo permiten largos periodos de funcionamiento gracias al circuito de aceite que actúa como refrigerador.
- El golpeo de los pistones en los compresores actuales produce una contaminación acústica, además de vibraciones, que pueden ser perjudiciales para el equipo, aumentando el número de paradas por mantenimiento. Los compresores de tornillo reducen el nivel sonoro en torno a 25 decibelios, siendo casi insonoros en el caso de ser herméticos.
- Debido a la antigüedad de los compresores alternativos, la gestión de las funciones se realiza mediante controladores auxiliares. La instalación de un compresor de tornillo nuevo permitiría una gestión de las funciones más rápida y sencilla a través de un panel de control electrónico.

Por todo ello, se valora que instalar un compresor de tornillo junto a los compresores alternativos actuales sería la mejor opción para optimizar el proceso de compresión del amoníaco, logrando regular con mayor precisión el caudal volumétrico trasegado y, por tanto, reducir el consumo eléctrico de la planta.

6.4 Estudio técnico de las propuestas de mejora

6.4.1 Propuesta I. Compresor helicoidal de elevado caudal

La primera propuesta para optimizar el proceso de refrigeración de amoníaco se centra en la instalación de un compresor de tornillo que disponga de una gran capacidad de trasiego.

De esta manera, el equipo propuesto asumirá la carga de amoníaco durante los meses invernales donde la demanda de la planta es menor, proponiendo una regulación conforme indiquen las necesidades del proceso. En el caso de que la planta requiera un trasiego de amoníaco superior, los compresores alternativos entrarán en funcionamiento para dar apoyo al compresor de tornillo.

Para los meses estivales, dado que el consumo de la planta aumenta considerablemente, el equipo propuesto se encargará de dar apoyo a la instalación actual, logrando de este modo un ajuste más preciso al caudal demandado por la planta.

Es por ello que la alta capacidad de trasiego que presenta el compresor de tornillo proporcionará un descenso en las temperaturas de impulsión medidas en los compresores alternativos actuales, logrando un descenso de las paradas de los compresores por superar la temperatura de seguridad establecida.

A continuación, se va a analizar detalladamente la propuesta introducida. Para ello, se van a utilizar los datos de caudales medios de la planta durante los años 2017, 2018 y 2019 reflejados en la *Tabla 5.1*. Como el equipo va a trabajar como unidad compresora principal en los meses de invierno, se busca en el catálogo del fabricante aquel equipo que tenga una capacidad de trasiego superior al dato de caudal más alto de los trimestres estudiados. Así pues, al caudal de Octubre-Diciembre de 2018 (1722, 08 m³/h), se le aplica un coeficiente de seguridad de 1,10 para asegurar que el compresor de tornillo tenga capacidad holgada de trasiego. El caudal obtenido tras aplicar el coeficiente es cercano a los 1900 m³/h.

Conociendo el caudal de diseño para la elección del compresor de tornillo, se pretende analizar la gama de compresores ofrecidos por el mismo fabricante, puesto que mantiene relaciones contractuales con la empresa en el abastecimiento de materiales. El rango de caudales disponibles está comprendido entre 800 y 9200 m³/h.

Dentro del catálogo del fabricante, se ha seleccionado el modelo que cumple con las condiciones establecidas de trabajo, así como los equipos que trabajan por encima y por debajo, respecto al caudal trasegado, del valor determinado.

Tabla 6.1: Selección de compresores de tornillo de gran caudal (SABROE® PRODUCTS, 2019)

	V _D (m ³ /h) a 3000 rpm	V _D (m ³ /h) a 3600 rpm	Potencia nominal (kW) a 3600 rpm		
			High stage	Booster	Con economizador
SAB 233 S	1494	1792	1172	344	334
SAB 233 L	1880	2257	1477	484	421
SAB 233 E	2323	2788	1826	537	520

Este modelo, en sus tres variantes, está diseñado específicamente para trabajar en instalaciones de refrigeración industriales. Destaca por su excepcional fiabilidad y su alto rendimiento en la compresión para grandes trasiegos de fluido. Todos los componentes integrados en la unidad compresora están configurados para garantizar los mínimos costes de mantenimiento debido a la fácil accesibilidad del sistema.

El sistema de regulación mediante una válvula deslizante integrada en el compresor de tornillo permite una disminución efectiva de la longitud de trabajo de los rotores, reduciendo la capacidad de trasiego de amoniaco por parte del compresor. El exceso de amoniaco se recircula hacia la cámara de aspiración del equipo. El actuador activado mediante un accionamiento hidráulico desplaza de manera axial la válvula deslizante para lograr la regulación. Este método de regulación permite una regulación desde el 100% de trasiego de amoniaco hasta un 10% de la capacidad total de carga. Se descarta una regulación del compresor mediante un variador de frecuencia debido a las elevadas corrientes que se alcanzan en la planta al entrar y salir del *modo isla**.

* El modo isla tiene lugar al producir parte de la electricidad de la planta mediante una generación de energía autónoma, estando desconectados de la red eléctrica.

Tal y como se ha explicado anteriormente, el caudal real trasegado por los compresores de tornillo sufre una ligera disparidad respecto al caudal nominal expresado en la *Tabla 5.4* debido al rendimiento volumétrico, siendo el mismo $\eta_V = 91,3\%$.

Por tanto, conociendo el volumen real de amoniaco que trasiegan los tres modelos de tornillo para una velocidad de giro del motor de 3600 rpm, se analiza la regulación que sufrirá cada uno de ellos en los distintos trimestres del estudio, empleando la *ecuación (20)* para realizar el cálculo de la regulación pertinente.

Tabla 6.2: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 233 E

Q=2545,44 m ³ /h (SAB 233 E)				
Fecha	Caudal (m ³ /h)	Caudal (m ³ /h) con tornillo	Funcionamiento	Regulación (%)
Abril-Junio 2017	2216,554	2545,4	T	12,92
Julio-Septiembre 2017	2826,971	3246,5	T + C50	16,48
Octubre-Diciembre 2017	1495,897	2545,4	T	41,23
Enero-Marzo 2018	1242,954	2545,4	T	51,17
Abril-Junio 2018	1656,796	2545,4	T	34,91
Julio-Septiembre 2018	3316,447	3597,1	T + C75	11,03
Octubre-Diciembre 2018	1722,083	2545,4	T	32,35
Enero-Marzo 2019	1411,345	2545,4	T	44,55
Abril-Junio 2019	1735,284	2545,4	T	31,83

Tabla 6.3: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 233 L

Q=2060,64 m ³ /h (SAB 233 L)				
Fecha	Caudal (m ³ /h)	Caudal (m ³ /h) con tornillo	Funcionamiento	Regulación (%)
Abril-Junio 2017	2216,554	2761,7	T + C50	26,46
Julio-Septiembre 2017	2826,971	3112,3	T + C75	13,85
Octubre-Diciembre 2017	1495,897	2060,6	T	27,41
Enero-Marzo 2018	1242,954	2060,6	T	39,68
Abril-Junio 2018	1656,796	2060,6	T	19,60
Julio-Septiembre 2018	3316,447	3462,8	T + C100	7,10
Octubre-Diciembre 2018	1722,083	2060,6	T	16,43
Enero-Marzo 2019	1411,345	2060,6	T	31,51
Abril-Junio 2019	1735,284	2060,6	T	15,79

Tabla 6.4: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 233 S

Q= 1636,09 m ³ /h (SAB 233 S)				
Fecha	Caudal (m ³ /h)	Caudal (m ³ /h) con tornillo	Funcionamiento	Regulación (%)
Abril-Junio 2017	2216,554	2337	T + C50	7,37
Julio-Septiembre 2017	2826,971	3038	T + C100	12,92
Octubre-Diciembre 2017	1495,897	1636	T	8,57
Enero-Marzo 2018	1242,954	1636	T	24,03
Abril-Junio 2018	1656,796	2337	T + C50	41,58
Julio-Septiembre 2018	3316,447	3739	T + C100 + C50	25,85
Octubre-Diciembre 2018	1722,083	2337	T + C50	37,60
Enero-Marzo 2019	1411,345	1636	T	13,74
Abril-Junio 2019	1735,284	2337	T + C50	36,79

Cabe destacar que los valores de regulación obtenidos de las tablas anteriores para los trimestres donde se encuentra funcionando uno o más compresores alternativos, denotados con tonos más oscuros, se han calculado restando al caudal conocido para cada trimestre, el caudal trasegado por los compresores de pistón. De esta manera, todos los datos mostrados expresan la regulación de los compresores helicoidales.

Comparando los datos que reflejan cada uno de los modelos estudiados, ninguno de los tres compresores de tornillo supera el límite de regulación (60%) establecido por el fabricante. Aun así, hay ciertos trimestres para los que el modelo *SAB 233 E* alcanza un porcentaje de regulación cercano al 50%, lo que podría suponer un descenso en el rendimiento del equipo para situaciones en las que se produzca alguna perturbación en la demanda de la planta.

Por otro lado, el modelo *SAB 233 S* cumple con la premisa descrita, asumiendo el trabajo de compresión en las épocas invernales, a excepción de un trimestre en 2018, mientras que su funcionamiento en los meses de verano apoya a la compresión de los equipos alternativos.

En el caso del modelo *SAB 233 L*, la regulación que presenta se ajusta correctamente a las especificaciones del fabricante, con valores alejados del límite a partir del cual descendería la eficiencia del equipo. A pesar de que asuma la carga total en determinados trimestres estivales, se considera que dicho modelo se adecúa a las necesidades del proceso de refrigeración del amoniaco.

Por tanto, de las tablas anteriores se extrae que los modelos que mejor se adaptan a las necesidades de la planta son el modelo *SAB 233 L* y el modelo *SAB 233 S*.

6.4.2 Propuesta II. Compresor helicoidal de bajo caudal

La segunda propuesta para lograr una mejora del proceso de refrigeración del amoniaco consiste en instalar un compresor de tornillo de pequeño caudal junto a los compresores alternativos presentes en la planta.

En este caso, el nuevo compresor se encargará de dar apoyo al conjunto de unidades compresores actuales para ajustar de manera más precisa el trasiego de amoniaco a la demanda de la planta. De este modo, la recirculación de amoniaco será mínima y, por tanto, se optimizará el consumo energético de los compresores alternativos. Asimismo, el compresor helicoidal logrará estabilizar la oscilación producida en la presión del depósito de regulación interetapas, evitando un constante cambio en la regulación de los compresores alternativos.

Para llevar a cabo el estudio previo a la selección del compresor de tornillo óptimo, se muestra a continuación la *Figura 6.8* en la que se expresa la variación de la presión en el interetapas, habiendo calculado los ángulos formados por las pendientes que se generan en las oscilaciones de presiones.

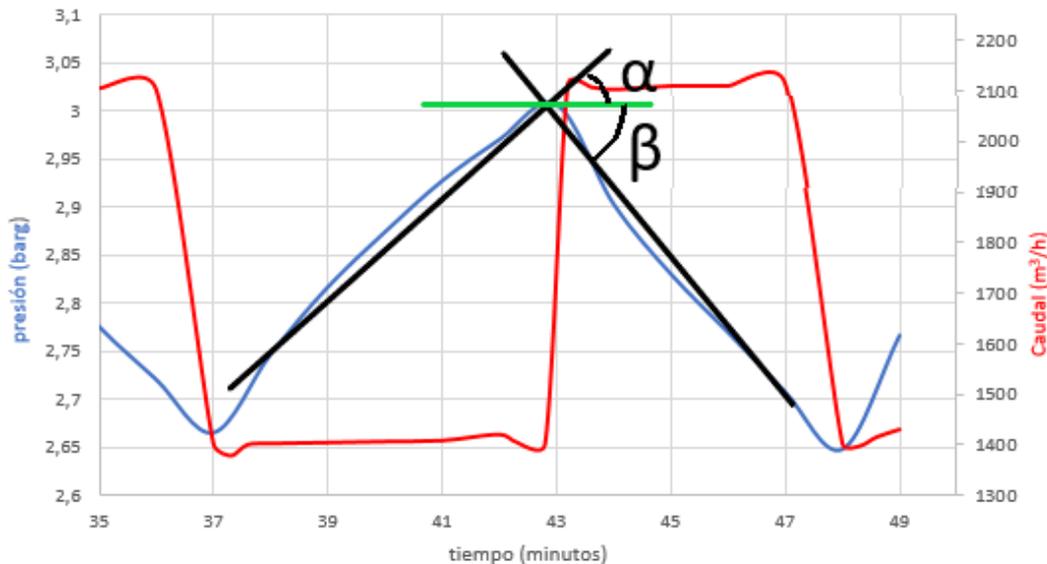


Figura 6.8: Obtención de los ángulos de la curva de presión en el depósito de regulación interetapas

De forma gráfica, se ha representado un intervalo de la *Figura 5.12* en el que se aprecie la brusca variación que sufre la presión en el depósito de regulación interetapas. A partir de las dos rectas formadas en las fases de ascenso y descenso de la presión, se ha calculado el ángulo de cada pendiente. Conociendo ciertos principios básicos de trigonometría, ambos ángulos se han obtenido a partir de la arcotangente de α y β .

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{3 - 2,67}{42,5 - 37}\right) = 3,43^\circ \quad (24)$$

$$\beta = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{|2,65 - 3|}{48 - 42,5}\right) = 3,64^\circ \quad (25)$$

Cabe destacar que las pendientes formada por las dos rectas, tanto la parte creciente como la parte decreciente, se calculan a partir de la diferencia de los dos valores del eje de ordenadas entre la diferencia de los dos valores del eje de abscisas, siendo para la recta decreciente en valor absoluto para obtener el ángulo positivo.

Así pues, tal y como se aprecia en la *Figura 6.8*, al poner en un funcionamiento un compresor alternativo al 50% de la carga total, la curva de presiones se reduce, consiguiendo una reducción del ángulo de $7,07^\circ$, siendo la suma de los dos ángulos calculados. Para ello, se necesita un caudal extra de $701,1 \text{ m}^3/\text{h}$.

Para conseguir reducir las oscilaciones provocadas por una mala regulación, se pretende que el nuevo compresor de tornillo consiga eliminar el ángulo α , estabilizando la presión en un valor cercano al punto de consigna establecido. Asimismo, deberá conservar el ángulo β para asegurar que se produzca un cambio de pendiente y, por tanto, evita sobrepasar el límite de presión superior. En este caso, el aporte de caudal necesario para una reducción del ángulo de $3,43^\circ$ se lleva a cabo mediante un aporte de caudal extra de $229 \text{ m}^3/\text{h}$.

Por ello, el caudal mínimo que debe aportar el compresor para asegurar un cambio en la pendiente de la curva de presiones será el más restrictivo entre el caudal mínimo calculado para estabilizar la pendiente y el incremento de caudal producido al aumentar la etapa de los compresores alternativos:

- $Q_{\text{mín}_{p\text{dte}}} = 229 \text{ m}^3/\text{h}$.
- $\Delta Q_{\text{etapa}_{\text{pistón}}} = 350,55 \text{ m}^3/\text{h}$.

El caudal más restrictivo es el que ofrecen los compresores alternativos al aumentar la etapa. Para permitir un margen de maniobra en la nueva unidad compresora, se le aplica un coeficiente de seguridad de 1,10 en la búsqueda del equipo en el catálogo del fabricante.

Así pues, el valor obtenido tras aplicar el coeficiente de seguridad es de $Q = 385,6 \text{ m}^3/\text{h}$. El modelo comercial inmediatamente superior a ese caudal es el correspondiente al compresor *SAB 120 E*, con un valor de volumen desplazado, $V_D = 496 \text{ m}^3/\text{h}$ trabajando a 3600 rpm. Como se ha visto anteriormente, el caudal real trasegado por el compresor se obtiene a partir de la *ecuación (19)*, siendo para este caso $Q = 452,85 \text{ m}^3/\text{h}$.

De la misma manera que sucedía para la primera propuesta, los compresores de tornillo de pequeño caudal sufren un descenso de la eficiencia a partir de una regulación del 60% del caudal total. Es por ello que el límite de regulación eficiente para el compresor *SAB 120 E* será:

$$Q_{\text{lím}} = 0,6 \cdot Q = 271,71 \text{ m}^3/\text{h} \quad (26)$$

Comparando el caudal obtenido con los valores previos, el rango de trabajo del compresor de tornillo se sitúa entre el caudal obtenido para reducir la pendiente al mínimo y el incremento de caudal producido al realizar un cambio de etapa en los compresores alternativos:

$$Q_{\text{mín}_{p\text{dte}}} < Q_{\text{lím}} < \Delta Q_{\text{etapa}_{\text{pistón}}} \quad (27)$$

Por consiguiente, el modelo *SAB 120 E* mostrará la capacidad de regulación de caudal suficiente para lograr un cambio en la pendiente de la curva de presiones. Conociendo esta premisa, se calcula las distintas pendientes que mostrará la presión del depósito de regulación interetapas para cada una de las posibilidades de compresión que presenta la planta.

La reducción del ángulo provocada por la puesta en marcha de un compresor trabajando al 50% es conocida, así como el cambio de pendiente que produce la aportación de un caudal extra de $Q_{\text{mín}_{\text{pde}}}$. De este modo, realizando una interpolación a partir de los dos valores conocidos se obtiene el ángulo que reducirá el aporte de $Q_{\text{lím}}$ en la curva de presiones del interetapas. Asimismo, se calcula el ángulo para un trabajo máximo del compresor de tornillo mediante una extrapolación de los valores conocidos.

A raíz de los ángulos calculados para cada una de las posibilidades de trabajo, la pendiente de la curva de presiones se obtiene a partir de la tangente del ángulo.

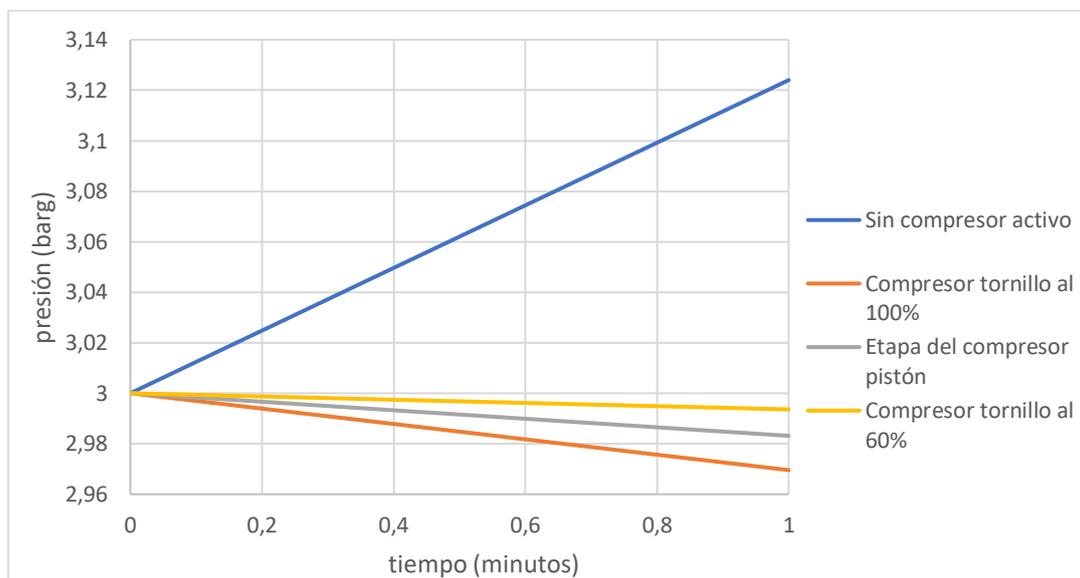


Figura 6.9: Comportamiento de la presión del depósito de interetapas para cada posibilidad de trabajo en la planta.

Como se puede observar, en el caso de que los compresores no se encuentren activos, el aumento de la presión es muy notable. Con respecto a la instalación del compresor de tornillo, para un trabajo de compresión en el límite de su eficiencia, no conseguiría anular por completo la pendiente de la presión, pero la mejora es muy significativa. Por lo que respecta a la regulación que muestran actualmente las unidades compresoras de pistón, en el caso de que se reduzca la carga a una etapa de menor trasiego, la variación de la presión sería menos brusca que pasar de la etapa del 50% a estar parado.

Cabe destacar que se ha tomado como referencia el valor límite de la presión para realizar el estudio de las pendientes. En el caso de que se instalase el compresor de tornillo, la precisa regulación que presenta a través de la válvula deslizante, lograría una mayor precisión en el control de la presión en el depósito de regulación interetapas, lo que conllevaría a un mayor ahorro energético al mantener los compresores alternativos en etapas constantes.

Si se pretende lograr que en ningún momento del proceso de refrigeración se produzca una alerta por alcanzar el límite de presiones establecido, se deberá escoger el compresor de tornillo inmediatamente por debajo de la selección actual, siendo éste el modelo *SAB 120 L*. Este compresor consta de una capacidad de volumen desplazado, $V_D = 379 \text{ m}^3/h$ para una velocidad de giro del motor de 3600 rpm. El caudal real trasegado por el modelo helicoidal es $Q = 346,027 \text{ m}^3/h$, suponiendo que el rendimiento volumétrico es el mismo para ambos compresores. Para una regulación del 60% a partir de la cual se pierde eficiencia, el compresor SAB 120L presenta un caudal de $Q_{\text{lim}} = 207,62 \text{ m}^3/h$.

Como se ha comprobado anteriormente, la pendiente de la presión en el interetapas era nula para un valor superior al límite del modelo estudiado, $Q_{\text{mín}_{\text{pate}}} = 229 \text{ m}^3/h$. Es por ello que el compresor de tornillo seleccionado sería capaz de evitar una variación de la presión, siendo el porcentaje de regulación al que debería trabajar para lograrlo:

$$\%_{\text{regulación}} = \left(1 - \left(\frac{229}{346,027}\right)\right) \cdot 100 = 33,8\% \quad (28)$$

Comparando de nuevo la pendiente en la presión que resultaría al trabajar con el modelo estudiado, se obtienen las rectas mostradas en la *Figura 6.10*:

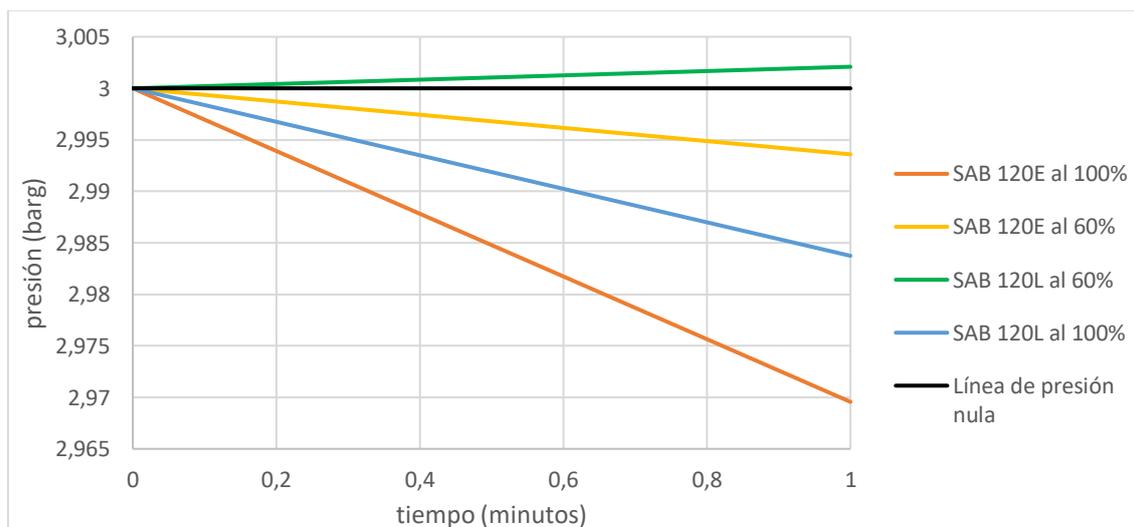


Figura 6.10: Comparativa de la presión del equipo para los dos compresores estudiados

En el supuesto de que se instale el modelo *SAB 120 L*, la regulación del mismo permite variar la pendiente de la presión en el depósito de regulación interetapas de tal forma que, para una regulación del 33,8%, la pendiente sea nula.

A parte de reducir las paradas de los compresores alternativos, la instalación del nuevo compresor de bajo caudal debe mejorar la eficiencia energética del proceso a través de una optimización de la regulación del caudal. Es por ello que, para conocer si se ajusta con precisión a los caudales demandados por la planta, es necesario estudiar la regulación que presentarán ambos modelos de compresor estudiados en el presente apartado.

Tabla 6.5: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 120 E

Q=452,85 m ³ /h (SAB 120 E)				
Fecha	Caudal (m ³ /h)	Caudal (m ³ /h) con tornillo	Funcionamiento	Regulación (%)
Abril-Junio 2017	2216,554	2556,15	C100 + C50 + T	74,99
Julio-Septiembre 2017	2826,971	2906,7	C100 + C75 + T	17,61
Octubre-Diciembre 2017	1495,897	1855,05	C100 + T	79,31
Enero-Marzo 2018	1242,954	1504,5	C75 + T	57,76
Abril-Junio 2018	1656,796	1855,05	C100 + T	43,78
Julio-Septiembre 2018	3316,447	3505,5	2C100 + C50	-
Octubre-Diciembre 2018	1722,083	1855,05	C100 + T	29,36
Enero-Marzo 2019	1411,345	1504,5	C75 + T	20,57
Abril-Junio 2019	1735,284	1855,05	C100 + T	26,45

Como bien se puede observar en la tabla anterior, el modelo de compresor *SAB 120 E* no se adecúa correctamente a la demanda de amoniaco de la planta. En dos de los nueve trimestres estudiados, la regulación que emplea causa un descenso de la eficiencia en la compresión, mostrados en un tono más oscuro. Asimismo, en el último trimestre estival de 2018, el uso de un compresor de tornillo aumentaba, todavía más, la recirculación del amoniaco trasegado por lo que se ha decidido que en ese trimestre no sería adecuado que trabajase el compresor propuesto. Es por ello que, tras analizar el modelo estudiado, no es un equipo adecuado para las condiciones de trabajo de la planta, por lo que se descarta su instalación.

Tabla 6.6: Obtención de la regulación de caudal para el compresor SAB 120 L

Q=346,027 m ³ /h (SAB 120 L)				
Fecha	Caudal (m ³ /h)	Caudal (m ³ /h) con tornillo	Funcionamiento	Regulación (%)
Abril-Junio 2017	2216,554	2449,327	C100 + C50 + T	51,40
Julio-Septiembre 2017	2826,971	3150,427	2C100 + T	71,43
Octubre-Diciembre 2017	1495,897	1748,227	C100 + T	55,72
Enero-Marzo 2018	1242,954	1397,677	C75 + T	34,17
Abril-Junio 2018	1656,796	1748,227	C100 + T	20,19
Julio-Septiembre 2018	3316,447	3505,5	2C100 + C50	-
Octubre-Diciembre 2018	1722,083	1748,227	C100 + C50 + T	5,77
Enero-Marzo 2019	1411,345	1752,75	C75 + C50	-
Abril-Junio 2019	1735,284	1748,227	C100 + T	2,86



Para la propuesta del modelo *SAB 120 L* se nota una cierta mejoría en la regulación respecto al anterior modelo. Únicamente aparece un trimestre donde la regulación requerida produciría un descenso en la eficiencia del equipo, pudiendo ser sustituido por un compresor alternativo trabajando en una etapa del 50% de la carga. Eso mismo ocurre en dos trimestres posteriores, donde la puesta en marcha del compresor de tornillo daría lugar a una regulación excesiva, por lo que se opta por emplear una compresión mediante los compresores alternativos.

Por tanto, de las dos posibilidades estudiadas en el presente apartado, la mejor opción es el modelo *SAB 120 L*, puesto que muestra una regulación mucho más eficiente respecto al primer modelo estudiado. Además, cabe destacar que previamente se ha concluido que el modelo *SAB 120 L* permite una mayor estabilidad de la curva de presiones en el depósito de regulación interetapas, aspecto de interés para mejorar la eficiencia del proceso de refrigeración.

7. SELECCIÓN DE LA PROPUESTA ÓPTIMA

Tras realizar un estudio para las distintas alternativas posibles, se ha obtenido que los modelos *SAB 120 L*, *SAB 233 L* y *SAB 233 S* son viables, técnicamente, en el proceso de refrigeración del amoníaco. Por ello, es necesario analizar qué tipo de compresor de tornillo será el más óptimo, en términos económicos, para la empresa de fertilizantes.

A partir de la información obtenida del fabricante, se conoce la potencia nominal del motor eléctrico que acompaña al compresor. Dicha potencia hace referencia a la potencia máxima con la que es capaz de trabajar la unidad compresora, aunque nunca se llega a trabajar con ese valor debido a fluctuaciones en la corriente. Es por ello que, para calcular el consumo que realizan los compresores de tornillo seleccionados, se les aplica un rendimiento del 90% para simular unas condiciones de trabajo reales.

Asimismo, se considera que los compresores de tornillo propuestos realizan la compresión mediante un funcionamiento del motor eléctrico en régimen de trabajo “Booster”. Este tipo de potencia se emplea en procesos donde se requiere niveles altos de presión en puntos determinados del proceso, a modo de refuerzo sobre la instalación principal, mientras que el régimen de trabajo “High-stage” se utiliza en el caso de que se requieran altas presiones en toda la instalación. Si se observa la *Tabla 7.1*, la potencia nominal consumida para un equipo que incluya un economizador difiere en muy poco respecto al consumo de “Booster”. Por tanto, para calcular el consumo de los equipos seleccionados se emplea la potencia nominal obtenida en el régimen de trabajo “Booster”.

Tabla 7.1: Datos de los compresores seleccionados (SABROE® PRODUCTS, 2019)

	V_D (m ³ /h) a 3000 rpm	V_D (m ³ /h) a 3600 rpm	Potencia nominal (kW) a 3600 rpm		
			High stage	Booster	Con economizador
SAB 233 S	1494	1792	1172	344	334
SAB 233 L	1880	2257	1477	484	421
SAB 120 L	316	379	243	73	73

La unidad compresora seleccionada nunca trabajará con valores de potencia nominal. Por ello, se decide aplicar un rendimiento del 90% a las potencias nominales, reflejadas en la *Tabla 7.1*, para obtener la potencia real estimada que consumirá cada uno de los compresores estudiados al trabajar con un caudal máximo.

Tabla 7.2: Datos de caudal y potencia de los compresores estudiados

	Potencia (kW)	Caudal (m ³ /h)	Q/P (m ³ /h)/kW	€/h
SAB 233 L	435,6	2060,64	4,73	24,74
SAB 233 S	309,6	1636,09	5,28	17,59
SAB 120 L	65,7	346,027	5,27	3,73
ALTERNATIVO	352,5	1402,2	3,98	20,02

A raíz de la tabla anterior, la diferencia de caudal trasegado por unidad de potencia consumida es notable entre los compresores de tornillo propuestos y los compresores alternativos actuales. Así pues, conociendo el precio del kilovatio a partir de la *Tabla 5.3*, se obtiene el coste que supone una hora de trabajo para cada compresor. Dividiendo dicho valor entre el caudal trasegado se obtiene el coste de mover $1 \text{ m}^3/\text{h}$ de amoníaco.

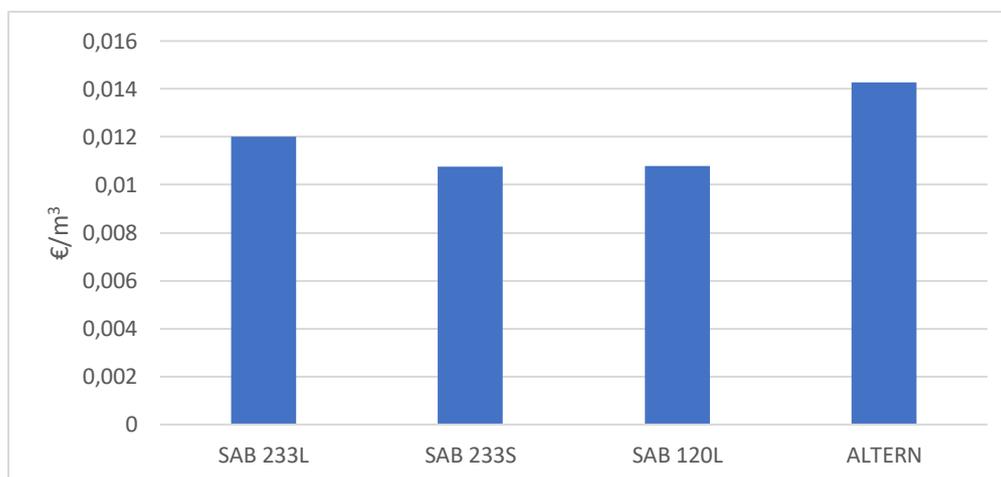


Figura 7.1: Comparación del gasto económico producido por la compresión de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ de amoníaco

Como se puede observar en la gráfica anterior, el coste de mover 1 m^3 de amoníaco es mayor en los compresores alternativos instalados actualmente, mientras que los modelos *SAB 233 S* y *SAB 120 L* presentan un coste menor de trasiego.

Los datos reflejados no permiten discernir cual es la mejor opción para realizar la compresión en el proceso de refrigeración puesto que, en el caso de instalar un compresor de tornillo, habría que ver el consumo energético que producen todas las unidades compresoras que se encuentren en funcionamiento. Es por ello que, para poder comparar correctamente la eficiencia de los compresores de tornillo seleccionados, se estudia el consumo energético que producirían durante las fechas analizadas en el presente proyecto, pudiendo así obtener la diferencia del consumo realizado por las tres unidades compresoras propuestas y, por ende, el beneficio económico al instalar un nuevo equipo.

Cabe destacar que, para calcular la regulación que presentarán los compresores de alta presión se decide trabajar con el promedio de los caudales para cada trimestre, aplicando a dichos valores un coeficiente de seguridad de 1,10. De esta manera, se asegura que la regulación que presentará el compresor de tornillo cumplirá con la demanda de la planta pese a perturbaciones indeseadas en el caudal trasegado por la unidad compresora.

Tabla 7.3: Comparativo de consumos para cada trimestre con un compresor *SAB 120 L*

SAB 120 L	Caudal (m^3/h)	Funcionamiento	Potencia total (kW)
Ene-Mar	1327,15	T + C100	418,16
Abr-Jun	1869,54	T + C75 + C50	640,67
Jul-Sept	3071,70	T + 2C100	770,61
Oct-Dic	1608,99	T + C100	418,16

Tabla 7.4: Comparativo de consumos para cada trimestre con un compresor SAB 233 S

SAB 233 S	Caudal (m ³ /h)	Funcionamiento	Potencia total (kW)
Ene-Mar	1327,15	T	309,6
Abr-Jun	1869,54	T + C50	575,43
Jul-Sept	3071,71	T + C100 + C50	927,88
Oct-Dic	1608,99	T	309,6

Tabla 7.5: Comparativo de consumos para cada trimestre con un compresor SAB 233 L

SAB 233 L	Caudal (m ³ /h)	Funcionamiento	Potencia total (kW)
Ene-Mar	1327,15	T	435,6
Abr-Jun	1869,54	T	435,6
Jul-Sept	3071,71	T + C75	744,74
Oct-Dic	1608,99	T	435,6

En las tablas anteriores se puede apreciar la potencia eléctrica consumida para cada una de las tres instalaciones propuestas. Asimismo, se incluye el consumo realizado por las unidades compresoras de pistón para las respectivas etapas que se encuentren en funcionamiento, habiéndose representado los datos de la potencia eléctrica consumida por las distintas etapas de carga en la *Figura 5.17*.

La regulación de los compresores de tornillo se produce mediante la acción de la válvula deslizante, tal y como se explica en el *apartado 6.2*. Debido a la falta de datos sobre las prestaciones que presentan los modelos seleccionados, se desconoce la variación de la potencia al reducir el caudal trasegado de amoniaco. Es por ello que se decide trabajar en la peor situación posible, asumiendo que el consumo energético del compresor de tornillo propuesto es máximo.

Así pues, multiplicando la potencia total consumida por la instalación propuesta por el precio del kilovatio se obtiene el gasto por cada hora de funcionamiento de las distintas propuestas realizadas. Cabe destacar que en el gráfico mostrado a continuación se ha añadido el dato de los compresores alternativos actuales, obtenido en la *Tabla 5.4*, para observar el beneficio económico que supone modificar la lógica del funcionamiento actual.

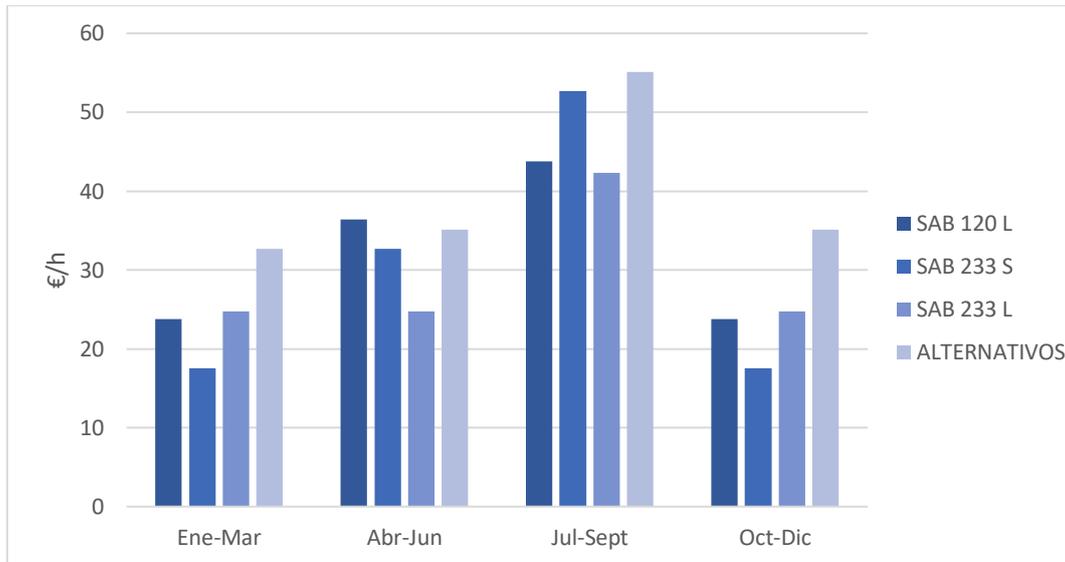


Figura 7.2: Comparación del gasto por hora de los compresores propuestos y la instalación actual

Como se puede apreciar en la *Figura 7.2*, el mayor gasto trimestral se produce actualmente, por lo que cualquiera de los tres compresores seleccionados produciría un beneficio económico para la empresa. Ahora bien, para conocer el equipo que minimizará el consumo energético, es necesario calcular el coste total de un año en funcionamiento. Comparando los equipos propuestos, el mayor ahorro energético durante los meses estivales se produciría con el modelo *SAB 233 L*, mientras que, para los meses invernales, el modelo *SAB 120 L* conseguiría optimizar el consumo energético de las unidades compresoras.

Si se multiplica el dato mostrado en el gráfico anterior para cada unidad compresora por el número total de horas en funcionamiento, es decir, por 24 horas y por 91 días, se obtiene el coste de los compresores en funcionamiento para cada trimestre. Realizando la suma de los cuatro trimestres, se obtiene el coste total de la instalación anualmente, representado a continuación en la *Figura 7.3*.

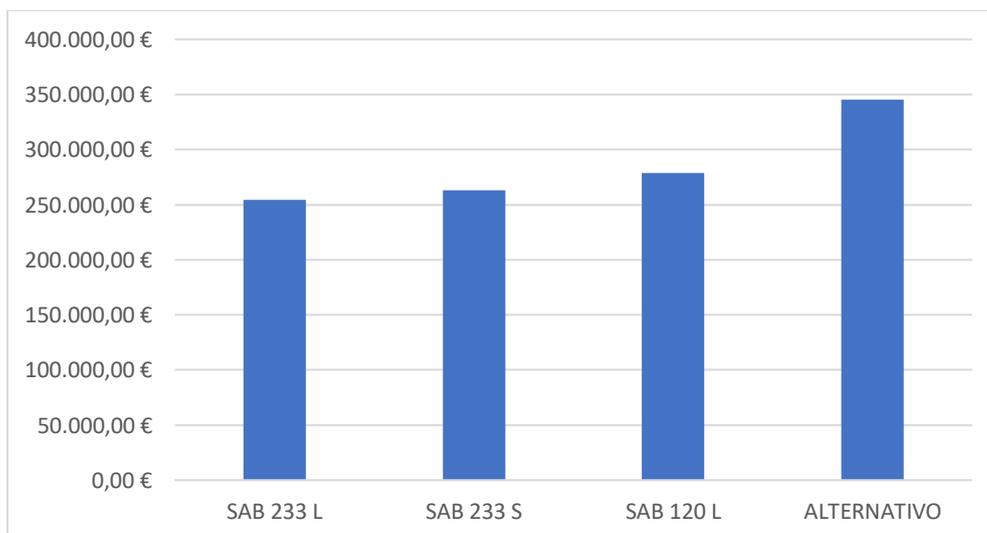


Figura 7.3: Coste total de cada propuesta para un año de trabajo

A raíz de la gráfica anterior, se puede concluir que la opción más viable para mejorar el proceso de refrigeración del amoníaco es la instalación del modelo *SAB 233 L*, el cual se encargará de comprimir el NH_3 durante los meses invernales y, para los meses estivales, dará apoyo a los compresores alternativos con un ajuste mucho más preciso que la instalación actual. Asimismo, en el estudio realizado sobre el modelo seleccionado, en la *Tabla 7.5*, se puede observar como la regulación del compresor permite trabajar en todo momento con la máxima eficiencia posible puesto que en ningún trimestre rebasa el límite de regulación establecido. De este modo, instalar el modelo seleccionado permitirá optimizar el ahorro energético de los equipos, disminuyendo las paradas por superar los límites de presión, PSL y PSH, del depósito de regulación interetapas.

El compresor de tornillo propuesto se ubicará en una zona próxima a los compresores de baja presión actualmente instalados. Observando el plano proporcionado por el tutor de la empresa (ANEXO II), existe la posibilidad de desmantelar un equipo en desuso dedicado al venteo del conducto de amoníaco, situado al lado del equipo 31K-102C, uno de los compresores de baja presión de la planta.

Según la información proporcionada, la distancia mínima que debe existir entre los compresores y el resto de instalaciones colindantes debe ser de 1200 mm. Por tanto, tomando medidas de la zona disponible en la planta de refrigeración, se obtiene que el espacio libre para el compresor de tornillo es el mostrado en la *Figura 7.4*:

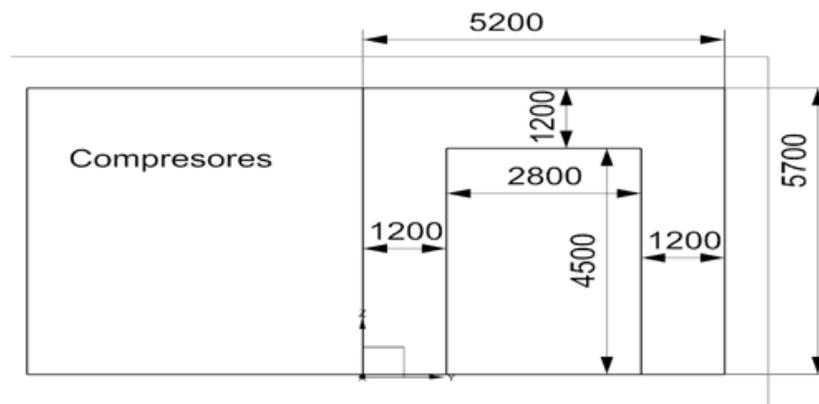


Figura 7.4: Croquis de la ubicación disponible para el compresor propuesto

A partir de la información obtenida en el catálogo del fabricante, se conoce que las dimensiones del compresor seleccionado son 3700 x 1800 x 2200 mm (largo x ancho x alto). Por tanto, la unidad compresora se adapta perfectamente al espacio disponible en la planta.

8. ESTUDIO ECONÓMICO DE LA PROPUESTA SELECCIONADA

Para conocer el beneficio económico que logrará la empresa mediante la puesta en marcha del compresor de tornillo propuesto, es necesario elaborar un presupuesto referido a los costes de la instalación del equipo, incluyendo todos los aspectos posibles que permitan determinar la inversión necesaria para adquirir la unidad compresora. Asimismo, se deberá analizar el ahorro producido al trabajar con la nueva lógica de funcionamiento para poder determinar el tiempo necesario para recuperar la inversión realizada.

8.1 Coste de la inversión

8.1.1 Materiales

La instalación del compresor de tornillo requiere de todos los elementos auxiliares necesarios para que el equipo funcione correctamente. Dichos componentes serán similares a los que se encuentran actualmente en los compresores alternativos. A partir del software con el que trabaja la empresa, se ha obtenido la lista de materiales necesarios, así como el coste de cada uno de ellos.

Tabla 8.1: Coste de los materiales complementarios para el compresor de tornillo

Material	Cantidad	Existencias	Coste unitario (€)	Coste (€)
Tubería 4" SCH40	3,62	0	41	148,42
Tubería 6" SCH40	3	0	39	117
V. COMPUERTA 6"	1	0	726	726
V. COMPUERTA 4"	1	5	263	263
V. COMPUERTA 1 1/2"	2	0	1560	3120
V. ANTIRRETORNO 4"	1	10	209	209
REDUCCIÓN 1 1/2" A 1"	2	0	9,768	19,54
V. BOLA 1 1/2"	1	0	1335	1335
COSTE TOTAL				5937,96

8.1.2 Compresor helicoidal

A través de la ayuda del tutor de la empresa, se ha conseguido hablar con el responsable comercial del fabricante para obtener un precio estimado del compresor de tornillo seleccionado. En el ANEXO III se puede encontrar el presupuesto de la instalación de la unidad compresora. Asimismo, el precio reflejado incluye la mano de obra necesaria para instalar el equipo correctamente, así como ensayos no destructivos, pruebas reglamentarias y demás requisitos previos a la puesta en marcha.

El importe total, en bruto, del compresor de tornillo SAB 233 L es de 206.117,00 €.

8.1.3 Instrumentación eléctrica y cableado

Por último, para completar la instalación de la nueva unidad compresora es necesario calcular el coste de los elementos relacionados con la parte eléctrica del equipo, tanto para el cuadro de control local como para el motor eléctrico y las válvulas automatizadas.

El fabricante no ha detallado ningún coste relacionado con la instrumentación y el cableado eléctrico, por lo que el tutor de la empresa ha estimado un precio razonable, comparando con el montaje requerido para unidades similares.

El importe estimado del cableado y la instrumentación eléctrica es de 2.000,00 €, incluyendo la mano de obra requerida por parte de los técnicos electricistas.

8.1.4 Presupuesto de la inversión

Por tanto, la inversión necesaria para adquirir la unidad compresora será de 214.054,96 €. Añadiendo los gastos generales y el beneficio industrial que espera la empresa del proyecto, se obtiene el precio que se deberá invertir para instalar el nuevo compresor de tornillo.

Tabla 8.2: Resumen del presupuesto del compresor de tornillo propuesto

Descripción	Subtotal (€)	Importe (€)
Materiales	5.937,96	
Equipo y mano de obra	206.117,00	
Instrumentación eléctrica y cableado	2.000,00	
Presupuesto Total de Ejecución Material		214.054,96
13% Gastos Generales	27.827,14	
6 % Beneficio Industrial	12.843,29	
Suma de Gastos Generales y Beneficio Industrial		40.670,44
Presupuesto Total de Inversión		254.725,40
21% I.V.A.	53.492,33	
Presupuesto Total de Ejecución por Contrata		308.217,74

Asciende el Presupuesto de Ejecución por Contrata a la expresada cantidad de: TRESCIENTOS OCHO MIL DOSCIENTOS DIECISIETE EUROS CON SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

8.2 Costes de mantenimiento

El mantenimiento de los compresores alternativos actuales supone un gasto excesivo para la empresa. Con la instalación del nuevo modelo helicoidal, se conseguirá reducir el trabajo realizado por los compresores de pistón, reduciendo así el coste producido por labores de mantenimiento en la planta.

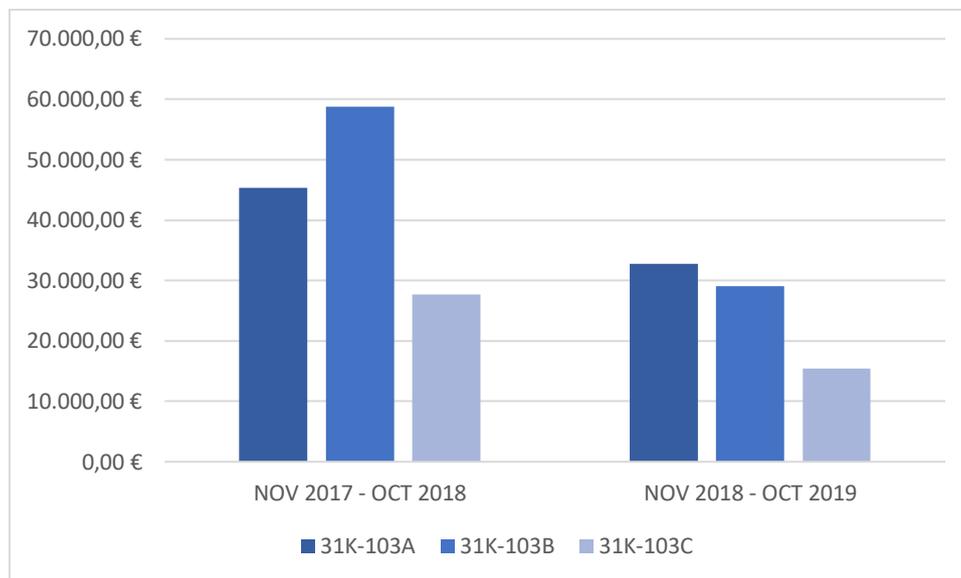


Figura 8.1: Gasto producido por el mantenimiento de los compresores alternativos.

La *Figura 8.1* muestra el gasto total en mantenimiento en los últimos tres años producido por los compresores de alta presión instalados actualmente incluyendo los materiales, la mano de obra y las pérdidas producidas por la parada de la unidad compresora.

Con la puesta en marcha del compresor de tornillo propuesto, cambiaría la lógica de funcionamiento actual, disminuyendo considerablemente los arranques de motores y los cambios de etapa producidos en los compresores de pistón debido a una mejora en la estabilidad de la presión en el depósito de regulación interetapas y la temperatura de impulsión.

Por todo ello, se evalúa una mejora en el gasto producido por paradas de mantenimiento, reduciendo el coste total en un 30%. A partir de la *Figura 8.1*, se conoce la media del gasto en los tres compresores por año, siendo de 131.803,00 € para el primer periodo estudiado y de 77.239,00 € para el segundo periodo.

Por tanto, el ahorro en gastos de mantenimiento que se producirá con la entrada en funcionamiento del compresor de tornillo será de 31.356,00 € anuales.

Los gastos de mantenimiento producidos por el compresor helicoidal serán muy reducidos puesto que la unidad compresora es nueva, por lo que se asume que dichos costes serán nulos para los primeros años de funcionamiento.

8.3 Viabilidad económica del proyecto

Anteriormente se ha calculado el consumo energético para cada una de las lógicas de funcionamiento propuestas, observando las diferencias denotadas entre ellas.

Así pues, el ahorro producido por la instalación del compresor de tornillo se describe mediante la diferencia del coste energético de la instalación actual y el coste estimado de la instalación propuesta para el modelo SAB 233 L:

$$\text{Ahorro} = 345.142,86 \text{ €} - 254.496,02 \text{ €} = 90.646,84 \text{ €} \quad (29)$$

Si a ese valor calculado en la *ecuación (29)* se le suma el ahorro producido por la reducción estimada en las paradas de mantenimiento, se obtiene el ahorro total de la nueva lógica propuesta de funcionamiento, siendo 122.002,84 € anuales.

Por tanto, conociendo la inversión necesaria para adquirir el compresor de tornillo propuesto, así como todos los elementos complementarios que se necesitan, es posible calcular el tiempo que tardará la empresa en recuperar el dinero invertido.

Cabe destacar que para el estudio económico de la planta no se tiene en cuenta el coste de la materia prima, así como tampoco se tiene en cuenta el beneficio que provoca el producto fabricado a partir del amoniaco. El estudio se centra en la rentabilidad económica del nuevo compresor de tornillo debido a una reducción del consumo energético y una mejora en la eficiencia de la planta debido a la instalación de la unidad compresora propuesta.

Para calcular correctamente la amortización del compresor de tornillo seleccionado se emplea el coeficiente lineal máximo definido en la Ley 27/2014, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades: Artículo 12, Correcciones de valor: amortizaciones, siendo del 10% del Presupuesto Total de Inversión del compresor.

Los flujos de caja calculados, incluyendo impuestos del 21% sobre el beneficio bruto para los años posteriores a la inversión realizada, son los siguientes:

Tabla 8.3: Flujos de caja de los próximos 5 años

AÑO 0	- 308.217,74 €
AÑO 1	76.258,94 €
AÑO 2	76.258,94 €
AÑO 3	76.258,94 €
AÑO 4	76.258,94 €
AÑO 5	76.258,94 €

Como se puede observar en la *Tabla 8.3*, el beneficio producido por la instalación del compresor de tornillo propuesto implica una recuperación de la inversión en un plazo reducido.

Para conocer con precisión la rentabilidad del proyecto, es necesario calcular el valor actual neto, VAN, y la tasa interna de retorno, TIR.

El VAN representa el valor actualizado de todos los flujos de caja esperados. Un resultado positivo indica que el proyecto es viable económicamente para los años definidos. Para determinar el valor, se emplea la siguiente ecuación:

$$VAN = -I_0 + \sum_{j=1}^n \frac{FN_j}{(1+i)^j} = 53.686,36 \text{ €} \quad (30)$$

Donde I_0 hace referencia al coste de la inversión, FN_j al flujo neto generado por la inversión en el año j , i se trata del interés fijo asociado al capital invertido, asumiendo un valor del 5% y j es igual al año en curso.

A raíz del resultado positivo del VAN calculado se puede afirmar que la inversión realizada en la adquisición del compresor de tornillo será recuperada en el quinto año.

Aun así, para valorar correctamente la viabilidad del proyecto es necesario calcular la TIR. Dicho valor expresa el interés normal del dinero en el mercado de capitales que hace 0 el VAN. Únicamente será interesante realizar el proyecto si el valor obtenido es superior al interés fijado anteriormente como un 5%. La ecuación empleada para calcular la TIR es la siguiente:

$$VAN = -I_0 + \sum_{j=1}^n \frac{FN_j}{(1+\lambda)^j} = 0 \quad (31)$$

Donde λ es la TIR y el resto de variables se han definido en la ecuación previa.

Así pues, el valor calculado para la TIR es $\lambda = 10,31\%$. Dicho valor resulta ser mayor que el coste de capital asumido por lo que se puede afirmar con certeza que la propuesta planteada será viable económicamente.

9. CONCLUSIONES

El presente proyecto analiza con detalle la problemática actual que presentan los compresores de alta presión en la planta de refrigeración del amoniaco. De esta manera, el estudio de la instalación permite conocer las dificultades de las unidades compresoras actuales.

La vasta regulación de los compresores alternativos provoca un desajuste entre el caudal trasegado por los equipos y el caudal demandado por la planta. Además, los compresores de pistón presentan una disminución en la eficiencia volumétrica al trabajar con etapas de carga menores. Es por ello que en los meses invernales cuando la demanda de la planta es menor, el desajuste es notable, provocando un malgasto de la potencia eléctrica empleada puesto que parte del amoniaco trasegado debe recircularse.

Asimismo, la presión en el interior del depósito de regulación interetapas también se ve afectada por la problemática presente en la regulación de las unidades compresoras de pistón. La excesiva variación de carga al reducir o aumentar de etapa implica una pendiente muy pronunciada en la presión del depósito de regulación interetapas. Al sobrepasar los límites de presión establecidos, se produce el cambio de etapa del compresor para lograr ajustar el valor dentro del rango. Las oscilaciones producidas en la presión del depósito conllevan un constante encendido y apagado de los compresores, provocando un aumento en el consumo energético de la instalación, además de un incremento en las labores de mantenimiento de las unidades compresoras.

Por todo ello, el proyecto plantea la incorporación de una nueva unidad compresora que cumpla con los requisitos de la planta, mejore la eficiencia en la compresión y presente una regulación mucho más extensa. Así pues, tras estudiar diversos modelos, se decide que la opción más conveniente para optimizar el proceso de refrigeración del amoniaco es la instalación de un compresor de tornillo que permita un gran trasego de caudal. La nueva unidad compresora asumirá por completo el caudal trasegado durante los meses invernales y trabajará como equipo de apoyo a los compresores alternativos en los meses estivales, cuando el caudal trasegado es mucho mayor. De esta forma, los equipos en funcionamiento se ajustarán con mayor precisión a la demanda de la planta, reduciendo el consumo energético de la instalación.

La nueva lógica de funcionamiento propuesta permitirá disminuir las oscilaciones en el interior del depósito de regulación interetapas, estabilizando la presión en valores cercanos al punto de consigna establecido. De esta manera, los compresores alternativos alargarán su vida útil, reduciendo el malgasto energético y las paradas por mantenimiento.

Tras analizar en profundidad la propuesta descrita, se concluye que la instalación del modelo SAB 233 L seleccionado cumple con todos los requisitos necesarios para mejorar el proceso de refrigeración del amoniaco. Así pues, se concluye que la unidad compresora helicoidal es viable en términos económicos, permitiendo recuperar la inversión realizada en un plazo estimado de 5 años, reduciendo de esta manera los gastos superfluos que presenta la empresa.

10. BIBLIOGRAFÍA

- (Febrero de 2004). Obtenido de Instruction Manual for SMC 186-188 Mk2:
<https://es.scribd.com/document/288593222/SMC-186-188-Mk2-InstructionManual-2004-02-eng>
- (30 de Junio de 2009). Obtenido de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Salitre#/media/Archivo:Nitrato_de_Chile_01_by-dpc.jpg
- (24 de Abril de 2012). Obtenido de Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes:
<http://www.anffe.com/informaci%F3n%20de%20inter%E9s/documentos%20de%20inter%E9s/MITOS%20y%20REALIDADES%20sobre%20los%20fertilizantes.pdf>
- (29 de Enero de 2015). Obtenido de fierrosclasicos: <https://fierrosclasicos.com/que-es-una-biela-como-funciona/>
- (04 de Abril de 2020). Obtenido de International Plant Nutrition Institute:
[http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/118E9B3F7DB0FBD385257BBA0059BCOC/\\$FILE/NSS-ES-10.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/118E9B3F7DB0FBD385257BBA0059BCOC/$FILE/NSS-ES-10.pdf)
- (02 de Abril de 2020). Obtenido de Worldometer: <https://www.worldometers.info/world-population/#pastfuture>
- (04 de Abril de 2020). Obtenido de Grupo Fertiberia:
https://www.grupofertiberia.com/media/605359/sagunto_esp.pdf
- (20 de Mayo de 2020). Obtenido de Atecyr: <http://www.calculaconatecyr.com/bpfrio.php>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineeris (ASHRAE). (1997). *ASHRAE Handbook 1997: Fundamentals*. SI Edition.
- Bloch, H. P., & Hoefner, J. J. (1996). *Reciprocating compressors: Operation and Maintenance*. Gulf Professional Publishing.
- C. Whitman, W., & M. Johnson, W. (2000). *Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado, Volumen 4*. Paraninfo.
- CNMC. (18 de Febrero de 2019). Obtenido de Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia:
<https://www.cnmc.es/estadistica/precios-mercado-2019>
- Fernández Díez, P. (s.f.). Recuperado el 2020, de <https://pfernandezdiez.es/es/>
- Finck, A. (1988). *Fertilizantes y fertilización*. Reverté.
- García, J. (2019). *Apuntes Procesos Industriales de Ingeniería Química*.
- Navarro, G., & Navarro, S. (2014). *Fertilizantes: Química y acción*. Paraninfo.
- Rapin, P. J., & Jacquard, P. (2006). *Instalaciones Frigoríficas, Volumen 2*. Marcombo.
- Rivera, E. (11 de Abril de 2020). *Universidad Técnica de Oruro*. Obtenido de http://docentes.uto.edu.bo/eriverac/wp-content/uploads/Termodin%C3%A1mica_de_los_compresores1.pdf



SAB 193-233-283 screw compressors manual. (Mayo de 2012). Obtenido de Operating manual - SAB screw compressors units 193-233-283: <http://docplayer.net/85211289-Sab-193-233-283-atex-screw-compressor-units.html>

SABROE® PRODUCTS. (2019). Obtenido de https://www.sabroe.com/fileadmin/user_upload/Marketing/Brochures/General/SABROE_PRODUCTS_2019_final_SB-4106_GB120dpi.pdf

Stosic, N., K Smith, I., Kovacevic, A., & Mujic, E. (9 de Julio de 2016). *Geometry of screw compressor rotors and their tools.* London, United Kingdom.

Torrella Alcaráz, E. (2000). *La producción de frío.* UPV.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA

PRESUPUESTO

1. ELEMENTOS DEL PRESUPUESTO

1.1 Tablas

Tabla 2.1: Cuadro de precios del software y hardware empleado.....	2
Tabla 2.2: Cuadro de precios del desplazamiento realizado a la empresa	3
Tabla 2.3: Cuadro de precios de la mano de obra	3
Tabla 2.4: Resumen del presupuesto de la elaboración del proyecto.....	4

2. COSTES DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El presente presupuesto tiene como objetivo valorar económicamente el coste de la ejecución del proyecto, incluyendo todos los gastos necesarios para su elaboración.

En este apartado se desglosarán los distintos recursos empleados a través de cuadros de precios donde se muestren los precios de cada material empleado. De esta manera, se cuantificarán las horas dedicadas a la realización del estudio de la planta, obteniendo un presupuesto estimado sobre la redacción del TFG.

2.1 Material empleado

Tabla 2.1: Cuadro de precios del software y hardware empleado

Concepto	Unidad	Medición	Rendimiento	Precio total (€)
Licencia software Microsoft 365	Euros/Unidad	126	0,33	41,58
Ordenador portátil HP	Euros/Unidad	650	0,06	43,33
Total				84,91

En el cuadro de precios mostrado en la *Tabla 2.1* se especifican los rendimientos de cada uno de los materiales empleados. Para obtener el rendimiento del software y hardware utilizado en la elaboración del proyecto se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Amortización} = \frac{A}{B} \cdot C \cdot D \quad (1)$$

donde A es el número de meses que se usa el equipo en el proyecto; B es el periodo de amortización, el cual varía dependiendo la naturaleza del bien; C es el coste del equipo y D es el porcentaje de uso del equipo.

En el caso del ordenador, se considera que la amortización del equipo se realiza en 6 años, mientras que la licencia de Microsoft 365 tiene un periodo anual, por lo que su amortización es de 1 año. Los porcentajes de uso se consideran en ambos casos del 100% puesto la elaboración del proyecto se realiza en su totalidad mediante el ordenador portátil.

2.2 Desplazamientos a la empresa

Tabla 2.2: Cuadro de precios del desplazamiento realizado a la empresa

Concepto	Precio unitario	Cantidad	Precio total (€)
Dietas	4,9	10	49
Desplazamiento	3,34	10	33,4
Total			82,4

En la *Tabla 2.2* se muestran los gastos referidos al desplazamiento realizado a las instalaciones de la empresa, incluyendo el coste de las comidas en un local cercano a la fábrica. Al comenzar la elaboración del TFG en el mes de marzo, la situación vivida en el presente año no ha permitido desarrollar el proyecto en la propia fábrica, por lo que se ha trabajado a distancia a través de un contacto cercano con el tutor de la empresa.

El precio unitario reflejado en el desplazamiento se calcula a partir de la distancia a la que se encuentra la empresa de la residencia actual del autor del proyecto, multiplicado por el consumo de combustible estimado en carretera del vehículo utilizado, un Peugeot 307.

$$\text{Coste}_{\text{desplazamiento}} = 5,2 \frac{\text{litros}}{100 \text{ km}} \cdot 1,22 \frac{\text{€}}{\text{litro}} \cdot 52,6 \text{ km} = 3,34 \text{ €/día} \quad (2)$$

2.3 Mano de obra

Por último, para estimar el coste del proyecto, es necesario conocer el cuadro de precios de la mano de obra empleada. El salario medio del tutor de la UPV, titular de Universidad, se sitúa en 38,2 €/hora, siendo aportado dicho dato por el Servicio de Gestión de la I+D+I de la UPV. Suponiendo una media de dos horas dedicadas al proyecto por cada una de las reuniones realizadas entre el autor y el tutor, se estima una dedicación de 20 horas. Asimismo, el sueldo del autor se ha estimado a partir del coste anual bruto mínimo para un titulado superior, siendo de 21.752,90 €.

Tabla 2.3: Cuadro de precios de la mano de obra

Concepto	Precio (€/hora)	Cantidad	Precio total (€)
Alumno de Ing. Química	12,36	300	3707,88
Titular de Universidad	38,2	20	764
Total			4471,88

2.4 Presupuesto Total

Para el desarrollo del Presupuesto Total se deben tener en cuenta los Gastos Generales y el Beneficio Industrial del proyecto. Estos serán del 13% y del 6%, respectivamente. Asimismo, se debe incluir el IVA, del 21%, sobre el Presupuesto Total de Inversión.

Tabla 2.4: Resumen del presupuesto de la elaboración del proyecto

Descripción	Subtotal (€)	Precio total (€)
Materiales y recursos empleados	167,31	
Mano de obra	4471,88	
Presupuesto Total de Ejecución Material		4639,19
13% Gastos Generales	603,09	
6% Beneficio Industrial	278,35	
Suma de Gastos Generales y Beneficio Industrial		881,44
Presupuesto Total de Inversión		5520,63
21% I.V.A.	1159,33	
Presupuesto Total de Ejecución por Contrata		6679,96

Asciende el Presupuesto de Ejecución por Contrata a la expresada cantidad de: SEIS MIL SEISCIENTOS SETENTA Y NUEVE EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA

ANEXO

Ficha de Datos de Seguridad

De acuerdo con el Reglamento (UE) 2015/830 de la Comisión

Fecha de edición 14/12/2017
Edición 6
Fecha de revisión 20/04/2020
Revisión Z

Amoniaco Anhidro

SECCIÓN 1		Identificación de la sustancia o de la mezcla y de la sociedad o la empresa					
1.1	Identificador del producto						
	Nombre comercial del producto	Amoniaco anhidro 82%; Amoniaco grado metalúrgico					
	Nombre químico	Amoniaco					
	Sinónimos	Amoniaco Líquido, Amoniaco Licuado, Amoniaco Anhidro.					
	Formula química	NH3					
	Número de índice EU	007-001-00-5					
	CE No	231-635-3					
	CAS No.	7664-41-7					
	REACH o Número nacional de registro del producto	01-2119488876-14-0038					
1.2	Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados						
	Usos identificados	Distribución y formulación, como sustancia intermedia en diversos procesos industriales, aditivo de proceso como agente auxiliar, producto químico de laboratorio, producto de limpieza, regulador de pH, fertilizante.					
	Usos desaconsejados	<u>Cualquier otro uso</u>					
1.3	Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad						
	Nombre de la compañía	FERTIBERIA. S.A..					
	Dirección de la compañía	Paseo de la Castellana, 259 D. Plantas 47 y 48 - 28046 Madrid					
	Teléfono de la compañía	Central: 91.586.62.00; Fábrica de Avilés: 985.57.78.50; Fábrica de Huelva: 959.28.12.11; Fábrica de Palos: 959.49.24.00; Fábrica de Puertollano: 926.44.93.00; Fábrica de Sagunto: 962.69.90.04					
	e-mail de la compañía para FDS	reachfertiberia@fertiberia.es					
1.4	Teléfono de emergencia						
	Fábrica de Avilés: 985.57.78.50; Fábrica de Huelva: 959.28.12.11; Fábrica de Palos: 959.49.24.00; Fábrica de Puertollano: 926.44.93.00; Fábrica de Sagunto: 962.69.90.04						
SECCIÓN 2		Identificación de los peligros					
2.1	Clasificación de la sustancia o de la mezcla*						
	De acuerdo con el Reglamento CE 1272/2008 [CLP] Flam. Gas 2; H221 Compressed gas; H280 Acute Tox. 3; H331 Skin corr. 1B; H314 Eye Dam. 1; H318 Aquatic Acute 1; H400 Aquatic Chronic 2; H411 EUH071						
2.2	Elementos de la etiqueta						
	Pictogramas	Palabra de advertencia	Indicaciones de peligro	Consejos de Prudencia			
		Peligro	H221 H280 H314 H331 H400 H411 <u>Información suplementaria</u> EUH071	P210 P260 P280 P303+P361+P353 P305+P351+P338 P310 P403+P233			
2.3	Otros peligros						
	No cumple con los criterios de sustancia PBT ni mPmB						
* Para conocer el significado completo de las indicaciones de peligro (H): ver sección 16							
SECCIÓN 3		Composición/información sobre los componentes					
3.1	<u>Sustancia</u>						
	Nombre	Nº CE	Nº CAS	%(p/p)	Nombre IUPAC	Clasificación Rgto. 1272/2008	Límites de concentración específicos
	Amoniaco anhidro	231-635-3	7664-41-7	>=99,5%	Ammonia	Flam. Gas 2; H221 Compressed gas; H280 Acute Tox. 3; H331 Skin corr. 1B; H314 Eye Dam. 1; H318 Aquatic Acute 1; H400 Aquatic Chronic 2; H411 EUH071	1.0≤C<5.0: Skin Irrit. 2; H315 C≥ 5.0: Skin Corr. 1B; H314; STOT Single Exp. 3; H335 2.5≤C<25.0: Aquatic Chronic 3; H412 C≥25.0: Aquatic Acute 1; H400 Aquatic Chronic 2; H411
3.2	<u>Mezcla</u> No aplica						

Amoniaco Anhidro

SECCIÓN 4 Primeros auxilios											
4.1	Descripción de los primeros auxilios										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">General</td> <td>La rapidez es esencial. Las personas que intervienen en tareas de primeros auxilios deben estar adecuadamente protegidos. (ver sección 8). Retire a la persona afectada para evitar más exposiciones. Proporcione primeros auxilios y obtenga inmediatamente atención médica en todos los casos. Asegúrese de que las instalaciones lavajos y las duchas de seguridad estén instaladas en las proximidades del lugar de trabajo.</td> </tr> <tr> <td>Inhalación</td> <td>En caso de accidente por inhalación, traslade a la persona afectada al aire libre y haga que descansa. Tumbe a la persona afectada en posición de recuperación, cúbrala y no permita que se enfríe. Si es preciso suministre oxígeno o respiración artificial. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.</td> </tr> <tr> <td>Ingestión</td> <td>Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes. Si la persona afectada está consciente: en caso de que lo haya tragado, aclare la boca con agua (sólo si la persona está consciente). NO provoque vómitos. Es posible que sea necesaria respiración artificial u oxígeno. Si la persona afectada está inconsciente pero respira, proporciónale oxígeno o respiración artificial si lo necesita.</td> </tr> <tr> <td>Contacto con la piel</td> <td>Lávese con abundante agua. Quítese la ropa y los zapatos contaminados de inmediato. Manténgase caliente y en un lugar tranquilo. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.</td> </tr> <tr> <td>Contacto con los ojos</td> <td>Aclare inmediatamente con abundante agua, también bajo los párpados, durante al menos 15 minutos. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.</td> </tr> </table>	General	La rapidez es esencial. Las personas que intervienen en tareas de primeros auxilios deben estar adecuadamente protegidos. (ver sección 8). Retire a la persona afectada para evitar más exposiciones. Proporcione primeros auxilios y obtenga inmediatamente atención médica en todos los casos. Asegúrese de que las instalaciones lavajos y las duchas de seguridad estén instaladas en las proximidades del lugar de trabajo.	Inhalación	En caso de accidente por inhalación, traslade a la persona afectada al aire libre y haga que descansa. Tumbe a la persona afectada en posición de recuperación, cúbrala y no permita que se enfríe. Si es preciso suministre oxígeno o respiración artificial. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.	Ingestión	Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes. Si la persona afectada está consciente: en caso de que lo haya tragado, aclare la boca con agua (sólo si la persona está consciente). NO provoque vómitos. Es posible que sea necesaria respiración artificial u oxígeno. Si la persona afectada está inconsciente pero respira, proporciónale oxígeno o respiración artificial si lo necesita.	Contacto con la piel	Lávese con abundante agua. Quítese la ropa y los zapatos contaminados de inmediato. Manténgase caliente y en un lugar tranquilo. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.	Contacto con los ojos	Aclare inmediatamente con abundante agua, también bajo los párpados, durante al menos 15 minutos. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.
General	La rapidez es esencial. Las personas que intervienen en tareas de primeros auxilios deben estar adecuadamente protegidos. (ver sección 8). Retire a la persona afectada para evitar más exposiciones. Proporcione primeros auxilios y obtenga inmediatamente atención médica en todos los casos. Asegúrese de que las instalaciones lavajos y las duchas de seguridad estén instaladas en las proximidades del lugar de trabajo.										
Inhalación	En caso de accidente por inhalación, traslade a la persona afectada al aire libre y haga que descansa. Tumbe a la persona afectada en posición de recuperación, cúbrala y no permita que se enfríe. Si es preciso suministre oxígeno o respiración artificial. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.										
Ingestión	Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes. Si la persona afectada está consciente: en caso de que lo haya tragado, aclare la boca con agua (sólo si la persona está consciente). NO provoque vómitos. Es posible que sea necesaria respiración artificial u oxígeno. Si la persona afectada está inconsciente pero respira, proporciónale oxígeno o respiración artificial si lo necesita.										
Contacto con la piel	Lávese con abundante agua. Quítese la ropa y los zapatos contaminados de inmediato. Manténgase caliente y en un lugar tranquilo. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.										
Contacto con los ojos	Aclare inmediatamente con abundante agua, también bajo los párpados, durante al menos 15 minutos. Lleve a la persona afectada al hospital cuanto antes.										
4.2	Principales síntomas y efectos, agudos y retardados										
	Puede presentar daño ocular progresivo. Mantener bajo vigilancia médica ante la posibilidad de problemas bronquiales, traqueales o edema pulmonar. La ropa contaminada puede contener y desprender amoniaco.										
4.3	Indicación de toda atención médica y tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente										
	Después de una exposición severa, el paciente debe mantenerse en observación durante al menos 48 h. Se puede presentar edema pulmonar retardado.										
SECCIÓN 5 Medidas de lucha contra incendios											
5.1	Medios de extinción										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">Medios de extinción adecuados</td> <td>Los medios apropiados pueden incluir agua pulverizada, polvo químico seco, niebla de agua o espuma.</td> </tr> <tr> <td>Medios de extinción que no deben usarse</td> <td>No aplicar agua directamente sobre el amoniaco líquido para evitar el calentamiento y evaporación.</td> </tr> </table>	Medios de extinción adecuados	Los medios apropiados pueden incluir agua pulverizada, polvo químico seco, niebla de agua o espuma.	Medios de extinción que no deben usarse	No aplicar agua directamente sobre el amoniaco líquido para evitar el calentamiento y evaporación.						
Medios de extinción adecuados	Los medios apropiados pueden incluir agua pulverizada, polvo químico seco, niebla de agua o espuma.										
Medios de extinción que no deben usarse	No aplicar agua directamente sobre el amoniaco líquido para evitar el calentamiento y evaporación.										
5.2	Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">Peligros especiales</td> <td>La mezcla de amoniaco y aire, en espacios abiertos, difícilmente se encontrará dentro de los límites de inflamabilidad por consiguiente el riesgo de incendio o explosión es despreciable. En espacios cerrados dicha mezcla puede tener riesgos de explosión si se pone en contacto con una fuente de ignición. Los recipientes cerrados conteniendo amoniaco pueden explotar por el efecto de la presión si se ven sometidos a calentamiento. En contacto con el agua puede liberar calor, por lo que existen riesgos de salpicaduras. Cuando la temperatura ambiente es baja la niebla de amoniaco puede impedir la visibilidad.</td> </tr> <tr> <td>Peligros de la descomposición térmica ó de la combustión del producto</td> <td>El amoniaco es difícil de quemar, su combustión contendrá óxidos de nitrógeno.</td> </tr> </table>	Peligros especiales	La mezcla de amoniaco y aire, en espacios abiertos, difícilmente se encontrará dentro de los límites de inflamabilidad por consiguiente el riesgo de incendio o explosión es despreciable. En espacios cerrados dicha mezcla puede tener riesgos de explosión si se pone en contacto con una fuente de ignición. Los recipientes cerrados conteniendo amoniaco pueden explotar por el efecto de la presión si se ven sometidos a calentamiento. En contacto con el agua puede liberar calor, por lo que existen riesgos de salpicaduras. Cuando la temperatura ambiente es baja la niebla de amoniaco puede impedir la visibilidad.	Peligros de la descomposición térmica ó de la combustión del producto	El amoniaco es difícil de quemar, su combustión contendrá óxidos de nitrógeno.						
Peligros especiales	La mezcla de amoniaco y aire, en espacios abiertos, difícilmente se encontrará dentro de los límites de inflamabilidad por consiguiente el riesgo de incendio o explosión es despreciable. En espacios cerrados dicha mezcla puede tener riesgos de explosión si se pone en contacto con una fuente de ignición. Los recipientes cerrados conteniendo amoniaco pueden explotar por el efecto de la presión si se ven sometidos a calentamiento. En contacto con el agua puede liberar calor, por lo que existen riesgos de salpicaduras. Cuando la temperatura ambiente es baja la niebla de amoniaco puede impedir la visibilidad.										
Peligros de la descomposición térmica ó de la combustión del producto	El amoniaco es difícil de quemar, su combustión contendrá óxidos de nitrógeno.										
5.3	Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">Métodos específicos de lucha contra incendios</td> <td>Regar los recipientes y tanques con agua pulverizada para mantenerlos fríos. Elimine los gases/vapores/neblinas con un chorro de agua pulverizada. Actuar desde una posición a espaldas del viento. Evite cualquier contacto con agua contaminada. Una vez extinguido el incendio, limpie rápidamente las superficies que han estado expuestas a los humos para reducir en lo posible los daños en el equipo.</td> </tr> <tr> <td>Protección especial en la lucha contra incendios</td> <td>Utilice aparatos de respiración individuales y traje de protección. Los bomberos deben llevar un equipo personal de protección resistente al fuego y a los productos químicos.</td> </tr> </table>	Métodos específicos de lucha contra incendios	Regar los recipientes y tanques con agua pulverizada para mantenerlos fríos. Elimine los gases/vapores/neblinas con un chorro de agua pulverizada. Actuar desde una posición a espaldas del viento. Evite cualquier contacto con agua contaminada. Una vez extinguido el incendio, limpie rápidamente las superficies que han estado expuestas a los humos para reducir en lo posible los daños en el equipo.	Protección especial en la lucha contra incendios	Utilice aparatos de respiración individuales y traje de protección. Los bomberos deben llevar un equipo personal de protección resistente al fuego y a los productos químicos.						
Métodos específicos de lucha contra incendios	Regar los recipientes y tanques con agua pulverizada para mantenerlos fríos. Elimine los gases/vapores/neblinas con un chorro de agua pulverizada. Actuar desde una posición a espaldas del viento. Evite cualquier contacto con agua contaminada. Una vez extinguido el incendio, limpie rápidamente las superficies que han estado expuestas a los humos para reducir en lo posible los daños en el equipo.										
Protección especial en la lucha contra incendios	Utilice aparatos de respiración individuales y traje de protección. Los bomberos deben llevar un equipo personal de protección resistente al fuego y a los productos químicos.										
SECCIÓN 6 Medidas en caso de vertido accidental											
6.1	Precauciones personales, equipos de protección y procedimientos de emergencia										
	Las personas que intervengan en una liberación importante deberán utilizar traje hermético y protección respiratoria. Actuar desde una posición a espaldas del viento. Abandonar el área afectada en sentido perpendicular a la propagación de la nube. Si es posible y seguro, evite que sigan produciéndose fugas o derrames. Utilice aparatos de respiración individuales en los espacios cerrados, cuando el nivel de oxígeno sea insuficiente o si se producen emisiones significativas. Los vapores de amoniaco se pueden controlar con agua pulverizada. Evite cualquier contacto con agua contaminada. Manténgase alejado de productos incompatibles. Usar gafas de seguridad, guantes resistentes a agentes químicos (PVC) y botas de goma.										
6.2	Precauciones relativas al medio ambiente										
	Tomar precauciones para evitar la contaminación de cursos de agua y/o drenajes. En caso de contaminación de dichos cursos de agua y/o drenajes, informar a las autoridades pertinentes.										
6.3	Métodos y material de contención y de limpieza										
	Diluya o neutralice el derrame antes de su eliminación. Los grandes derrames deben ser neutralizados con productos químicos adecuados e.j. Fosfato Mono Amónico. Recuperar mediante bombeo si es posible. Elimine el producto en los contenedores especiales para residuos. Mantenga el producto en recipientes adecuados, debidamente cerrados y etiquetados.										
6.4	Referencia a otras secciones										
	Ver sección 1 para datos de contacto, sección 8 para los equipos de protección personal y sección 13 para la eliminación de residuos										

Amoniaco Anhidro

SECCIÓN 7		Manipulación y almacenamiento						
7.1	Precauciones para una manipulación segura							
		Evitar el contacto con los ojos y con la piel y la inhalación de vapores. Proporcionar una ventilación adecuada. Ver el la sección 8 los valores límites de exposición ocupacional. Usar equipos de protección total cuando exista riesgo de fuga o derrame. Tomar medidas de precaución frente a las descargas estáticas.						
7.2	Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades							
		Los recipientes en el almacén permanecerán cerrados herméticamente en áreas frescas y bien ventiladas. Mantenga los recipientes alejados los focos de calor, ignición y sustancias incompatibles. (Ver sección 10) No está permitido fumar en el área de almacenamiento. Los recipientes, tanques, esferas, etc., para el almacenamiento de Amoniaco Anhidro deberán cumplir las prescripciones de la Instrucción Técnica Complementaria MIE-APQ-004 "Almacenamiento de Amoniaco Anhidro".						
	Materiales de embalaje recomendados	Acero al carbono grano fino (para baja temperatura) y AISI 304L						
7.3	Usos específicos finales							
		Ver <u>epígrafe</u> 1.2 y anexos para los escenarios de exposición.						
<i>Nota : estabilidad y reactividad, ver Sección 10</i>								
SECCIÓN 8		Controles de exposición/protección individual						
8.1	Parámetros de control							
Valores límite de exposición ocupacional	Componente	CAS	VLA-ED (TWA): Exposición de 8 horas: 14 mg/m3 y 20ppm VLA-EC (STEL): Exposición a corto plazo: 36 mg/m3 y 50ppm					
		Amoniaco anhidro	7664-41-7					
	Derivado del ISQ	DNEL	Trabajador			consumidor		
				sistémico	industrial		profesional	
			oral	No aplica			No aplica	
		inhalatorio	corto plazo largo plazo	47,6 mg / m3	47,6 mg / m3	23,8 mg / m3		
		dermal	corto plazo largo plazo	6,8 mg / Kg pc / día	6,8 mg / Kg pc / día	68 mg / Kg pc / día		
		PNEC	agua	aire	suelo	microbiológica	sedimento	oral
	Agua dulce: 0,0011 mg/l (amoniacó libre) Agua de mar: 0,0011 mg/L Fugas intermitentes: 0,089 mg/L		No disponible	No requerido	No requerido	No requerido	No requerido	
8.2	Controles de la exposición							
<u>Controles técnicos apropiados</u>	Proporcionar ventilación por extracción localizada, donde sea adecuado. Proporcionar equipos lavajos y duchas de seguridad en cualquier lugar donde se pueda producir contacto con los ojos ó la piel.							
	Ojos	Usar gafas de seguridad química ó mascara bucofacial homologadas						
	Piel y cuerpo	Usar ropa de protección (EN 14605) y botas, resistentes a agentes químicos.						
	Manos	Siempre que se maneje Amoniaco anhidro se debe usar guantes resistentes a los agentes químicos y al frío que cumplan con la norma EN 374 e.j. > 8 hrs. (Tiempo de rotura) goma butílica, teflón elastómero. > 1 hrs. (Tiempo de rotura) guantes aislados convenientemente para bajas temperaturas.						
	Respiratorio	Si los niveles de exposición exceden o pueden exceder de los límites de exposición recomendados, usar aparatos de respiración adecuados e.j. mascararas bucofaciales equipadas con filtros tipo K, equipo de respiración autónoma...						
	Térmicos	Ver lo indicado en los puntos anteriores.						
<u>Controles de exposición medioambiental</u>		Ver sección 6.						
<i>Los consejos relativos a la protección personal son válidos para altos niveles de exposición. Elegir las protecciones personales adaptadas a los riesgos de la exposición.</i>								

Amoniaco Anhidro

SECCIÓN 9		Propiedades físicas y químicas				
9.1	Información sobre propiedades físicas y químicas básicas					
	Aspecto	Gas (licuado). Incoloro				
	Olor	Característico, acre, sofocante.				
	Umbral olfativo	0,6 a 53 ppm, con una media geométrica detectada de 17 ppm.				
	pH	11.7 (conc. 1%)				
	Punto de fusión/punto de congelación	-77,7°C				
	Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	-33°C a 101.3 kPa.				
	Punto de inflamación	No aplica, gas.				
	Tasa de evaporación	No aplica, gas.				
	Inflamabilidad (<u>sólido, gas</u>)	Gas inflamable Cat2.				
	Límites superior/inferior de inflamabilidad o de explosividad	16-26 % v/v (temperatura y presión ambiente) 13-34 % v/v (a 300 °C y presión atmosférica) 11-37% v/v (a 400 °C y presión atmosférica)				
	Presión de vapor a 20°C	861 kPa .				
	Densidad de vapor	Gas: 0.7714g/l (a 0°C, 101.3kPa).				
	Densidad del líquido	0.6386g/cm3 (a -33°C, 101,3kPa).				
	Solubilidad en agua	Extremadamente soluble, e.j. 510-531g/l a 20°C.				
	Coefficiente de reparto n-octanol/agua	No aplica, gas inorganico.				
	Temperatura de auto-inflamación	651 °C				
	Temperatura de descomposición	450 °C				
	Viscosidad	0.00982 cP a 20°C				
	Propiedades explosivas	No es explosivo				
	Propiedades comburentes	No es comburente				
9.2	<u>Otros datos</u>					
	Miscibilidad	Alcohol, Cloroformo, Éter				
	Conductividad	1.9 e+007 pS/m				
	Grupo de gases	IIA				
SECCIÓN 10		Estabilidad y reactividad				
10.1	Reactividad	Estable en condiciones normales.				
10.2	Estabilidad química	Térmicamente estable en términos de reacción bajo condiciones de almacenamiento de diseño. El aporte de calor puede causar la vaporización del líquido.				
10.3	Posibilidad de reacciones peligrosas	El Amoniaco reacciona violentamente con los hipocloritos, halógenos y mercurio produciendo compuestos inestables que son capaces de explotar. Ataca al cobre, oro, aluminio, cinc, cadmio y sus aleaciones. Reacciona con el mercurio y el óxido de plata para formar compuestos que son sensibles al impacto. El Amoniaco gas puede reaccionar violentamente con los óxidos de nitrógeno y ácidos fuertes.				
10.4	Condiciones que deben evitarse	Daños físicos y calentamiento de los recipientes.				
10.5	Materiales incompatibles	Halógenos, ácido nítrico, hipocloritos, plata, mercurio, cobre, oro, aluminio, cinc, cadmio, plomo, óxidos de nitrógeno, ácidos fuertes y sustancias generadoras de ácidos.				
10.6	Productos de descomposición peligrosos	Hidrógeno, óxidos de nitrógeno.				
SECCIÓN 11		Información toxicológica				
11.1	Información sobre los efectos toxicológicos					
Toxicidad aguda						
	Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
	Amoniaco anhidro	7664-41-7	OECD 401 --- ---	rata rata rata	oral cutánea respiratoria	No es un valor relevante por tratarse de un gas. DL50: 350 mg / Kg pc. Para una solución amoniacal. DL50: No disponible al tratarse de un corrosivo para la piel. CL50: rata macho y hembra entre 10 y 60 min: 28130 - 13770 mg/m3. Tóxico por inhalación.
Corrosión o irritación cutáneas						
	Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
	Amoniaco anhidro	7664-41-7	<u>OECD 404</u>	Humano	<u>cutánea</u>	<u>Corrosivo cutáneo. Categoría 1B. Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.</u>
Lesiones oculares graves o irritación ocular						
	Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
	Amoniaco anhidro	7664-41-7				<u>Lesiones oculares. Categoría 1. Provoca lesiones oculares graves.</u>
Sensibilización respiratoria o cutánea						
	Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
	Amoniaco anhidro	7664-41-7	<u>OECD 422</u>		cutánea respiratoria	No sensibilizante. No sensibilizante.
Mutagenicidad en células germinales						
	Componente	Nº CAS	Método	Especies		Resultado
	Amoniaco anhidro	7664-41-7	OECD 471 OECD 474	bacterias células de mamífero		Negativo. No mutagénico. Negativo. No mutagénico.
Carcinogenicidad						
	Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
	Amoniaco anhidro	7664-41-7	OECD 453	rata	oral respiratoria cutánea otras rutas	NOAEL: 67 mg/kg pc/d. No cancerígena. Los datos correspondientes a las vías respiratorias, cutáneas y otras, no están disponibles; la carcinogénesis de la sustancia ha sido investigado por vía oral.

Amoniaco Anhidro

Toxicidad para la reproducción					
Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
Amoniaco anhidro	7664-41-7	OECD 422	rata	oral oral respiratoria	-Efectos sobre la fertilidad: NOAEL: 408 mg/kg pc/d. No tóxico. -Toxicidad para el desarrollo: NOAEL: 100 mg/kg pc/d NOAEC: 25 mg/m3
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) - exposición única					
Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
Amoniaco anhidro	7664-41-7				Datos concluyentes, pero no suficientes para la clasificación (no clasificado)
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) - exposición repetida					
Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
Amoniaco anhidro	7664-41-7				Datos concluyentes, pero no suficientes para la clasificación (no clasificado) ; Dosis de efecto oral sub-aguda: 68 mg/kg pc/d; Dosis inhalatoria sub-crónica: 63mg/m3
Peligro por aspiración					
Componente	Nº CAS	Método	Especies	Vía	Resultado
Amoniaco anhidro	7664-41-7				Datos concluyentes, pero no suficientes para la clasificación (No clasificado)
SECCIÓN 12 Información ecológica					
12.1 Toxicidad					
Toxicidad acuática					
Componente	Nº CAS		Peces (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	Crustáceos (<i>Daphnia magna</i>)	Algas (<i>Chlorella vulgaris</i>)
Amoniaco anhidro	7664-41-7	Corto plazo	CL50(96h) = 0,89 mg/l de amoniaco no ionizado.	CL50 (48h) = 101 mg/l	CL50 (18 días) = 2700 mg/l
		Largo plazo	LOEC(73días) = 0,022 mg/l	NOEC (96h) = 0,79 mg/l de amoniaco no ionizado	No disponible
Toxicidad Terrestre					
Componente	Nº CAS	Macroorganismos	Microorganismos	Otros organismos	
Amoniaco anhidro	7664-41-7	No tóxico	No tóxico	No requerido	
Actividad microbiológica en plantas de tratamiento de aguas residuales					
Componente	Nº CAS	Toxicidad a microorganismos acuáticos			
Amoniaco anhidro	7664-41-7	No requerido			
12.2 Persistencia y degradabilidad					
Componente	Nº CAS				
Amoniaco anhidro	7664-41-7	No se considera persistente y presenta una biodegradabilidad rápida en sistemas acuáticos. En entornos abióticos, las algas acuáticas y macrofitos asimilan el amoniaco para usarlo como fuente de nitrógeno.			
12.3 Potencial de bioacumulación					
Componente	Nº CAS	Coefficiente de reparto octanol-agua (Kow)	Factor de bioconcentración (BCF)	Observaciones	
Amoniaco anhidro	7664-41-7	No aplica. Sustancia inorgánica.	-	No cabe esperar que amoniaco se bioacumule. Es un producto del metabolismo normal.	
12.4 Movilidad en el suelo					
Componente	Nº CAS	Resultado			
Amoniaco anhidro	7664-41-7	Se espera poca movilidad en la tierra debido a la fuerte adsorción de los iones de amonio a los minerales de arcilla y a la oxidación bacteriana a nitratos. El amoniaco en la tierra se encuentra en equilibrio dinámico con los nitratos y otros sustratos en el ciclo del nitrógeno.			
12.5 Resultados de la valoración PBT/mPmB					
No se requiere. Sustancia inorgánica.					
12.6 Otros efectos adversos					
No hay más información.					

Amoniaco Anhidro

SECCIÓN 13 Consideraciones relativas a la eliminación					
13.1	Métodos para el tratamiento de residuos				
	<p>Los residuos NO deberían eliminarse a través de las redes de alcantarillado. Dependiendo del grado de contaminación, eliminar como fertilizante o en una instalación de residuos autorizada. Aplicar la legislación local o nacional para su eliminación.</p>				
SECCIÓN 14 Información relativa al transporte					
	Información Reglamentaria	<u>ADR/RID</u>	<u>ADNR</u>	<u>IMDG</u>	<u>OACI</u>
14.1	<u>Número ONU</u>	<u>UN 1005</u>			
14.2	<u>Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas</u>	<u>AMONIACO, ANHIDRO</u>			
14.3	<u>Clase(s) de peligro para el transporte</u>	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2,3</u>	<u>2,3</u>
14.4	<u>Grupo de embalaje</u>	<u>No aplica</u>			
14.5	<u>Peligros para el medio ambiente</u>	 <u>Materia peligrosa para el medio ambiente</u>			
14.6	<u>Precauciones particulares para los usuarios</u>	<u>Número de Identificación de Peligro</u> <u>268</u> <u>Ver ADR/RID</u>	<u>Ver ADN</u>	<u>Ver IMDG procedimientos de emergencia (FEm).</u> <u>F-C, S-U</u>	<u>Ver regulación OACI para limitación de cantidades</u>
	<u>Etiqueta</u>	 2,3	 2,3	 2,3	 2,3
		 8	 8	 8	 8
		 13 (RID)			
14.7	<u>Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio MARPOL y el Código IBC: No aplica.</u>				
	<u>Código IGC: Columna c (Tipo de barco): 2G/2PG. Columna d y e: No aplica. Columna f (Detección de vapor): T. Columna g (Aforo): C. Columna h (MFAG N°): 725.</u>				
SECCIÓN 15 información reglamentaria					
15.1	Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla				
	Reglamento 2003/2003 (fertilizantes) Reglamento 1907/2006 (REACH) Reglamento 1272/2008 (CLP) Directiva 18/2012; R.D. 840/2015 (Seveso) MIE-APQ 004 (Almacenamiento de amoniaco anhidro) R.D. 145/1989 (Admisión de materias peligrosas en los puertos) R.D. 374/2001 (Agentes químicos) R.D. 506/2013 (fertilizantes)				
15.2	Evaluación de la seguridad química				
	Evaluación de la Seguridad Química llevada a cabo para el Amoniaco anhidro				

Amoniaco Anhidro

SECCIÓN 16	Otra información	
Indicaciones de peligro	H221: Gas inflamable. H280: Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento. H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves. <u>H315: Provoca irritación cutánea.</u> <u>H318: Provoca lesiones oculares graves.</u> H331: Tóxico en caso de inhalación. H400: Muy tóxico para los organismos acuáticos. H411: Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos. H412: Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos. EUH071: Corrosivo para las vías respiratorias.	
Consejos de prudencia	P210: Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar. P260: No respirar los vapores. P280: Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección. P303+P361+P353: EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua o ducharse. P305+P351+P338: EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. P310: Llamar inmediatamente a un CENTRO de información toxicológica o a un médico.	
Referencias bibliográficas y fuentes de datos	Evaluación sobre la seguridad química de Amoniaco anhidro. Documentos Guía EFMA/FERTILIZER EUROPE; Datos de TFI HPV; NOTOX <u>Reglamento (UE) 2015/830</u> <u>Reglamento (CE) 1907/2006</u> <u>Reglamento (EU) 1272/2008</u>	
Abreviaturas y acrónimos	VLA-ED: Valor límite ambiental (exposición diaria) VLA-EC: Valor límite ambiental (corta duración) NOAEL: Dosis sin efectos adversos observados DL50: Dosis letal 50% CL50: Concentración letal 50% DNEL: Concentración sin efecto derivado PNEC: Concentración prevista sin efectos LOEC: Concentración más baja de efectos observados NOEC: Concentración de efectos no observados NOAEC: Concentración de efectos adversos no observados	
Formación adecuada para los trabajadores	Formación obligatoria en materia de prevención de riesgos laborales	
Fecha de la anterior FDS	Versión 6 de fecha 14/12/2017	
Modificaciones introducidas en la revisión actual	<u>Ver los textos con negrita+cursiva +subrayado</u>	
Se adjuntan como anexos I, II, III, IV, V y VI los escenarios de exposición		
La información contenida en esta Ficha de Datos de Seguridad se da de buena fe y creyendo en su exactitud, en base al conocimiento que se dispone sobre el producto en el momento de su publicación. No implica la aceptación de ningún compromiso ni responsabilidad legal por parte de la Compañía por las consecuencias de su utilización o su mala utilización en cualesquiera circunstancias particulares.		

Presupuesto 21-594468

Fecha 06/06/2020
Validez Presup. 05/07/2020
Forma de pago 60 DÍAS F.F.
Plazo de entrega

Nº de cliente: 501

CLIENTE **FERTIBERIA, SA**
A28165298
Polígono Químico, Avd. Puerto, s/n
46520 Puerto de Sagunto, Valencia
S/REF. Planta de Sagunto

Concepto	Cant	Precio	Base Imp
UNIDAD COMPRESORA COMPLETA EQUIPADA CON COMPRESOR MARCA SABROE Y FORMADA POR: - BLOQUE COMPRESOR MODELO SAB 233 L CAPACIDAD DE ASPIRACIÓN: 2.257 m3/h RÉGIMEN DE TRABAJO -8°C/+30°C CAPACIDAD FRIGORÍFICA Q=2.282 kW POTENCIA ABSORBIDA P=250 KW - MOTOR ELÉCTRICO DE 415 KW - SEPARADOR DE ACEITE VERTICAL CON UNA EFICIENCIA EN LA SEPARACIÓN INFERIOR A 10 PPM - ENFRIADOR DE ACEITE POR AGUA - BOMBA DE ACEITE MYCOM M-60P - VÁLVULAS AUTOMÁTICAS Y MANUALES - INSTRUMENTACIÓN - NIVELADORES DE MOTOR - BANCADA COMÚN - CUADRO DE MANÓMETROS - ANTIVIBRADORES	1,00	185.000,00	185.000,00
CUADRO DE CONTROL LOCAL DEL COMPRESOR (OPCIONAL) CON PLC MARCA SIEMENS O TELEMECÁNICA	1,00	6.667,00	6.667,00
TRANSPORTES Y EMBALAJES. INCLUYE GÓNDOLA ESPECIAL PARA EL TRANSPORTE DE LA UNIDAD.	1,00	1.000,00	1.000,00
PRIMERAS CARGAS DE ACEITE (2 BIDONES)	2,00	1.000,00	2.000,00
INGENIERÍA, ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, PRUEBAS REGLAMENTARIAS, ELABORACIÓN DE PROYECTO Y LEGALIZACIÓN.	1,00		6.450,00
PUESTA EN MARCHA BASADA EN DOS SEMANAS EN OBRA	2,00	2.500,00	5.000,00
PLAZO DE ENTREGA: 4 MESES			
FORMA DE PAGO A CONVENIR			

Nota: El presupuesto no incluye IVA

Importe	Descuento	TOTAL
206.117,00	0,00%	206.117,00