

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***GENERACIÓN DE METANO OBTENIDO A
PARTIR DE ENERGÍA ELÉCTRICA
RENOVABLE. POWER TO GAS***

Alumno/Alumna: Pineda, Matabuena, Diego

Director/Directora: Barrio, Cagígal, Victoria Laura

Curso: 2017-2018

Fecha: Viernes, 29, Junio, 2018

DATOS BÁSICOS DEL PROYECTO

- *Equipo de Proyecto:* Diego Pineda Matabuena
- *Título del Proyecto:* Generación de metano obtenido a partir de energía eléctrica renovable. Power to Gas.
- *Resumen:* El excedente de energía eléctrica de origen renovable se puede aprovechar para separar el agua mediante hidrólisis. En la tecnología Power to Gas, el H₂ generado electrolíticamente más el CO₂ se transforma en metano. En este proyecto, se va a trabajar en la reacción de metanación mediante el ensayo de distintos sistemas catalíticos basados en níquel, en unas determinadas condiciones de operación, buscando maximizar la producción de metano para su uso o inyección en la red de gas.
- *Palabras clave:* Power to Gas, metanación, catálisis.
- *Abstract:* The excess of electricity produced from renewable sources can be used to separate the water by hydrolysis. In Power to Gas technology, the electrolytically generated H₂ plus CO₂ is transformed into methane. In this project, the methanation reaction is going to be studied by testing different nickel based catalytic systems, at certain operating conditions, seeking to maximize methane production for its use or injection in the gas grid.
- *Keywords:* Power to Gas, methanation, catalysis.
- *Laburpena:* Energia elektriko berriztagarrien soberakina, hidrolisiaren bidez ura bereizteko erabili daiteke. Power to Gas teknologia erabiliz, elektrolitikoki sortutako H₂-a gehi CO₂-a, metano bihurtuko dira. Proiektu honetan metanazio erreakzioa landuko da. Horretarako, nikellean oinarritutako sistema katalitiko desberdinen entseguak garatuko dira, operazio baldintza jakinetan, metanoaren produkzioa, erabilera edo gas sarean injezioa maximizatzeko asmoz.
- *Gako – hitzak:* Power to Gas, metanazioa, katalisis

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN.....	6
2 CONTEXTO.....	7
3 OBJETIVOS Y ALCANCE.....	9
4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO.....	10
4.1 BENEFICIOS PERSONALES.....	10
4.2 BENEFICIOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS.....	10
4.3 BENEFICIOS SOCIALES.....	10
4.4 BENEFICIOS ECONÓMICOS.....	11
5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE.....	12
6 ANÁLISIS DE RIESGOS.....	15
7 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA. DISEÑO.....	18
7.1 REACTOR.....	18
7.2 MICROACTIVITY REFERENCE.....	18
7.3 MICROGC VARIAN CP 4900.....	20
8 METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO.....	21
8.1 DESCRIPCIÓN DE TAREAS, FASES, EQUIPOS O PROCEDIMIENTOS.....	23
8.2 DIAGRAMA DE GANTT.....	25
8.3 CÁLCULOS.....	27
8.4 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS.....	28
9 PRESUPUESTO.....	32
10 CONCLUSIONES.....	34
11 BIBLIOGRAFÍA.....	35
ANEXO I: FICHAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD QUÍMICA [15].....	37
ANEXO II: TABLAS DE CÁLCULOS Y RESULTADOS.....	45
REACCIÓN INICIAL.....	45
DESACTIVACIÓN.....	55
REACCIÓN POST-REGENERACIÓN.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Mix energético mundial [2]	7
Ilustración 2: Esquema Power to Gas [6]	8
Ilustración 3: Tecnologías de almacenamiento de energía. [12]	13
Ilustración 4: Distribución de las plantas Power to Gas en Alemania [14]	14
Ilustración 5: Reactor tubular de un cuarto de pulgada	18
Ilustración 6: Planta Microactivity Reference	18
Ilustración 7: Detalle horno.....	18
Ilustración 8: Esquema de la planta Microactivity Reference.....	19
Ilustración 9: MicroGC Varian CP 4900	20
Ilustración 10: Diagrama de Gantt desde el comienzo del proyecto hasta la determinación de las condiciones de operación	25
Ilustración 11: Diagrama de Gantt desde la determinación de las condiciones de operación hasta el fin del proyecto.	26
Ilustración 12: Reacción inicial. Rendimiento en función de la temperatura.....	29
Ilustración 13: Desactivación. Rendimiento CH ₄ en función del tiempo.....	30
Ilustración 14: FISQ Hidrógeno 1.....	37
Ilustración 15: FISQ Hidrógeno 2.....	38
Ilustración 16: FISQ Dióxido de carbono 1	39
Ilustración 17: FISQ Dióxido de carbono 2	40
Ilustración 18: FISQ Metano 1.....	41
Ilustración 19: FISQ Metano 2.....	42
Ilustración 20: FISQ Sulfuro de hidrógeno 1	43
Ilustración 21: FISQ Sulfuro de hidrógeno 2	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de clasificación de riesgos.....	16
Tabla 2: Reacción inicial. Rendimiento en función de la temperatura.	29
Tabla 3: Desactivación. Rendimiento en función del tiempo.	30
Tabla 4: Reacción post-regeneración. Rendimiento CH ₄ en función del tiempo.....	31
Tabla 5: Presupuesto del proyecto.....	32
Tabla 6: Desglose amortizaciones.....	33
Tabla 7: Resultados obtenidos en el cromatógrafo para diferentes catalizadores	45
Tabla 8: Resultados obtenidos en el cromatógrafo para CoNiAlúmina	46
Tabla 9: Moles obtenidos para distintos catalizadores.....	47
Tabla 10: Moles obtenidos para CoNiAlúmina.....	48
Tabla 11: Porcentaje molar para distintos catalizadores.....	49
Tabla 12: Porcentaje Molar para CoNiAlúmina.....	50
Tabla 13: Resultados Katalco	51
Tabla 14: Resultados FeNiAlúmina.....	52
Tabla 15: Resultados CrNiAlúmina	53
Tabla 16: Resultados CoNiAlúmina	54

Tabla 17: Resultados obtenidos en el cromatógrafo para diferentes catalizadores.	55
Tabla 18: Número de moles obtenidos para diferentes catalizadores.	55
Tabla 19: Porcentaje molar obtenido para diferentes catalizadores.....	55
Tabla 20: Resultados FeNiAlúmina.....	56
Tabla 21: Resultados CrNiAlúmina	56
Tabla 22: Resultados CoNiAlúmina	56
Tabla 23: Resultados obtenidos en el cromatógrafo para diferentes catalizadores	57
Tabla 24: Número de moles obtenido para distintos catalizadores	57
Tabla 25: Fracción molar obtenida para diferentes catalizadores.....	58
Tabla 26: Resultados FeNiAlúmina.....	58
Tabla 27: Resultados CrNiAlúmina	58
Tabla 28: Resultados CoNiAlúmina	59

1 INTRODUCCIÓN

Este documento contiene el desarrollo de un trabajo fin de grado centrado en un proceso para generar metano a partir de energía renovable, en presencia de distintos catalizadores y a diferentes temperaturas. De igual modo, se estudia la influencia de compuestos de azufre en la reacción, así como la desactivación y regeneración de los catalizadores desarrollados previamente.

En una primera parte se presenta el contexto del proyecto, los objetivos y el alcance del mismo y los beneficios personales, científico-técnicos, sociales y económicos que se esperan conseguir.

A continuación se presentan el análisis del estado del arte y de las alternativas presentes a esta tecnología.

El proyecto cuenta también con un análisis de riesgos, donde se enumeran y clasifican los riesgos principales que puedan afectar al desarrollo del proyecto, explicando las posibles consecuencias que puedan tener en la consecución de éste, así como las medidas a adoptar para evitar y mitigar, en la medida de lo posible, dichos riesgos y sus consecuencias.

También se detalla la metodología seguida en el desarrollo de trabajo, mediante la descripción de las tareas y el diagrama de Gantt adjunto. Este proyecto consta de 9 paquetes de trabajo (P.T.) divididos en 5 grupos: un estudio preliminar, donde se adquiere la información relativa a la realización del proyecto, la familiarización con la planta, donde se realiza una reacción formativa en la que se aprende a manejar la planta donde se realizará el proyecto, la determinación de las condiciones de operación a las que va a tener lugar el trabajo, las reacciones con los distintos catalizadores objetos de estudio y la elaboración del presupuesto y el estudio de rentabilidad del proyecto.

Por último se adjunta el presupuesto correspondiente a la realización de este estudio, para finalizar con las conclusiones del mismo.

2 CONTEXTO

El sistema energético actual depende totalmente de los combustibles fósiles y, debido a que el consumo de éstos emite gases contaminantes a la atmósfera, la contaminación atmosférica no hace más que aumentar. [1]

Consumo de energía primaria 2016

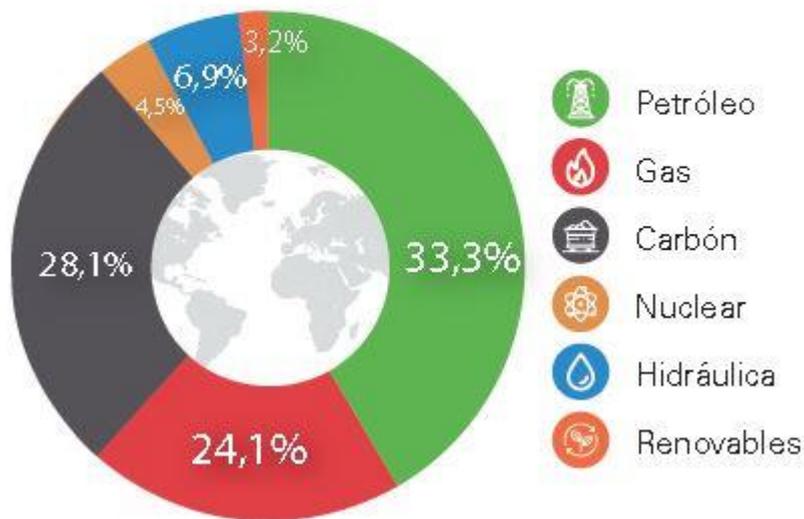


Ilustración 1: Mix energético mundial [2]

Uno de estos gases contaminantes es el dióxido de carbono, que es uno de los gases de efecto invernadero más comunes en la atmósfera terrestre [1]. A pesar de que la Tierra emite y elimina dióxido de carbono de forma natural debido a las actividades vitales que se producen en ella, la gran mayoría de las emisiones son consecuencia de las actividades humanas [3], en cantidades mucho mayores que las que la Tierra puede eliminar de forma natural en el Ciclo de Carbono.

Es por ello por lo que se han adoptado distintas estrategias para reducir la emisión antropogénica de dióxido de carbono como la reducción de las emisiones debidas a la combustión, la debida a los procesos o la debida a la cadena de suministro [4].

Entre estas medidas de reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera como un mejor rendimiento energético (disminuyendo el consumo y por tanto las emisiones) o el desarrollo de combustibles de fuentes alternativas a las fósiles, se encuentra el aprovechamiento de

estas emisiones para generar combustibles verdes, cuya emisión neta de dióxido de carbono es nula.

Una de estas tecnologías es la de obtención de metano a través de la reacción de metanación, donde el hidrógeno y el dióxido de carbono reaccionan para producir metano y agua. El metano puede utilizarse para diversos propósitos, tales como la inyección de dicho metano en la red existente de gas natural, transporte terrestre o el almacenamiento a largo plazo para cuando haya una necesidad real de utilización, entre otros.

La tecnología Power to Gas envuelve la transferencia del exceso de energía eléctrica a la red de gas en forma de hidrógeno electrolítico o de metano sintético derivado de este hidrógeno electrolítico y del dióxido de carbono. [5]

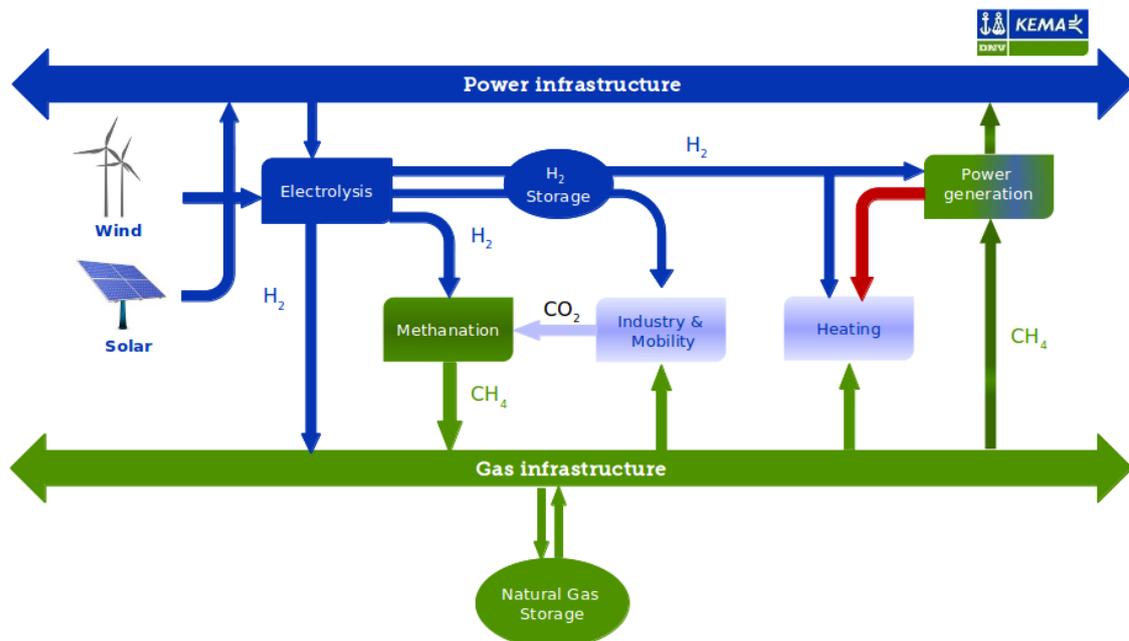


Ilustración 2: Esquema Power to Gas [6]

3 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía renovable excedentaria para la generación de metano, y concretamente se centra en el desarrollo de la etapa de metanación, de manera que sea más eficiente. Para ello, se estudian sistemas catalíticos basados en metales no nobles y que operan en lecho fijo en instalaciones que trabajan a presión. De igual modo, en el presente proyecto se va a estudiar la influencia de la presencia de compuestos de azufre en la alimentación sobre dichos catalizadores, así como su desactivación y posterior regeneración.

El alcance de este proyecto es el estudio de la reacción de metanación con la acción de distintos catalizadores (Katalco, FeNiAlúmina, CoNiAlúmina, CrNiAlúmina) de forma que se pueda observar como intervienen éstos en la reacción. Del mismo modo, se observará como responden ante la presencia del ácido sulfhídrico en la alimentación, y si continúan siendo operativos tras su regeneración para finalmente compararlos.

4 BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Observando el contexto, se hace evidente que son necesarias nuevas tecnologías que ayuden a mitigar el cambio climático, a la vez que hacen frente a la creciente demanda energética. Muchas de estas tecnologías aún se encuentran en fase de desarrollo y es necesaria la investigación, para que sea posible una correcta implantación en el sistema energético. Una de estas tecnologías es la tecnología Power to Gas, de la que trata el presente informe. Por lo tanto, la realización de este proyecto puede aportar grandes beneficios, clasificados de la siguiente manera:

4.1 BENEFICIOS PERSONALES

En primer lugar, se encuentran los beneficios personales, ya que la elaboración de éste proyecto repercute directamente en el alumno. Este trabajo de fin de grado se convierte en un método de aprendizaje donde el alumno puede poner en práctica lo aprendido durante los cuatro cursos de grado, pudiendo comprobar la aplicabilidad de éstos, así como verse involucrado en un proceso investigador.

4.2 BENEFICIOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

Como se ha comentado anteriormente, es de vital importancia desarrollar una fuente de energía alternativa, a la par que limpia. Mediante la elaboración de este proyecto se estudia, del mismo modo que se desarrolla, la tecnología Power to Gas, contribuyendo a la obtención de una fuente de energía limpia que proporciona un gas de alto valor añadido como es el metano, que puede ser utilizado como combustible gaseoso in situ o inyectándose en las redes existentes de gas natural.

4.3 BENEFICIOS SOCIALES

Al obtener una fuente de energía limpia alternativa, se reduce la dependencia total que disponemos de los combustibles fósiles permitiendo a los distintos países de la Unión Europea una mayor independencia energética. También se consigue una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, mitigando así el cambio climático y las consecuencias de éste sobre la vida en la Tierra.

4.4 BENEFICIOS ECONÓMICOS

Una mayor independencia energética se traduce en una mayor independencia económica a la hora de regular los precios energéticos, pudiendo llegar a disminuir el gasto correspondiente a la obtención de energía. Del mismo modo, al reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero a la atmósfera, se avanza en la consecución de los objetivos para el 2020 redactados en la cumbre de París [7], evitando así posibles multas por la no realización de éstos.

5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Tras la Cumbre de París y la aceptación de los objetivos para el 2020 [7], la tendencia global actual es que cada vez se incorpore más energía obtenida de fuentes renovables [2]. La obtención de energía mediante estas fuentes introduce el problema de una alta variabilidad en el sistema [8]. No sólo la generación no se encuentra acoplada a la demanda, siendo muy difícil que la producción se adapte al consumo en todo momento, si no que la obtención de energía a través de fuentes renovables depende de condiciones naturales no controlables (sobre todo la eólica y la solar) [8]. Esto provoca que haya picos de oferta de energía obtenida a partir de fuentes renovables cuando hay poca demanda energética o cuando la red eléctrica está saturada y se dan condiciones óptimas para la producción de ésta, perdiéndose esa energía. En España, estas pérdidas aumentan hasta el valor de 20 MWh por año [9].

El exceso de energía eléctrica producida por fuentes renovables se puede utilizar para generar hidrógeno mediante la electrólisis del agua. En la electrólisis se separa el agua en hidrógeno y oxígeno, pudiendo vender el oxígeno para ser utilizado en otros procesos industriales. El hidrógeno puede ser almacenado y utilizado posteriormente como combustible.

Sin embargo, la producción de hidrógeno está limitada por las infraestructuras de almacenamiento y distribución, y por la limitación de la cantidad de H₂ que se puede introducir en la red de gas natural (en España esta limitación es del 5% [10]).

Por lo tanto, otra alternativa posible para aprovechar el hidrógeno obtenido es hacerlo reaccionar con el dióxido de carbono para producir un gas de alto valor añadido como es el metano. Esto es en lo que consiste la tecnología Power to Gas. El metano a su vez puede ser utilizado directamente como combustible inyectándolo en la red de gas natural, o almacenándolo para cuando haya que satisfacer un pico de demanda de energía [11]. Teniendo esto en cuenta, se puede afirmar que se trata de una posible alternativa de almacenamiento de energía.

En la ilustración 3 adjunta a continuación se observan distintas alternativas para el almacenamiento energético que se pueden clasificar en: sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (súper condensadores y baterías), mecánica (volantes de inercia, almacenamiento de aire comprimido y bombeo hidráulico), almacenamiento térmico y almacenamiento químico, en la que destaca la tecnología Power to Gas relacionada con la obtención de hidrógeno (PtG – H₂) y gas natural (PtG – SNG).

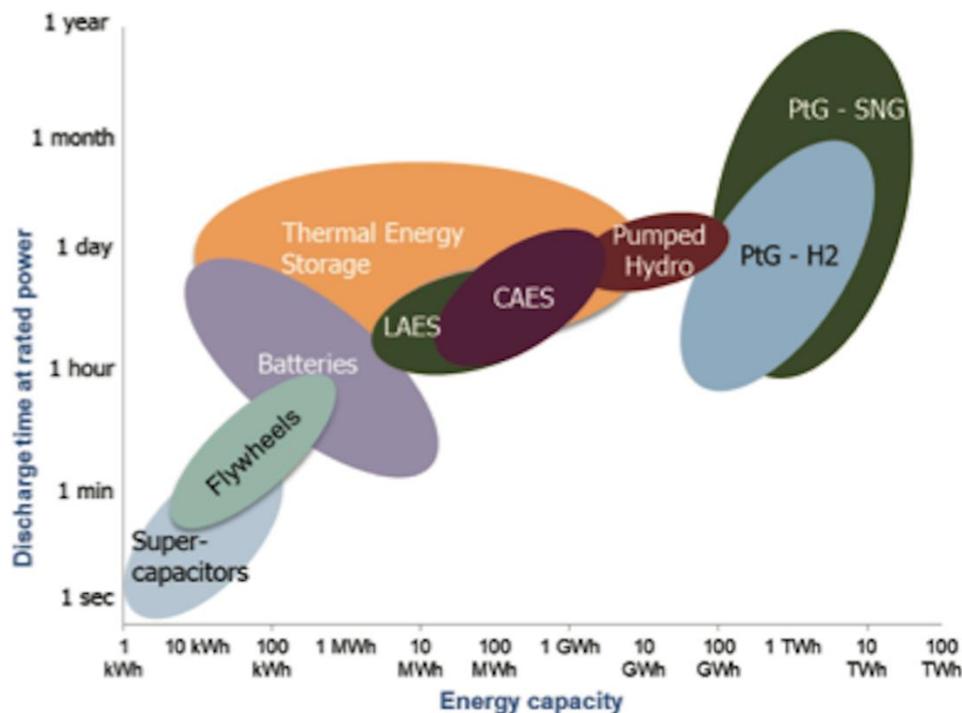


Ilustración 3: Tecnologías de almacenamiento de energía. [12]

De entre las posibles alternativas para el almacenamiento de la mencionada energía eléctrica de origen renovable, las compañías gasistas, a nivel europeo, están interesadas en la producción de metano como sistema de almacenamiento a gran escala (TWh) para su inyección en las redes existentes de distribución de gas natural. Así, esta amplia y extensa red puede ser utilizada como almacén para los excedentes temporales de energía eléctrica renovable.

Varios estudios avalan que el rendimiento completo de todo el proceso, desde la obtención de energía eléctrica, hasta la obtención de metano, se encuentra entre un 49% y un 65% [13].

Actualmente en Alemania hay más de 28 proyectos piloto con los que se está estableciendo la hoja de ruta para implementar la tecnología Power to Gas en la generación energética de Alemania. En la ilustración 4 adjunta a continuación, se puede observar la distribución de plantas a lo largo del país.

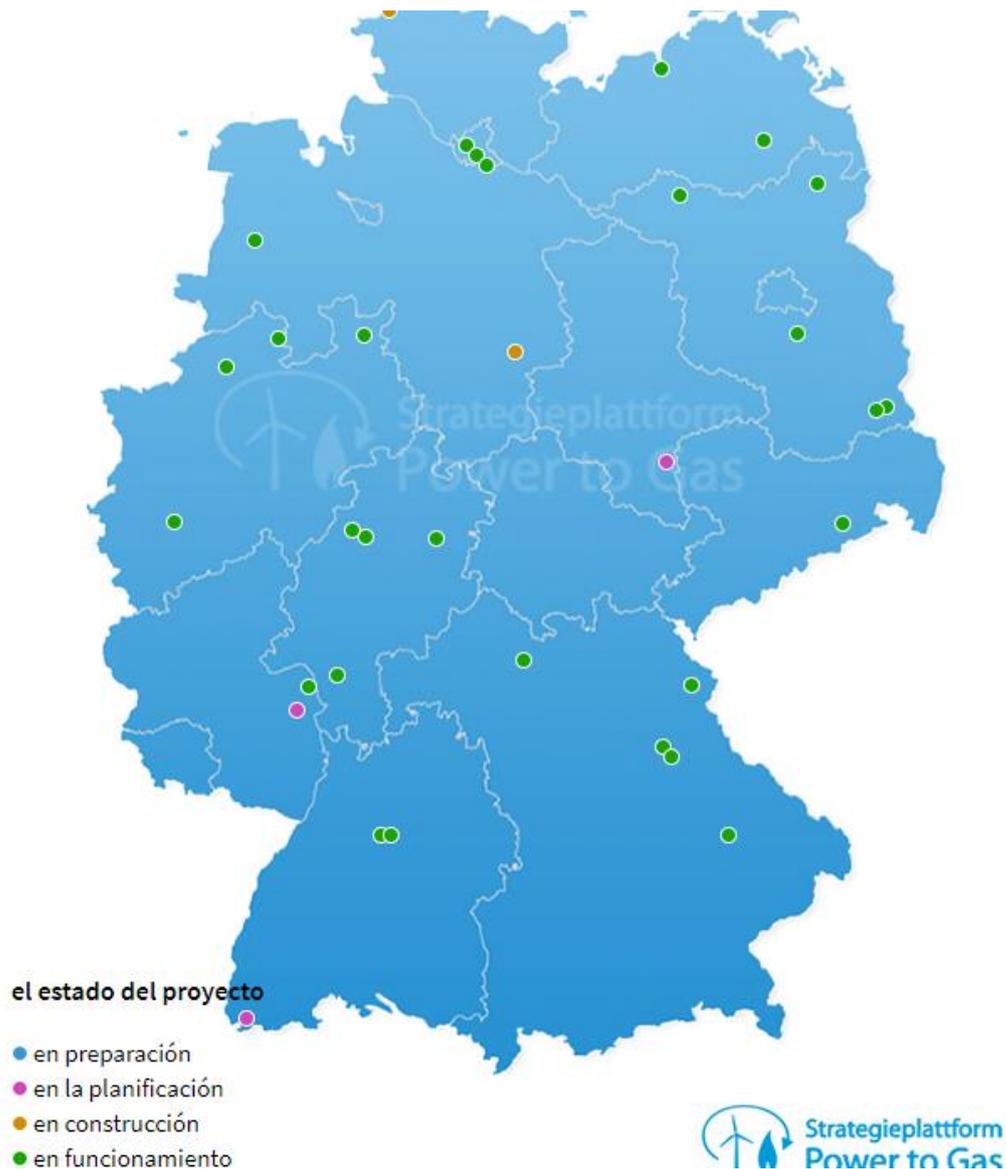


Ilustración 4: Distribución de las plantas Power to Gas en Alemania [14]

Una de las plantas que ya se encuentra operativa desde 2013 es la denominada 'Audi e-gas Projekt' ubicada en Werlte, Baja Sajonia, que además fue la primera planta industrial Power to Gas en ser implantada [15]. Ésta cuenta con el proceso completo, desde la hidrólisis del agua hasta la generación de metano con un rendimiento global del 54% [15], y una producción de 1300 m³/h de hidrógeno y 300 m³/h de metano [16].

6 ANÁLISIS DE RIESGOS

En este apartado se analizarán los riesgos que podrían afectar al desarrollo del proyecto y se expondrán algunas medidas para minimizar los efectos de los mismos.

Los principales riesgos que podrían afectar son los siguientes:

A) Fugas.

El primer riesgo que encontramos es el debido a las posibles fugas de gases que pueden ser peligrosos y, además, supone un incremento en los gastos del proyecto. Es necesario un especial cuidado con las posibles fugas ya que dependiendo de las concentraciones, el ácido sulfhídrico puede ser letal y el hidrógeno, además de tener un alto grado de inflamabilidad, al estar en contacto con el aire es explosivo.

B) Retraso en la recepción de compuestos.

Para poder realizar el proyecto, es necesario disponer de todos los compuestos que vayan a tomar parte en él. La falta de alguno de éstos provocará, irremediablemente, un retraso en el proyecto.

C) Avería de los equipos principales.

La posible avería de los equipos principales (el cromatógrafo y la planta Microactivity Reference) puede suponer un riesgo para la consecución del proyecto. Provocará, o un ligero retraso, si es fácil de solucionar, o una posible cancelación del proyecto si la avería es grave ya que necesitará de ayuda externa aumentando los gastos y los tiempos de reparación.

D) Averías en el equipo del laboratorio.

Estas averías pueden darse debido a la manipulación de las distintas herramientas de las que disponemos que, al ser la mayoría de vidrio, pueden averiarse y romperse con relativa facilidad. La repercusión de esto no irá más allá de la reposición de estas herramientas, con un retraso y aumento del gasto del proyecto mínimo, salvo que no se manipulen con el cuidado necesario y el número de averías de este tipo aumente considerablemente.

		IMPACTO			
		Bajo 0,1	Medio 0,5	Alto 0,9	
PROBABILIDAD	Baja 0,2	B Bajo (0,02)	B Bajo (0,1)	C Moderado (0,18)	1º A 2º C
	Media 0,5	D Bajo (0,05)	A Moderado (0,25)	Alto (0,45)	3º B 4º D
	Alta 0,8	Bajo (0,08)	Alto (0,4)	Alto (0,72)	

Tabla 1: Matriz de clasificación de riesgos

Tal y como se puede observar en la matriz de clasificación de riesgos, el suceso que más observación solicita es el de las fugas, con un riesgo moderado y una puntuación de 0,25 frente al siguiente que es el de la avería en los equipos principales. Aunque el hecho de que se produzca esta avería provoca un resultado más grave que las fugas, la probabilidad de que suceda es inferior. A continuación, el siguiente posible problema es el del retraso de los compuestos que, aunque es poco probable que pase, el impacto es superior. Finalmente, las averías en el equipo de laboratorio son las que menos riesgo suponen.

El listado de acciones a tener en cuenta para reducir/evitar la probabilidad/impacto de los riesgos identificados es el siguiente:

A) Fugas.

Para reducir la posibilidad de aparición de fugas, antes de realizar el ensayo se comprobará que no las hay, especialmente en las uniones de reactor y tubos. Para mitigar su impacto, el laboratorio cuenta con una campana extractora en el recinto del reactor (recinto que se puede cerrar para seguridad de los investigadores), además de detectores de gas que alertan ante concentraciones peligrosas de dichos gases acorde al plan de prevención de riesgos de la UPV/EHU. Para la utilización del ácido sulfhídrico se cuenta también con una máscara de protección.

B) Retraso en la recepción de compuestos.

Para evitar que se de éste problema, habrá que prever qué compuestos se utilizarán en la realización del proyecto, para pedirlos, si no se dispone de ellos, con la suficiente antelación para que no se dé el retraso. Además, se comprobará periódicamente el nivel de las botellas de gas del laboratorio, para adelantarse a su agotamiento.

C) Avería de los equipos principales.

Para evitar las averías en los equipos principales, se actuará siempre con conocimiento de los mismos, consultando los manuales de utilización de ser necesario.

D) Averías en los equipos de laboratorio.

Para prevenir las averías en los equipos de laboratorio, se utilizarán siempre con el cuidado necesario, a fin de evitar la rotura de los mismos ya que al ser la mayoría de ellos de vidrio, una de sus principales características es su elevada fragilidad.

7 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA. DISEÑO

Para la realización de este proyecto se cuenta con una planta Microactivity Reference, donde se montará el reactor y se conectará con los tubos de entrada y salida de los gases, comprobando que no haya fugas en las uniones tubo-reactor. También se dispone de un cromatógrafo de gases para analizar la composición de los gases a la salida del reactor.

7.1 REACTOR

Se trata de un reactor tubular, de diámetro $\frac{1}{4}$ " (0,635 cm) y una longitud de 32 cm. Para su montaje en la planta se pondrá una reducción de $\frac{1}{4}$ " a $\frac{1}{8}$ " en cada extremo del tubo, y se unirá a éste mediante un juego de férula, contra-férula y tuerca.



Ilustración 5: Reactor tubular de un cuarto de pulgada

7.2 MICROACTIVITY REFERENCE

Esta planta cuenta con un horno dentro de una caja caliente, donde se introducirá el reactor. Se disponen de tres termopares que se situarán en la parte superior del lecho catalítico (controlador de la temperatura de operación), en medio del lecho (temperatura real de la reacción), y en la parte inferior de éste (comprobar que no se dispara la temperatura) respectivamente, controlando así en todo momento la temperatura de la reacción.



Ilustración 6: Planta Microactivity Reference



Ilustración 7: Detalle horno

El control de la instalación se puede realizar manualmente desde el panel de control de la planta, como mediante el software de control de la planta, denominado Process@, que permite el control de las diferentes sesiones de operación y las condiciones de operación empleadas desde el ordenador. Los parámetros regulables son los siguientes: presión de operación, caudales de entrada de los gases, temperatura del interior de la planta, temperatura de operación, cantidad de agua retenida en el Peltier, así como el tiempo de operación. Para el correcto control de estos parámetros cada medida dispone de controladores PID configurables y un sistema de alarmas sonoras y visuales que avisa del posible fallo de alguno de los parámetros.

Con el programa Process@ se pueden crear sesiones en las que establecer las condiciones de operación anteriormente mencionadas, el tiempo de duración de cada sesión y la programación sucesiva de distintas etapas, haciendo de este software el idóneo para la realización de los ensayos de actividad de forma automática.

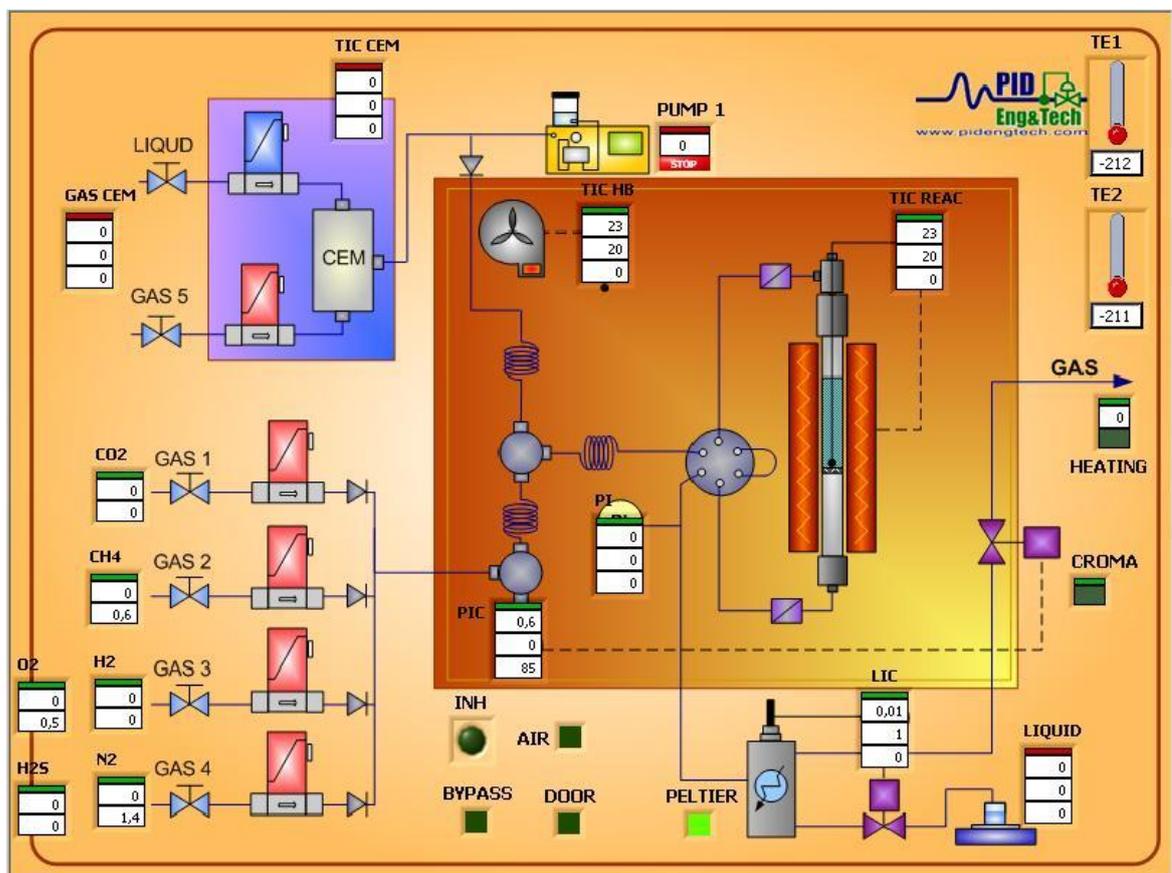


Ilustración 8: Esquema de la planta Microactivity Reference

7.3 MICROGC VARIAN CP 4900

Para el análisis de la composición de los gases a la salida del reactor se cuenta con un cromatógrafo de gases modelo MicroGC Varian CP 4900. Para la utilización de este cromatógrafo se utiliza el software Galaxie Chromatography, que permite su control y programación desde el ordenador.



Ilustración 9: MicroGC Varian CP 4900

8 METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

a) Carga del reactor.

Para la carga del reactor se pesan aproximadamente 0,2 g del catalizador deseado y se mezclan con carburo de silicio (CSi) fino (de tamaño de partícula similar a la del catalizador). La cantidad de CSi fino utilizada es de 4,5 veces el peso del catalizador para evitar la formación de puntos calientes. Se empleará CSi fino y CSi grueso hasta cubrir el resto del reactor.

La carga del reactor se realiza de forma que el lecho catalítico se encuentre en el medio de éste. Para ello, se mide en otro tubo del mismo diámetro la altura que ocupa el lecho. A continuación la distribución se organiza de la siguiente manera, siendo x la altura que ocupa la mezcla de catalizador y CSi fino.

CSi grueso: $32 - 1 - x$ cm

CSi fino: 0,5 cm

Mezcla: x cm

CSi fino: 0,5 cm

CSi grueso $32 - 1 - x$ cm

b) Programación de los ensayos de actividad.

La programación de los ensayos de actividad se ha realizado mediante el programa Process@ y se han establecido las siguientes sesiones:

Calentamiento: se usará para calentar el horno desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de activación del catalizador. Se alimenta el reactor con gas nitrógeno a presión atmosférica y variando la temperatura desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de activación. Si la activación no es necesaria, el calentamiento se programará hasta la temperatura de ensayo.

Activación: se utilizará cuando sea necesaria la activación del catalizador. Las condiciones de operación son la presión atmosférica y la temperatura de activación de cada catalizador. Se alimenta hidrógeno y nitrógeno en relación 1:3 durante 4 horas.

Enfriamiento: se enfría el reactor desde la temperatura de activación hasta la temperatura de comienzo del ensayo, alimentando nitrógeno a presión atmosférica. La duración es de 1 hora.

Reacción inicial: la reacción tiene lugar desde los 300 °C hasta los 500 °C, con incrementos de 50 °C a la presión de 10 bar. Debido a la necesidad de la introducción gradual de hidrógeno se programan tres sesiones diferentes de reacción.

- Alimentación de CO₂ y H₂ con relación 1:1 durante 10 minutos
- Alimentación de CO₂ y H₂ con relación 1:2 durante 15 minutos
- Alimentación de CO₂ y H₂ con relación 1:4 durante 60 minutos. Con esta sesión se procederá al ensayo de la actividad donde se recogen muestras cada 15 minutos.

Desactivación: la desactivación se realiza a las condiciones óptimas de operación determinadas en la reacción inicial, alimentando 200 ml/min con 50 ppm de ácido sulfhídrico y relación 1:4 entre CO₂ y H₂. La duración de esta etapa es de 60 minutos, recogiendo muestras cada 10 minutos.

Regeneración: la regeneración se realiza a 700 °C durante 20 horas [17] con una alimentación de 15 ml/min de O₂ y 200 ml/min de N₂

Reacción post-regeneración: se realiza el mismo proceso que en la reacción inicial a la temperatura óptima de operación para comprobar si se ha regenerado adecuadamente el catalizador.

Enfriamiento 2: se utiliza para bajar la temperatura y la presión desde las condiciones de ensayo hasta las condiciones ambiente. Se mantiene durante 5 minutos con la alimentación de ensayo. Después se introduce nitrógeno hasta que se alcanzan las condiciones deseadas.

Noche (reposo): Se mantiene a temperatura ambiente y a presión atmosférica durante el tiempo que se quiera con alimentación de 20 ml/min de nitrógeno.

c) Programación del cromatógrafo.

El cromatógrafo se programa y se controla también desde el ordenador, mediante la utilización del programa Galaxie Chromatography. Se programan dos métodos de operación: calentamiento y medición.

Calentamiento: para obtener una buena medición es necesario que las señales de los gases sean claramente diferenciables. Para ello es necesario calentar el cromatógrafo. Se programa para que la temperatura aumente hasta los 140 °C con una duración de una noche.

Medición: es el método que se utiliza en el ensayo. La temperatura es de 70 °C y el tiempo de medición de 6 minutos.

8.1 DESCRIPCIÓN DE TAREAS, FASES, EQUIPOS O PROCEDIMIENTOS

P.T.1 Estudio preliminar: antes de empezar el proyecto y la metodología a seguir, hay que informarse adecuadamente de lo que trata éste. Esta fase del proyecto tuvo una duración de 20 días, en los que se llevaron a cabo las siguientes tareas:

T.1.1 Recopilación de información: en primer lugar se realizará una búsqueda y selección de la información existente sobre la tecnología Power To Gas

T.1.2 Análisis de la información: una vez obtenida la información, se procede a analizarla para aplicarla adecuadamente al proyecto.

H.1 Fin del estudio preliminar: se trata de un hito con el que damos finalizada la fase del estudio preliminar. A partir de aquí comenzará la fase práctica, donde se realizará propiamente el proyecto.

P.T.2 Familiarización con la planta: una vez conocida la parte teórica del proyecto, se procede al aprendizaje de la utilización de la planta con la que vamos a llevar a cabo el proyecto. Este paquete de trabajo se compone de las siguientes tareas:

T.2.1 Calibración del Mass Flow: se procede a la calibración del sistema de medida de los Mass Flow de la planta, aprendiendo a utilizarlos y adaptando los valores teóricos a los que da realmente la planta.

T.2.2 Calibración del MicroGC: se procede a la calibración del MicroGC, aprendiendo a utilizarlo y relacionando los valores teóricos con los obtenidos realmente.

T.2.3 Carga del reactor: se aprende el proceso de carga del reactor en el que posteriormente tendrá lugar la reacción de metanación.

T.2.4 Montaje planta: se aprende a realizar el montaje del reactor en la planta, comprobando las posibles fugas y aprendiendo a darles solución en caso de encontrarlas.

T.2.5 Reacción formativa: una vez que se han calibrado todos los sistemas de medida y se ha cargado el reactor, se realiza una reacción completa, aprendiendo la dinámica de la obtención de los resultados.

H.2 Fin de la familiarización con la planta: Se trata de otro hito, donde se da por finalizado el proceso de aprendizaje de utilización de la planta, pudiendo realizar ya las reacciones objeto de estudio.

P.T.3 Determinación de las condiciones de operación: Antes de realizar la reacción se procede a estudiar las condiciones a las que va a tener lugar el proyecto.

T.3.1 Determinación de la temperatura: se busca la información relativa a la temperatura de activación y regeneración de los distintos catalizadores, así como de la temperatura a la que va a tener lugar la reacción.

T.3.2 Determinación de la presión: al igual que con la temperatura, se buscan los distintos valores de presión.

P.T.4 Reacción Katalco: se realiza la primera reacción completa, correspondiente al catalizador comercial Katalco.

P.T.5 Reacción CoNiAlúmina: Se realiza la segunda reacción completa, correspondiente al catalizador CoNiAlúmina, preparado en los laboratorios de la Escuela.

P.T.6 Reacción CrNiAlúmina: Se realiza la tercera reacción completa, correspondiente al catalizador CrNiAlúmina, preparado en los laboratorios de la Escuela.

P.T.7 Reacción FeNiAlúmina: Se realiza la cuarta reacción completa, correspondiente al catalizador FeNiAlúmina, preparado en los laboratorios de la Escuela.

P.T.8 Elaboración del presupuesto: Se realiza el estudio del proyecto desde el punto de vista económico.

T.8.1 Búsqueda de costes de los materiales y equipos: consiste en la búsqueda bibliográfica de los precios de todas las herramientas que se van a utilizar a lo largo del proyecto.

T.8.2 Cálculo de la inversión necesaria: con la ayuda de una hoja de cálculo, se obtendrá el importe total de la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto.

P.T.9 Redacción del informe: se trata de plasmar en un documento todo el trabajo realizado, de forma clara y ordenada. Esta redacción se irá realizando a lo largo de todo el proceso, pero también una vez finalizado éste hasta la entrega del informe final.

H.3 Fin del proyecto: se trata del último hito. Consiste en la finalización del informe para su entrega.

8.2 DIAGRAMA DE GANTT

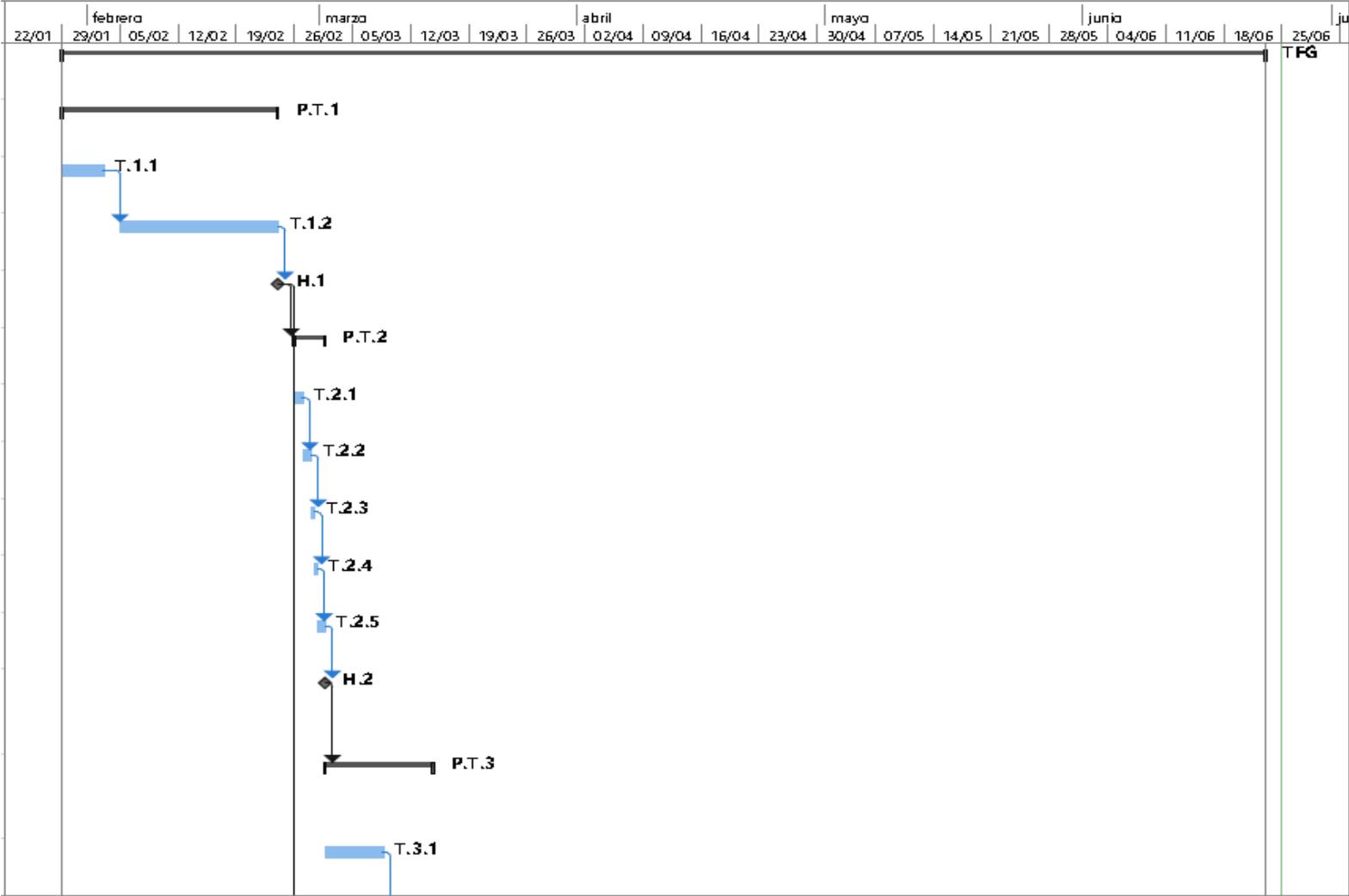


Ilustración 10: Diagrama de Gantt desde el comienzo del proyecto hasta la determinación de las condiciones de operación

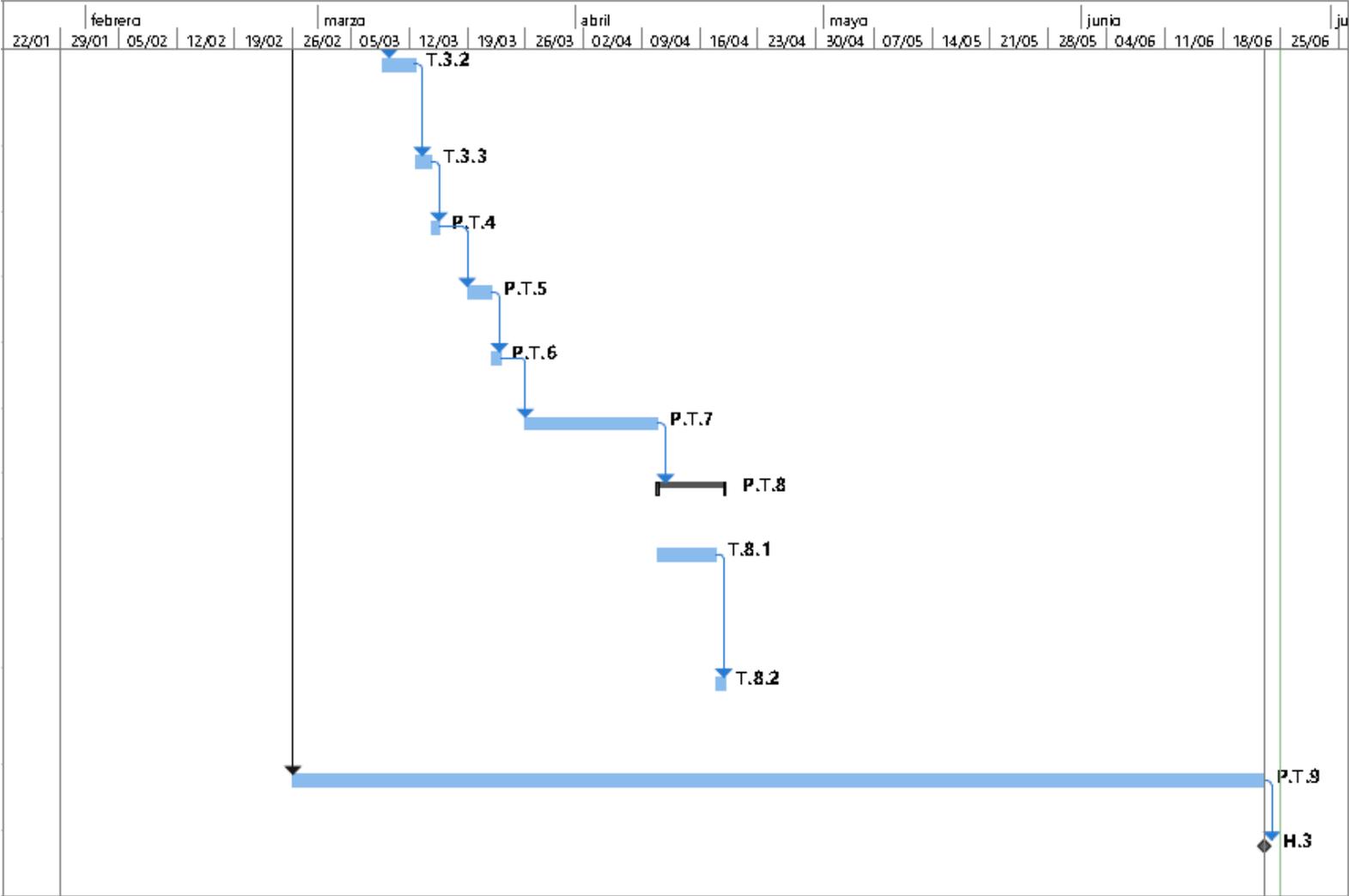


Ilustración 11: Diagrama de Gantt desde la determinación de las condiciones de operación hasta el fin del proyecto.

8.3 CÁLCULOS

Para facilitar la redacción y la claridad de las fórmulas empleadas en los cálculos, se ha adoptado la siguiente nomenclatura.

N_i – Número de moles del compuesto i

A_i – Valor del área obtenido del cromatógrafo de gases para un compuesto i

FR_i – Valor del Factor de Respuesta del MicroGC, obtenido mediante la calibración del mismo.

$\%M_i$ – Porcentaje molar del compuesto i .

N_T – Número de moles totales.

x_i – Conversión del compuesto i .

Q_{A_i} – Caudal alimentado del compuesto i

Q_{F_i} – Caudal final del compuesto i

Q_T – Caudal total

η_i – Rendimiento del compuesto i

S_i – Selectividad del compuesto i

Los valores que se obtienen del cromatógrafo de gases, son áreas, que hay que convertirlas a otras unidades para su manipulación, en este caso, a moles. Para ello, se ha realizado la calibración previa del MicroGC, obteniendo unos Factores de Respuesta para cada compuesto que detecta el cromatógrafo a la salida del reactor. Este F.R. relaciona el valor de área obtenido con el número de moles mediante la siguiente expresión:

$$N_i = \frac{A_i}{FR_i}$$

Una vez obtenidos los moles a la salida del reactor, ya se pueden calcular los valores que interesan para realizar las comparativas de los catalizadores. Para ello se han realizado los cálculos correspondientes a las siguientes expresiones.

$$\% M = \frac{N_i}{N_T} \times 100$$

$$x_i = \frac{Q_{Ai} - Q_{Fi}}{Q_{Ai}} \times 100$$

$$Q_{Fi} = \frac{\% M \times Q_T}{100}$$

$$\eta_i = \frac{Q_{Fi}}{Q_{Fi \text{ estequiométrico}}} \times 100$$

$$S_{CO} = \frac{N_{CO}}{N_{CH_4}} \times 100$$

Todas las tablas correspondientes a los distintos valores calculados se encuentran en el Anexo II.

8.4 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos se separan en tres bloques: la reacción inicial, la cual se lleva a cabo en presencia del catalizador y los reactivos con los que tiene lugar la reacción, en segundo lugar la reacción en presencia de ácido sulfhídrico, y por último, la reacción después de llevar a cabo la regeneración. En la reacción inicial se compararán los rendimientos medios obtenidos para cada temperatura. En la desactivación del catalizador por acción del ácido sulfhídrico se observará la evolución de los rendimientos que se obtienen a lo largo del tiempo para los distintos catalizadores.

REACCIÓN INICIAL

Tal y como se puede observar en la tabla 2 y en la ilustración 12, podemos comentar los siguientes resultados:

Katalco: el catalizador comercial obtiene los mejores resultados a bajas temperaturas, no perdiendo excesivamente su actividad cuando aumentan éstas. Lo cual resulta lógico, dado que se trata de una reacción exotérmica y la conversión empieza a disminuir a medida que aumenta la temperatura.

FeNiAlúmina: no presenta actividad hasta que no se alcanzan los 450 °C, obteniendo durante los 450 °C y 500 °C los rendimientos más altos, cercanos al 100%.

CrNiAlúmina: Funciona bien en un rango amplio de temperaturas, con rendimientos por encima del 90% en todas ellas, siendo este el catalizador más activo a bajas temperaturas.

CoNiAlúmina: Éste es un caso especial. Tras realizar la reacción completa, no se obtuvo ningún resultado por lo que se decidió ampliar el rango de temperaturas de la reacción, ya que en teoría el catalizador debiera ser activo [18]. Se observó que a temperaturas superiores a 550 °C, se obtiene un resultado muy bueno, con rendimientos por encima del 95%. Por lo que, para que éste presente actividad necesita temperaturas más altas que los anteriores.

RENDIMIENTO CH ₄ (%)	TEMPERATURA (°C)							
	300	350	400	450	500	550	600	650
Katalco	90,97	89,27	86,25	82,12	77,87			
FeNiAlúmina	0,00	0,00	0,00	98,70	98,26			
CrNiAlúmina	0,00	98,78	92,02	94,35	92,91			
CoNiAlúmina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,58	97,77	97,77

Tabla 2: Reacción inicial. Rendimiento en función de la temperatura.

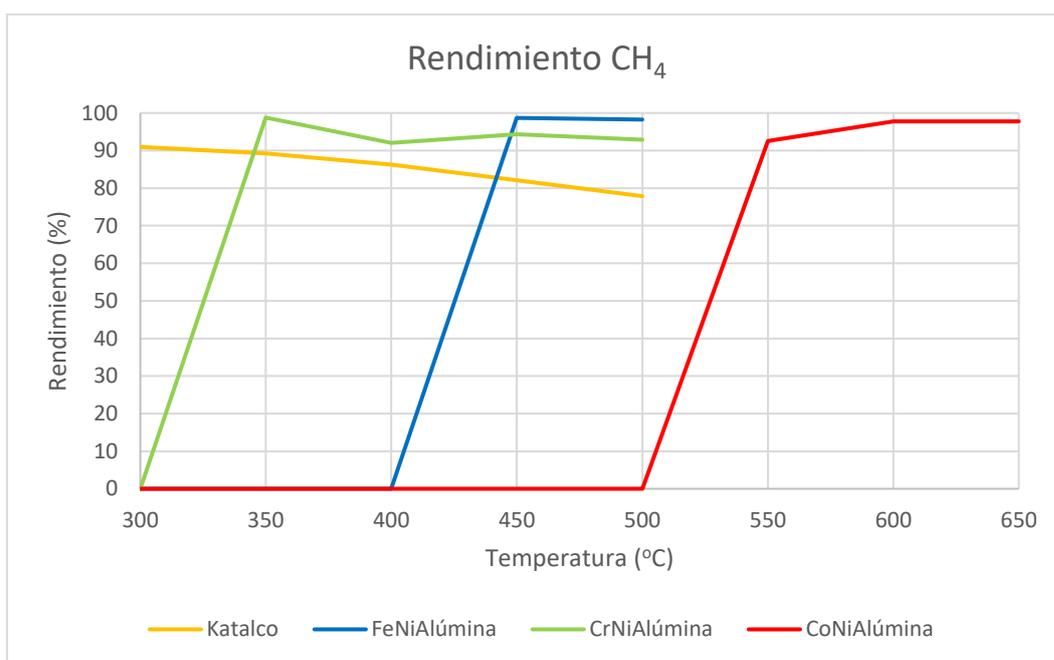


Ilustración 12: Reacción inicial. Rendimiento en función de la temperatura.

DESACTIVACIÓN POR ENVENENAMIENTO POR ÁCIDO SULFÚDRICO.

RENDIMIENTO CH ₄ (%)	500 °C					
Tiempo (min)	10	20	30	40	50	60
FeNiAlúmina	80,85	74,92	0,00	0,00	0,00	0,00
CoNiAlúmina	69,11	25,93	3,24	0,00	0,00	0,00
CrNiAlúmina	71,03	66,50	63,59	54,23	0,00	0,00

Tabla 3: Desactivación. Rendimiento en función del tiempo.

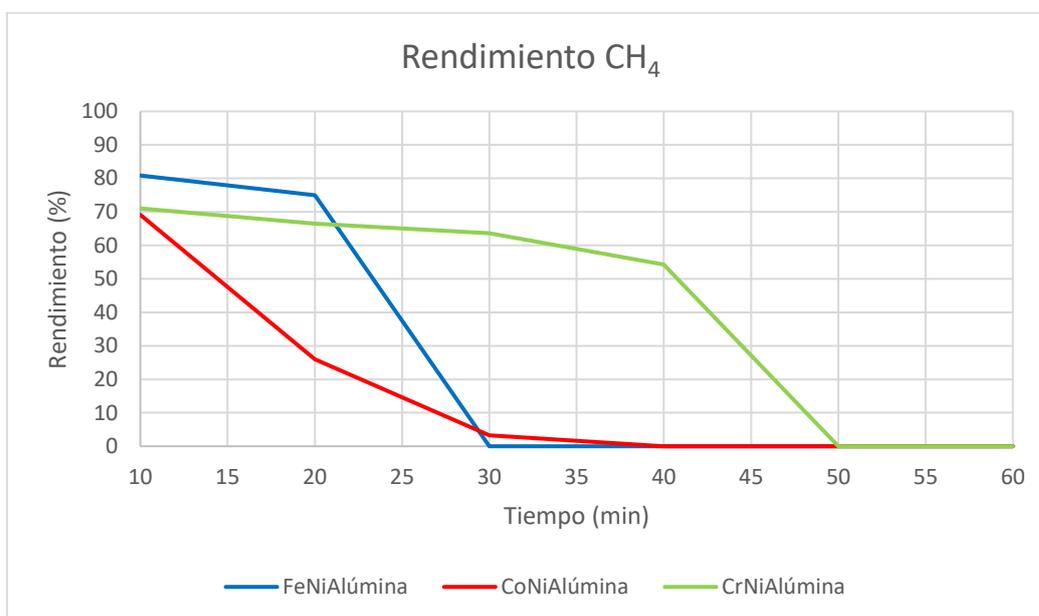


Ilustración 13: Desactivación. Rendimiento CH₄ en función del tiempo.

A la vista de los resultados podemos comentar que todos los catalizadores presentan una desactivación total por acción del H₂S. Inicialmente, presentan una alta actividad, aunque menor que la medida para una alimentación sin azufre. Aunque la caída de la actividad se produce rápidamente. Por lo que, la presencia de azufre, aun cuando se empleen bajas concentraciones, provoca una completa desactivación de los sistemas catalíticos.

FeNiAlúmina: presenta un rendimiento adecuado durante los 20 primeros minutos, pero a continuación su actividad cae drásticamente.

CoNiAlúmina: Con menor actividad, aguanta un tiempo parecido al FeNiAlúmina, ya que un rendimiento del 3% es prácticamente nulo.

CrNiAlúmina: es el catalizador que más tiempo tarda en desactivarse, obteniendo además una actividad por encima del 50% hasta el minuto 40, para finalizar desactivándose por completo.

REACCIÓN POST – REGENERACIÓN.

RENDIMIENTO CH ₄ (%)	500 °C											
Tiempo (min)	15	30	45	60								
FeNiAlúmina	0,0	0,0	0,0	0,0								
CrNiAlúmina	0,0	0,0	0,0	0,0								
RENDIMIENTO CH ₄ (%)	550 °C				600 °C				650 °C			
Tiempo (min)	15	30	45	60	15	30	45	60	15	30	45	60
CoNiAlúmina	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 4: Reacción post-regeneración. Rendimiento CH₄ en función del tiempo.

Tal y como se puede observar, tras la desactivación debida al H₂S y tras el posterior intento de regeneración, no obtenemos metano para ninguno de los catalizadores, concluyendo que el H₂S provoca una desactivación irreversible, e inhibe totalmente la acción de éstos catalizadores.

La reacción post-regeneración se ha llevado a cabo a los valores de temperatura a los que se obtenía la actividad más estable, y a la que se obtenían los mayores rendimientos en la reacción inicial, ya que es el rango de valores en el que se va a llevar a cabo la reacción, en el caso de implantar esta tecnología.

9 PRESUPUESTO

A continuación se presenta el presupuesto del proyecto que se ha llevado a cabo. Está dividido en dos tablas: una con el presupuesto general, y la otra correspondiente al desglose de las amortizaciones, facilitando así su comprensión.

HORAS INTERNAS				26.090,00 €
TRABAJADOR	COSTE HORARIO (€/h)	HORAS (h)	COSTE (€)	
Ingeniero junior	10,00	784,00	7840,00	
Ingeniero senior	25,00	610,00	15250,00	
Directora de proyecto	60,00	50,00	3000,00	
AMORTIZACIONES				453,49 €
INVERSIÓN/ACTIVO FIJO	UNIDAD	PRECIO (€/ud)	Nº UNIDADES	IMPORTE(€)
Planta Microactivity Reference	horas	1,05	384,00	403,29
Cromatógrafo de gases	horas	0,30	98,00	29,09
Ordenador Planta	horas	0,03	98,00	2,46
Ordenador Cromatógrafo	horas	0,03	98,00	2,46
Software de Controladores	horas	0,05	98,00	4,47
Material Laboratorio	horas	0,12	101,00	11,71
GASTOS				4.150,00 €
MATERIAL	PRECIO (€/ud)	Nº UNIDADES	IMPORTE(€)	
Material Fungible				1.000,00 €
Material de Oficina	500,00	1,00	500,00	
Material Básico de Laboratorio	500,00	1,00	500,00	
Material para equipos				3.150,00 €
Gases de Proceso	250,00	3,00	750,00	
Reactores	100,00	4,00	400,00	
Repuestos Instalaciones	2000,00	1,00	2000,00	
SUBTOTAL			30.693,49 €	
IMPREVISTOS (5%)			1.534,67 €	
TOTAL			32.228,16 €	

Tabla 5: Presupuesto del proyecto.

AMORTIZACIONES			
CONCEPTO	COSTE (€)	VIDA ÚTIL (años)	TASA HORARIA (€/h)
Planta Microactivity Reference	92000,00	10,00	1,05
Cromatógrafo de gases	26000,00	10,00	0,30
Ordenador Planta	1100,00	5,00	0,03
Ordenador Cromatógrafo	1100,00	5,00	0,03
Software de Controladores	2000,00	5,00	0,05
Burbujímetro	210,00	5,00	0,005
Material Laboratorio (vasos, probetas...)	5080,00	5,00	0,12

Tabla 6: Desglose amortizaciones.

10 CONCLUSIONES

Tras la realización de este proyecto, las conclusiones que se pueden obtener son las siguientes:

La producción de metano mediante la tecnología Power To Gas permite el almacenamiento de energía excedentaria obtenida a partir de fuentes renovables. En concreto, para la etapa de metanación se ha ensayado diversos sistemas catalíticos basados en metales no nobles (níquel modificado) con idea de sustituir al rutenio, que es el metal más empleado para el proceso de metanación. Así para bajas temperaturas el catalizador más adecuado es el CrNiAlúmina, dado que es el que presenta la mayor actividad; presentado una mayor actividad a medida que aumentan las temperaturas el FeNiAlúmina, y el CoNiAlúmina para las temperaturas más elevadas. Es interesante comprobar que para temperaturas bajas, el Katalco también resulta adecuado ya que se trata de un catalizador comercial empleado en procesos de reformado, al cual se le han incorporado ciertos agentes estabilizantes. Por lo que, el catalizador más prometedor para el proceso de metanación es el que se encuentra formado por Ni y Cr sobre un soporte de alúmina con alta actividad a bajas temperaturas con el consiguiente ahorro energético para el proceso.

La presencia de compuestos de azufre como el ácido sulfhídrico, aunque sea en bajas concentraciones, en el proceso de la reacción de metanación es de un riesgo muy elevado para la producción de metano, ya que se ha comprobado que desactiva el catalizador de forma prácticamente irreversible por envenenamiento. También se ha comprobado que después de la desactivación producida por el ácido sulfhídrico la regeneración no ha sido posible, por lo que esto demuestra lo dañinos que son estos compuestos para la reacción.

11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Meteorological Organization; Global Atmosphere Watch, «Greenhouse Gas Bulletin,» 2017.
- [2] B. P. «BP Statistical Review of World Energy 2017,» 2018.
- [3] T. M. Letcher, «Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet,» de *Future Energy*, 2 ed., 2014, pp. 3-16.
- [4] S. Cadez y A. Czerny, «Climate change mitigation strategies in carbon-intensive firms,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, nº 5, pp. 4132-4143, 2016.
- [5] T. Estermann, M. Newborough y M. Sterner, «Power-to-gas systems for absorbing excess solar power in electricity distribution networks,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, nº 32, pp. 13950-13959, 2014.
- [6] «European Power to Gas Platform,» [En línea]. Available: <http://www.europeanpowertogas.com/about/power-to-gas>.
- [7] Comisión Europea, «Acuerdo de París. Acción por el clima,» [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es#tab-0-0.
- [8] Red Eléctrica de España, «Integración de Renovables,» [En línea]. Available: www.ree.es/es/red21/integracion-de-renovables.
- [9] M. Calvo Díaz, *Almacenar energía eléctrica produciendo gas natural: Power to Gas.*, Sevilla, 2016.
- [10] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, *Resolución de 22 de septiembre de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 "medición" de las normas de gestión técnica del sistema gasista.*, 2011, pp. 130888 - 103913.
- [11] G. Reiter y J. Lindorfer, «Global warming potential of hydrogen and methane production from renewable electricity via power-to-gas technology,» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20, nº 4, pp. 477 - 489, Abril 2015.
- [12] «Modern Power Systems,» Global Trade Media, [En línea]. Available: <http://www.modernpowersystems.com/features/featurerecognising-its-true-value-a-wec-perspective-4816858/featurerecognising-its-true-value-a-wec-perspective-4816858-2.html>.
- [13] F. Reichert, «Wind-to-gas-to-Money? Economics and Perspectives of the Power-to-Gas Technology,» 2012.

- [14] Agencia Alemana de Energía, «Sistemas y servicios de energía. Power to Gas,» [En línea]. Available: http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/?no_cache=1.
- [15] Förderinitiative Energiespeicher, «World's first industrial power-to-gas plant,» [En línea]. Available: http://forschung-energiespeicher.info/en/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/Weltweit_erste_industrielle_Power_to_Gas_Anlage/.
- [16] Agencia Alemana de Energía, «Audi e-gas Projekt,» [En línea]. Available: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/audi-e-gas-projekt/>.
- [17] H. Seyed Meysam y P. Matin, «Deactivation and Regeneration of Nickel-Based Catalysts for Steam - Methane Reforming,» *Chinese Journal of Catalysis*, vol. 32, nº 1 - 2, pp. 273 - 279, January - February 2011.
- [18] Q. Liu, B. Bing, F. Junfeng y Y. Jing, «Cobalt doped Ni based ordered mesoporous catalysts for CO₂ methanation with enhanced catalytic performance,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, nº 10, pp. 4893 - 4901, 8 March 2018.
- [19] Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Gobierno de España, «INSSBT (Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar en el Trabajo),» [En línea]. Available: http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.a82abc159115c8090128ca10060961ca/?vgn_extoid=4458908b51593110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD.

ANEXO I: FICHAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD QUÍMICA [19]

HIDROGENO		ICSC: 0001	
		Marzo 2002	
CAS:	1333-74-0	H ₂	
RTECS:	MW8900000	Masa molecular: 2.0	
NU:	1049		
CE (índice Anexo I):	001-001-00-9		
CE / ENECS:	215-605-7		
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas gaseosas son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Utilicéense herramientas manuales no generadoras de chispas. No manipular las botellas con las manos gaseosas.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICIÓN			
Inhalación	Asfixia.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Congelación grave.	Guantes aislantes del frío.	Proporcionar asistencia médica.
Ojos		Gafas de protección de seguridad.	
Ingestión			
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Eliminar toda fuente de ignición. Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar el vapor con agua pulverizada.		Clasificación UE Símbolo: F+ R: 12 S: (2)-9-16-33 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20S1049 Código NFPA: H0; F4; R0;		A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco.	
 <p>Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2005</p>			

Ilustración 14: FISQ Hidrógeno 1

HIDROGENO		ICSC: 0001
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO / ASPECTO: Gas comprimido inodoro e incoloro.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS: El gas se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas. El gas es más ligero que el aire.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS: El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. Reacciona violentamente con aire, oxígeno, halógenos y oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión. Los metales catalizadores tales como el platino o el níquel aumentan este tipo de reacciones.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN: TLV: asfixiante simple (ACGIH 2002).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN: La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN: Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN: Asfixiante simple. Véanse Notas.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: -253 °C Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.07</p>	<p>Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 500-571 °C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 4-75</p>	
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
<p>Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. A concentraciones tóxicas no hay alerta por el olor. Medir concentraciones de hidrógeno con un detector de gas adecuado (un detector de gas inflamable normal no es adecuado).</p>		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2011):</p> <p>Notas: Asfixiante simple</p>		
<p>Nota legal</p>	<p>Esta ficha contiene la opinión colectiva de l Comité Internacional de Expertos de l IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.</p>	
© IPCS, CE 2005		

Ilustración 15: FISQ Hidrógeno 2

DIÓXIDO DE CARBONO		ICSC: 0021	
		Octubre 2006	
Gas ácido carbónico		Anhídrido carbónico	
CAS:	124-38-9	CO ₂	
RECS:	FF640000	Masa molar: 44,0	
NU:	1013		
CE/ EINECS:	204-696-9		
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible.		En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
EXPLOSIÓN	¡Los envases pueden explotar en un incendio!		En caso de incendio: mantener fría la bota evitando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICIÓN			
Inhalación	Vértigo. Dolor de cabeza. Presión sanguínea elevada. Ritmo cardíaco acelerado. Asfixia. Pérdida del conocimiento.	Ventilación.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
Piel	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Guantes aislantes del frío. Traje de protección.	EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	En contacto con líquido: congelación.	Gafas ajustadas de seguridad o pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión			
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Protección personal: equipo autónomo de respiración. Ventilar. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido.		Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.2 Clasificación GHS Atención Puede ser nocivo si se inhala. Contiene un gas refrigerado; puede provocar quemaduras o lesiones criogénicas.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20S1013 o 20G2A		A prueba de incendio, si está en local cerrado. Mantener en lugar fresco. Ventilación a ras del suelo.	
<p>IPCS International Programme on Chemical Safety</p>  <p>Preparada en el contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea. © IPCS, CE 2007</p>			

Ilustración 16: FISQ Dióxido de carbono 1

DIÓXIDO DE CARBONO		ICSC: 0021
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO: Gas licuado comprimido, incoloro e inodoro.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS: El gas es más denso que el aire y puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. A velocidades elevadas pueden generarse cargas electrostáticas y puede inflamarse cualquier mezcla explosiva presente. Las pérdidas de líquido condensan formando hielo seco extremadamente frío.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS: La sustancia se descompone al calentarse intensamente, por encima 2000°C produciendo monóxido de carbono tóxico.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN: TLV: 5000 ppm como TWA, 30000 ppm como STEL; (ACGIH 2006). MAK: 5000 ppm, 9100 mg/m³; Categoría de limitación de pico: III(2); (DFG 2006).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN: La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN: Al producirse pérdidas en zonas confinadas, este líquido se evaporará muy rápidamente originando una saturación total del aire con grave riesgo de asfixia.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN: La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La inhalación a niveles elevados puede originar pérdida de conciencia. Asfixia.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA: La sustancia puede afectar al metabolismo.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de sublimación: -79 °C Solubilidad en agua, ml/100 ml a 20 °C: 99 Presión de vapor, kPa a 20 °C: 5720 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1,5</p>	<p>Coefficiente de reparto octano/agua como log Pow: 0,83</p>	
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
<p>El dióxido de carbono se libera en muchos procesos de fermentación (vino, cerveza, etc.) y es un componente mayoritario en los gases de combustión. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. A concentraciones tóxicas no hay aléjate por el olor. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Otros números de clasificación NU para el transporte son: NU 1845 dióxido de carbono, sólido (Hielo seco); NU 2187 dióxido de carbono líquido refrigerado.</p>		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2011): VLA-ED: 5000 ppm; 9150 mg/m³</p> <p>Notas: Agente químico que tiene establecido un valor límite indicativo por la UE.</p>		
<p>Nota legal</p>	<p>Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.</p>	
© IPCS, CE 2007		

Ilustración 17: FISQ Dióxido de carbono 2

METANO		ICSC: 0291 Febrero 2000	
CAS: 74-82-8 RTECS: PA148000 NU: 1871 CE Índice Anexo I: 601-001-00-4 CE / ENECS: 200-812-7		Número de serie: CH ₄ Masa molecular: 16.0	
			
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo seco, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICIÓN			
Inhalación	Asfixia. Ver Notas.	Ventilación. A altas concentraciones protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
Piel	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Gautes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Gautes ajustadas de seguridad	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión			
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. Protección personal: equipo autónomo de respiración. NO verter NUNCA charcos de agua sobre el líquido.		Clasificación UE Símbolo: F+ R: 12 S: (2)-9-16-33 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1	
RESUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20G1F Código NFPA: H1; F4; R0;		A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco. Ventilación a ras del suelo y techo.	

Ilustración 18: FISQ Metano 1

METANO		ICSC: 0291
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Gas licuado o comprimido incoloro e inodoro.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El gas es más ligero que el aire.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: (Hidrocarburos Alifáticos Alcanos (C1-C4), gases) 1000 ppm (como TWA) (ACGIH 2005). MAK no establecida.</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Al producirse pérdidas en zonas confinadas, este gas puede originar asficia por disminución del contenido de oxígeno en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La evaporación rápida del líquido puede producir congelación.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: -161 °C Punto de fusión: -183 °C Solubilidad en agua, ml/100 ml a 20 °C: 3.3 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.6</p>	<p>Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 537 °C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 5-15 Coeficiente de reparto octano/agua como log Pow: 1.09</p>	
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
<p>Densidad del líquido en el punto de ebullición: 0.42 kg/l. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Una vez utilizada para la soldadura, cerrar la válvula; verificar regularmente el estado de la tubería, etc., y comprobar si existen escapes utilizando agua y jabón. Las medidas mencionadas en la sección PREVENCIÓN son aplicables a la producción, llenado de botellas y almacenamiento del gas. Otro número NU: 1872 (líquido refrigerado), clase de peligro: 2.1. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2005: ver Respuesta de Emergencia</p>		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2012): VLA-ED: (como Hidrocarburos alifáticos alcanos (C1-C4) y sus mezclas, gases) 1000 ppm</p>		

Ilustración 19: FISQ Metano 2

SULFURO DE HIDRÓGENO			ICSC: 0165 Abril 2000
CAS: 7783-06-4 RTECS: MX1225000 NU: 1063 CE Índice Anexo I: 016-001-00-4 CE / EINECS: 231-977-3		Hidruro de azufre Ácido sulfhídrico H_2S Masa molecular: 34.1	
			
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo seco, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR TODO CONTACTO!	¡CONSULTAR AL MÉDICO EN TODOS LOS CASOS!
Inhalación	Dolor de cabeza. Vértigo. Tos. Dolor de garganta. Mucosas. Dificultad respiratoria. Pérdida del conocimiento. Si síntomas no inmediatos (ver Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Posición de semincorporado. Respiración artificial si estuviera indicada. No aplicar respiración boca a boca. Proporcionar asistencia médica.
Piel	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACIÓN.	Gaútes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACIÓN: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Quemaduras profundas graves.	Gafas ajustadas de seguridad o protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	
DERRAMES Y FUGAS		EMPAQUE Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Eliminar toda fuente de ignición. Ventilar. Eliminar el gas con agua pulverizada. Protección personal: traje hermético de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración.		Clasificación UE Símbolo: F+, T+, N R: 12-28-50 S: (12)-9-16-38-38-45-61 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.3 Riesgos Subsidiarios de las NU: 2.1	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-2052T F o 2051053 Código NFPA: H4; F4; R0;		A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar fresco. Mantener en lugar bien ventilado. Instalar sistema de vigilancia con alarma continuo.	

Ilustración 20: FISQ Sulfuro de hidrógeno 1

SULFURO DE HIDRÓGENO		ICSC: 0165
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO ; ASPECTO Gas licuado comprimido incoloro, de olor característico a huevos podridos.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. La sustancia se descompone al arder, produciendo gas tóxico (óxidos de azufre). Reacciona violentamente con oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión. Ataca a metales y algunos plásticos.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 10 ppm como TWA; 15 ppm como STEL (ACGIH 2004). MAK: 5ppm, 7.1 mg/m³; Categoría de limitación de pico: (2); Riesgo para el embarazo: grupo C (DPR 2008).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Al producirse una pérdida de gas, se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. La exposición puede producir pérdida del conocimiento. La exposición puede producir la muerte. La inhalación del gas puede originar edema pulmonar (ver Notas). Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica. La evaporación rápida del líquido puede producir congelación.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: -60°C Punto de fusión: -85°C Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 0.5 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.19</p>	<p>Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 260°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 4.3-48</p>	
DATOS AMBIENTALES		
<p>La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos.</p>		
NOTAS		
<p>Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son, por ello, imprescindibles. En caso de envenenamiento con esta sustancia es necesario realizar un tratamiento específico; así como disponer de los medios adecuados junto a las instrucciones correspondientes. La sustancia bloquea el sentido del olfato. La alerta por el olor cuando se supera el límite de exposición es insuficiente. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2004: ver Clasificación UE, Respuesta de Emergencia, y en octubre de 2008: ver Límites de exposición.</p>		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2012): VLA-ED: 5 ppm; 7 mg/m³ VLA-BC: 10 ppm, 14 mg/m³ Nota: agente químico que tiene establecido un valor límite indicativo por la UE.</p>		

Ilustración 21: FISQ Sulfuro de hidrógeno 2

ANEXO II: TABLAS DE CÁLCULOS Y RESULTADOS

REACCIÓN INICIAL

		Katalco				FeNiAlúmina				CrNiAlúmina			
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂
300 °C		7439,6	3419,9	0,0	461,7	16699,8	0,0	0,0	971,0	16660,0	0,0	0,0	953,1
		7897,3	3666,1	0,0	393,8	16758,5	0,0	0,0	970,0	16577,8	0,0	0,0	966,5
		6493,7	3680,0	0,0	345,7	16757,4	0,0	0,0	963,5	16612,1	0,0	0,0	963,8
		7431,7	3737,6	0,0	452,7	16775,4	0,0	0,0	968,2	16643,2	0,0	0,0	962,9
350 °C		7810,0	3576,0	0,0	472,6	16653,5	0,0	0,0	972,7	16456,1	0,0	0,0	949,9
		7808,8	3625,7	0,0	476,1	16744,4	0,0	0,0	964,8	16440,3	169,8	0,0	932,5
		8033,1	3657,3	0,0	440,4	16708,4	0,0	0,0	968,3	7111,5	3292,2	0,0	307,6
		7963,1	3666,9	0,0	454,3	16689,0	0,0	0,0	971,8	7264,2	2823,6	0,0	257,8
400 °C		8937,5	3296,5	0,0	502,0	16554,4	0,0	0,0	951,7	6483,5	3415,0	0,0	273,4
		9045,6	3247,8	0,0	487,6	16500,1	0,0	0,0	954,4	6835,7	2791,6	0,0	238,2
		9050,8	3293,5	0,0	491,9	16503,2	0,0	0,0	954,6	6480,4	2845,0	0,0	282,9
		9045,0	3284,6	0,0	498,1	16519,2	0,0	0,0	953,6	7402,2	2590,4	0,0	245,9
450 °C		10211,1	2784,1	0,0	579,7	7814,3	2947,8	0,0	368,5	6453,6	2978,0	0,0	263,5
		10411,8	2780,2	0,0	561,3	7725,1	2951,9	0,0	350,9	6359,7	3271,8	0,0	276,2
		10413,9	2736,4	0,0	561,2	7774,3	3026,6	0,0	337,2	6446,3	3085,0	0,0	271,7
		10483,2	2775,9	0,0	552,3	7577,0	2938,6	0,0	364,2	6520,2	3019,7	0,0	266,6
500 °C		11951,0	2268,6	0,0	566,3	7310,5	3132,9	0,0	313,0	6894,9	2861,9	0,0	297,8
		11916,0	2293,9	0,0	590,6	7136,0	3191,3	0,0	338,2	6920,6	3157,0	0,0	300,1
		11452,3	2197,7	0,0	680,6	7335,4	3133,0	0,0	312,7	6808,6	2954,5	0,0	329,3
		11797,6	2264,2	0,0	605,9	7231,9	3134,1	0,0	313,6	6508,0	2700,3	0,0	377,2

Tabla 7: Resultados obtenidos en el cromatógrafo para diferentes catalizadores

CoNiAlúmina				
	H2	CH4	CO	CO2
300 °C	16831,7	0,0	0,0	976,0
	16886,7	0,0	0,0	975,0
	16888,7	0,0	0,0	973,1
	16929,8	0,0	0,0	978,2
350 °C	16968,0	0,0	0,0	965,2
	16966,2	0,0	0,0	959,8
	16953,3	0,0	0,0	959,4
	16878,4	0,0	0,0	973,7
400 °C	16890,4	0,0	0,0	973,3
	16919,2	0,0	0,0	968,6
	17006,1	0,0	0,0	958,3
	16786,3	0,0	0,0	986,1
450 °C	16709,0	0,0	0,0	993,1
	16736,1	0,0	0,0	998,2
	16832,0	0,0	0,0	970,9
	16538,5	0,0	0,0	1020,7
500 °C	16824,2	0,0	0,0	972,2
	16791,6	0,0	0,0	969,6
	16796,7	0,0	0,0	970,0
	17017,6	0,0	0,0	953,1
550 °C	16406,0	0,0	0,0	956,0
	10693,2	1946,3	0,0	549,7
	7651,5	3047,5	0,0	387,5
	7750,6	3138,9	0,0	336,6
600 °C	8653,6	2740,1	0,0	214,0
	7327,8	2727,8	0,0	399,8
	7685,8	2630,4	0,0	340,4
	7525,4	2718,7	0,0	379,3
650 °C	9017,1	2664,7	0,0	311,0
	7870,1	2535,0	0,0	531,9
	8555,2	2624,4	0,0	425,4
	8626,1	2517,1	0,0	424,2

Tabla 8: Resultados obtenidos en el cromatógrafo para CoNiAlúmina

	KATALCO					FeNiAlúmina					CrNiAlúmina				
	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	Total	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	Total	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	Total
300 °C	6,5	13,5	0,0	1,9	22,0	14,1	0,0	0,0	4,1	18,3	14,1	0,0	0,0	4,1	18,2
	6,9	14,5	0,0	1,7	23,0	14,2	0,0	0,0	4,1	18,3	14,0	0,0	0,0	4,1	18,1
	5,7	14,6	0,0	2,7	22,9	14,2	0,0	0,0	4,1	18,3	14,1	0,0	0,0	4,1	18,2
	6,5	14,8	0,0	1,9	23,2	14,2	0,0	0,0	4,1	18,3	14,1	0,0	0,0	4,1	18,2
350 °C	6,8	14,1	0,0	2,0	22,9	14,1	0,0	0,0	4,1	18,2	13,9	0,0	0,0	4,0	18,0
	6,8	14,3	0,0	2,0	23,1	14,2	0,0	0,0	4,1	18,3	13,9	0,7	0,0	4,0	18,6
	7,0	14,5	0,0	1,9	23,3	14,1	0,0	0,0	4,1	18,3	6,0	14,3	0,0	1,3	21,6
	6,9	14,5	0,0	1,9	23,4	14,1	0,0	0,0	4,1	18,3	6,2	12,3	0,0	1,1	19,5
400 °C	7,8	13,0	0,0	2,1	22,9	14,0	0,0	0,0	4,0	18,1	5,5	14,8	0,0	1,2	21,5
	7,9	12,9	0,0	2,1	22,8	14,0	0,0	0,0	4,1	18,0	5,8	12,1	0,0	1,0	18,9
	7,9	13,0	0,0	2,1	23,0	14,0	0,0	0,0	4,1	18,1	5,5	12,4	0,0	1,2	19,1
	7,9	13,0	0,0	2,1	23,0	14,0	0,0	0,0	4,1	18,1	6,3	11,3	0,0	1,0	18,6
450 °C	8,9	11,0	0,0	2,4	22,3	6,6	12,8	0,0	1,6	21,0	5,5	12,9	0,0	1,1	19,5
	9,1	11,0	0,0	2,4	22,4	6,5	12,8	0,0	1,5	20,9	5,4	14,2	0,0	1,2	20,8
	9,1	10,8	0,0	2,4	22,3	6,6	13,2	0,0	1,4	21,2	5,5	13,4	0,0	1,2	20,0
	9,1	11,0	0,0	2,3	22,4	6,4	12,8	0,0	1,5	20,7	5,5	13,1	0,0	1,1	19,8
500 °C	10,4	9,0	0,0	2,4	21,8	6,2	13,6	0,0	1,3	21,1	5,8	12,4	0,0	1,3	19,5
	10,4	9,1	0,0	2,5	21,9	6,0	13,9	0,0	1,4	21,4	5,9	13,7	0,0	1,3	20,9
	10,0	8,7	0,0	2,9	21,5	6,2	13,6	0,0	1,3	21,2	5,8	12,8	0,0	1,4	20,0
	10,3	9,0	0,0	2,6	21,8	6,1	13,6	0,0	1,3	21,1	5,5	11,7	0,0	1,6	18,9

Tabla 9: Moles obtenidos para distintos catalizadores

		CoNiAlúmina				
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	Total
300 °C	14,3	0,0	0,0	4,2	18,4	
	14,3	0,0	0,0	4,1	18,4	
	14,3	0,0	0,0	4,1	18,4	
	14,3	0,0	0,0	4,2	18,5	
350 °C	14,4	0,0	0,0	4,1	18,5	
	14,4	0,0	0,0	4,1	18,4	
	14,4	0,0	0,0	4,1	18,4	
	14,3	0,0	0,0	4,1	18,4	
400 °C	14,3	0,0	0,0	4,1	18,4	
	14,3	0,0	0,0	4,1	18,4	
	14,4	0,0	0,0	4,1	18,5	
	14,2	0,0	0,0	4,2	18,4	
450 °C	14,1	0,0	0,0	4,2	18,4	
	14,2	0,0	0,0	4,2	18,4	
	14,3	0,0	0,0	4,1	18,4	
	14,0	0,0	0,0	4,3	18,3	
500 °C	14,2	0,0	0,0	4,1	18,4	
	14,2	0,0	0,0	4,1	18,3	
	14,2	0,0	0,0	4,1	18,3	
	14,4	0,0	0,0	4,1	18,5	
550 °C	13,9	0,0	0,0	4,1	18,0	
	9,1	8,5	0,0	2,3	19,9	
	6,5	13,2	0,0	1,6	21,4	
	6,6	13,6	0,0	1,4	21,6	
600 °C	7,3	11,9	0,0	0,9	20,1	
	6,2	11,9	0,0	1,7	19,8	
	6,5	11,4	0,0	1,4	19,4	
	6,4	11,8	0,0	1,6	19,8	
650 °C	7,6	11,6	0,0	1,3	20,5	
	6,7	11,0	0,0	2,3	19,9	
	7,2	11,4	0,0	1,8	20,5	
	7,3	10,9	0,0	1,8	20,0	

Tabla 10: Moles obtenidos para CoNiAlúmina

	Katalco				FeNiAlúmina				CrNiAlúmina			
	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂
300 °C	29,50	61,64	0,00	8,86	77,39	0,00	0,00	22,61	77,67	0,00	0,00	22,33
	29,84	62,96	0,00	7,20	77,47	0,00	0,00	22,53	77,34	0,00	0,00	22,66
	24,65	63,49	0,00	11,86	77,58	0,00	0,00	22,42	77,43	0,00	0,00	22,57
	27,93	63,84	0,00	8,23	77,52	0,00	0,00	22,48	77,47	0,00	0,00	22,53
350 °C	29,64	61,68	0,00	8,68	77,31	0,00	0,00	22,69	77,51	0,00	0,00	22,49
	29,36	61,97	0,00	8,67	77,55	0,00	0,00	22,45	74,74	3,96	0,00	21,30
	29,99	62,05	0,00	7,96	77,45	0,00	0,00	22,55	27,82	66,13	0,00	6,05
	29,68	62,12	0,00	8,20	77,36	0,00	0,00	22,64	31,51	62,87	0,00	5,62
400 °C	33,92	56,86	0,00	9,22	77,59	0,00	0,00	22,41	25,54	69,05	0,00	5,41
	34,57	56,41	0,00	9,02	77,48	0,00	0,00	22,52	30,57	64,08	0,00	5,35
	34,28	56,70	0,00	9,02	78,15	0,00	0,00	21,85	28,79	64,89	0,00	6,32
	34,28	56,58	0,00	9,14	78,06	0,00	0,00	21,94	33,74	60,62	0,00	5,63
450 °C	39,78	49,29	0,00	10,93	31,51	61,02	0,00	7,47	27,98	66,28	0,00	5,74
	40,41	49,04	0,00	10,55	31,35	61,50	0,00	7,16	25,91	68,43	0,00	5,65
	40,73	48,64	0,00	10,63	31,09	62,14	0,00	6,78	27,26	66,97	0,00	5,77
	40,67	48,95	0,00	10,37	30,93	61,59	0,00	7,47	27,91	66,36	0,00	5,73
500 °C	47,80	41,24	0,00	10,96	29,28	64,42	0,00	6,30	29,87	63,65	0,00	6,48
	47,28	41,37	0,00	11,34	28,30	64,96	0,00	6,74	28,09	65,79	0,00	6,12
	46,30	40,38	0,00	13,32	29,35	64,36	0,00	6,29	28,81	64,19	0,00	7,00
	47,15	41,13	0,00	11,72	29,05	64,62	0,00	6,33	29,23	62,26	0,00	8,51

Tabla 11: Porcentaje molar para distintos catalizadores.

		CoNiAlúmina			
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂
300 °C	77,4357	0	0	22,56	
	77,5105	0	0	22,49	
	77,5465	0	0	22,45	
	77,4978	0	0	22,5	
350 °C	77,7692	0	0	22,23	
	77,8643	0	0	22,14	
	77,8583	0	0	22,14	
	77,5252	0	0	22,47	
400 °C	77,5447	0	0	22,46	
	77,6585	0	0	22,34	
	77,9316	0	0	22,07	
	77,2078	0	0	22,79	
450 °C	77,0014	0	0	23	
	76,9394	0	0	23,06	
	77,5274	0	0	22,47	
	76,3276	0	0	23,67	
500 °C	77,496	0	0	22,5	
	77,5089	0	0	22,49	
	77,507	0	0	22,49	
	78,0367	0	0	21,96	
550 °C	75,5697	0	0	22,13	
	49,3591	46,122	0	12,75	
	35,0871	71,744	0	8,93	
	35,5415	73,896	0	7,757	
600 °C	39,8116	64,717	0	4,948	
	33,6348	64,279	0	9,222	
	35,2903	62,005	0	7,854	
	34,4483	63,891	0	8,725	
650 °C	41,4839	62,937	0	7,19	
	36,124	59,736	0	12,27	
	39,2823	61,864	0	9,816	
	39,4868	59,153	0	9,758	

Tabla 12: Porcentaje Molar para CoNiAlúmina

Katalco						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
300 °C	85,36	87,82	100,00	100,00	0,00	0,66
	89,14	88,75	94,91	100,00	0,00	0,61
	82,21	90,76	95,20	100,00	0,00	0,62
	88,09	89,90	92,33	100,00	0,00	0,60
350 °C	87,22	89,09	90,79	100,00	0,00	0,56
	87,47	89,39	89,59	100,00	0,00	0,55
	88,32	89,00	91,05	100,00	0,00	0,56
	88,10	89,23	90,20	100,00	0,00	0,55
400 °C	86,04	87,16	86,08	100,00	0,00	0,47
	86,76	87,31	82,83	100,00	0,00	0,45
	86,08	86,77	87,52	100,00	0,00	0,48
	86,40	87,24	84,23	100,00	0,00	0,46
450 °C	80,95	82,67	85,90	100,00	0,00	0,54
	82,08	82,84	83,32	100,00	0,00	0,52
	81,99	82,74	82,47	100,00	0,00	0,52
	82,50	82,85	82,58	100,00	0,00	0,52
500 °C	79,71	77,89	76,32	100,00	0,00	0,45
	78,49	77,59	78,43	100,00	0,00	0,46
	74,96	78,24	75,93	100,00	0,00	0,45
	78,13	78,01	76,72	100,00	0,00	0,45

Tabla 13: Resultados Katalco

FeNiAlúmina						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
300 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
350 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
400 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
450 °C	87,54	87,27	101,80	100,00	0,00	0,57
	88,36	87,65	100,07	100,00	0,00	0,56
	89,21	88,02	98,91	100,00	0,00	0,55
	88,05	88,03	98,48	100,00	0,00	0,55
500 °C	90,24	89,02	99,76	100,00	0,00	0,75
	89,69	89,52	99,40	100,00	0,00	0,74
	90,39	89,14	98,34	100,00	0,00	0,74
	90,38	89,32	98,18	100,00	0,00	0,73

Tabla 14: Resultados FeNiAlúmina

CrNiAlúmina						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
300 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
350 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	90,49	89,40	104,03	100,00	0,00	0,59
	91,00	87,79	100,68	100,00	0,00	0,57
400 °C	92,24	91,13	99,04	100,00	0,00	0,53
	92,43	89,54	90,58	100,00	0,00	0,49
	91,05	90,13	91,91	100,00	0,00	0,50
	91,44	87,58	92,14	100,00	0,00	0,50
450 °C	91,84	90,37	94,23	100,00	0,00	0,52
	91,95	91,08	97,36	100,00	0,00	0,54
	91,86	90,69	94,45	100,00	0,00	0,52
	91,86	90,40	94,24	100,00	0,00	0,52
500 °C	90,74	89,68	90,88	100,00	0,00	0,49
	91,01	90,02	96,59	100,00	0,00	0,52
	89,71	89,75	94,31	100,00	0,00	0,51
	87,49	89,60	91,52	100,00	0,00	0,49

Tabla 15: Resultados CrNiAlúmina

CoNiAlúmina						
	Conversión CO2 (%)	Conversión H2 (%)	η CH4 (%)	Selectividad CH4 (%)	Selectividad CO (%)	CH4/H2O
300 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
350 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
400 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
450 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
500 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
550 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	100,00	100,00	93,42	100,00	0,00	0,56
	100,00	100,00	91,87	100,00	0,00	0,65
	100,00	100,00	92,45	100,00	0,00	0,66
600 °C	100,00	100,00	97,82	100,00	0,00	0,53
	100,00	100,00	99,90	100,00	0,00	0,54
	100,00	100,00	95,71	100,00	0,00	0,52
	100,00	100,00	97,67	100,00	0,00	0,53
650 °C	100,00	100,00	96,53	100,00	0,00	0,48
	100,00	100,00	99,12	100,00	0,00	0,48
	100,00	100,00	97,66	100,00	0,00	0,49
	100,00	100,00	97,77	100,00	0,00	0,46

Tabla 16: Resultados CoNiAlúmina

FeNiAlúmina						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
500 °C	85,85	89,66	80,85	100,00	0,00	0,62
	78,74	83,23	74,92	100,00	0,00	0,57
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-

Tabla 20: Resultados FeNiAlúmina

CrNiAlúmina						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
500 °C	89,13	92,89	71,03	100,00	0,00	0,42
	86,56	90,64	66,50	100,00	0,00	0,39
	84,34	88,47	63,59	100,00	0,00	0,37
	77,65	80,73	54,23	100,00	0,00	0,32
	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00
	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00

Tabla 21: Resultados CrNiAlúmina

CoNiAlúmina						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
550 °C	81,75	87,14	69,11	100,00	0,00	1,10
	51,74	59,62	25,93	100,00	0,00	0,41
	12,31	26,19	3,24	100,00	0,00	0,05
	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00
	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00
	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00

Tabla 22: Resultados CoNiAlúmina

REACCIÓN POST-REGENERACIÓN

		FeNiAlúmina				CrNiAlúmina				CoNiAlúmina							
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂				
500 °C		16755,2	0,0	0,0	943,3	16432,6	0,0	0,0	919,1	550 °C	16788,2	0,0	0,0	951,2			
		16709,1	0,0	0,0	955,2	16624,7	0,0	0,0	908,3		16782,4	0,0	0,0	952,1			
		16851,8	0,0	0,0	926,0	16548,4	0,0	0,0	923,1		16632,6	0,0	0,0	964,3			
		16757,1	0,0	0,0	943,8	16581,1	0,0	0,0	921,6		16601,4	0,0	0,0	965,9			
										600 °C							
										16727,6				0,0	0,0	945,5	
										16637,0				0,0	0,0	955,8	
										16662,2				0,0	0,0	951,6	
										16652,1				0,0	0,0	955,2	
										650 °C							
										16910,0				0,0	0,0	926,2	
										16613,6				0,0	0,0	902,9	
										16620,4				0,0	0,0	913,1	
										16623,3				0,0	0,0	903,4	

Tabla 23: Resultados obtenidos en el cromatógrafo para diferentes catalizadores

		FeNiAlúmina					CrNiAlúmina					CoNiAlúmina									
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	Total	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	Total	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	Total					
500 °C		14,2	0,0	0,0	4,0	18,2	13,9	0,0	0,0	3,9	17,8	550 °C	14,2	0,0	0,0	4,0	18,3				
		14,1	0,0	0,0	4,1	18,2	14,1	0,0	0,0	3,9	17,9		14,2	0,0	0,0	4,1	18,3				
		14,3	0,0	0,0	3,9	18,2	14,0	0,0	0,0	3,9	17,9		14,1	0,0	0,0	4,1	18,2				
		14,2	0,0	0,0	4,0	18,2	14,0	0,0	0,0	3,9	18,0		14,1	0,0	0,0	4,1	18,2				
												600 °C									
												14,2					0,0	0,0	4,0	18,2	
												14,1					0,0	0,0	4,1	18,2	
												14,1					0,0	0,0	4,0	18,2	
												14,1					0,0	0,0	4,1	18,2	
												650 °C									
												14,3					0,0	0,0	3,9	18,3	
												14,1					0,0	0,0	3,8	17,9	
												14,1					0,0	0,0	3,9	18,0	
												14,1					0,0	0,0	3,8	17,9	

Tabla 24: Número de moles obtenido para distintos catalizadores

		FeNiAlúmina				CrNiAlúmina				CoNiAlúmina				
		H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	
500 °C		77,9	0,0	0,0	22,1	78,1	0,0	0,0	21,9	550 °C	77,8	0,0	0,0	22,2
		77,7	0,0	0,0	22,3	78,5	0,0	0,0	21,5		77,8	0,0	0,0	22,2
		78,4	0,0	0,0	21,6	78,1	0,0	0,0	21,9		77,4	0,0	0,0	22,6
		77,9	0,0	0,0	22,1	78,2	0,0	0,0	21,8		77,4	0,0	0,0	22,6
600 °C		77,9	0,0	0,0	22,1					650 °C	78,4	0,0	0,0	21,6
		77,6	0,0	0,0	22,4						78,5	0,0	0,0	21,5
		77,7	0,0	0,0	22,3						78,4	0,0	0,0	21,6
		77,6	0,0	0,0	22,4						78,5	0,0	0,0	21,5

Tabla 25: Fracción molar obtenida para diferentes catalizadores.

FeNiAlúmina						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
500 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-

Tabla 26: Resultados FeNiAlúmina

CrNiAlúmina						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
500 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00
	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00
	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00
	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00

Tabla 27: Resultados CrNiAlúmina

CoNiAlúmina						
	Conversión CO ₂ (%)	Conversión H ₂ (%)	η CH ₄ (%)	Selectividad CH ₄ (%)	Selectividad CO (%)	CH ₄ /H ₂ O
550 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
600 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
650 °C	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-
	0,00	0,00	0,00	-	-	-

Tabla 28: Resultados CoNiAlúmina