

Beneficios energéticos y de capacidad en plantas de Hidrógeno por flexibilidad operativa de catalizador de HTS

Matías Garios, TOPSOE, maeg@topsoe.com

Sinopsis

Los catalizadores de shift (reacción water – gas shift) de alta temperatura (HTS) basados en hierro y cromo han sido el estándar en la industria durante más de un siglo, con avances limitados en su diseño. Estas formulaciones tradicionales presentan restricciones operativas, como la necesidad de mantener una relación mínima de vapor/carbono, lo que impacta negativamente en el balance energético y económico de las plantas de producción de hidrógeno. Además, su uso implica desafíos relacionados con la formación de subproductos no deseados y los riesgos ambientales y de salud derivados del manejo de cromo hexavalente.

El desarrollo de un catalizador libre de hierro y cromo hexavalente representa una solución innovadora para superar estas limitaciones. Este nuevo enfoque permite ampliar el rango operativo de las plantas de hidrógeno, ofreciendo mayor flexibilidad para optimizar variables críticas que impactan en la eficiencia energética y la capacidad de producción.

En este trabajo se analizan las mejoras potenciales que un catalizador de tecnología disruptiva puede aportar a plantas de hidrógeno de diseño convencional. Se realiza un análisis de sensibilidad de variables operativas, incluyendo el consumo de materia prima, la relación vapor/carbono, el consumo de gas combustible, el duty del reformador y la generación de offgas. Este análisis se basa en datos obtenidos mediante pruebas industriales y simulaciones, lo que permite evaluar el impacto del catalizador en diferentes escenarios operativos.

Además, se presentan datos de referencia industrial que evidencian la estabilidad operativa del catalizador, su mayor actividad catalítica, la simplificación de los procedimientos de puesta en marcha y los beneficios asociados a la operación con relación vapor/carbono inferior a los límites de diseño originales.

El catalizador presentado constituye un avance significativo en la tecnología de HTS, proporcionando una solución técnica sostenible y eficiente para la producción de hidrógeno. Su desempeño basado en evidencia operativa lo posiciona como una alternativa viable para abordar los desafíos actuales de la industria.

Introducción

La producción de hidrógeno a gran escala es un proceso fundamental en la industria energética y petroquímica, siendo clave para la refinación de combustibles, la síntesis de amoníaco y la producción de metanol, entre otros usos industriales. Tradicionalmente, las plantas de hidrógeno han empleado catalizadores de alta temperatura (HTS, por sus siglas en inglés) basados en hierro y cromo para la etapa de conversión de monóxido de carbono (CO) a dióxido de carbono (CO₂), maximizando así la recuperación de hidrógeno a partir del gas de síntesis generado en el reformador.

A pesar de su amplia adopción y robustez operativa, los catalizadores Fe/Cr presentan limitaciones inherentes a su composición y diseño. Entre las restricciones más relevantes se encuentra la necesidad de operar con una relación mínima de vapor a carbono (S/C), lo que condiciona el balance energético de la planta y limita la flexibilidad operativa. Además, el manejo y disposición de catalizadores que contienen cromo hexavalente (Cr⁶⁺) implica riesgos ambientales y de salud, así como desafíos regulatorios cada vez más estrictos a nivel global.

En los últimos años, la industria ha buscado alternativas tecnológicas que permitan superar estas barreras, promoviendo la eficiencia energética, la sostenibilidad y la seguridad operativa. El desarrollo de catalizadores HTS libres de hierro y cromo representa un avance disruptivo en este contexto, ya que posibilita operar a relaciones S/C inferiores a las tradicionalmente permitidas, optimizando el consumo de recursos y la capacidad de producción de hidrógeno.

Este trabajo analiza los beneficios energéticos y de capacidad que ofrece la implementación de un catalizador HTS de nueva generación en plantas de hidrógeno de diseño convencional. Se presentan resultados de pruebas industriales y simulaciones que demuestran el impacto positivo de la mayor flexibilidad operativa sobre variables críticas como el consumo de materia prima, el duty del reformador, la generación de offgas y la eficiencia global del proceso. Asimismo, se discuten los aspectos relacionados con la estabilidad operativa, la simplificación de los procedimientos de puesta en marcha y la reducción de riesgos ambientales asociados al uso de catalizadores sin cromo hexavalente. De este modo, se busca aportar una visión integral sobre el potencial de esta tecnología para la modernización y sostenibilidad de la industria del hidrógeno.

Desarrollo

1. Antecedentes y limitaciones de los catalizadores de HTS tradicionales

La producción de Hidrógeno a escala industrial se puede resumir con el siguiente esquema en plantas modernas convencionales:

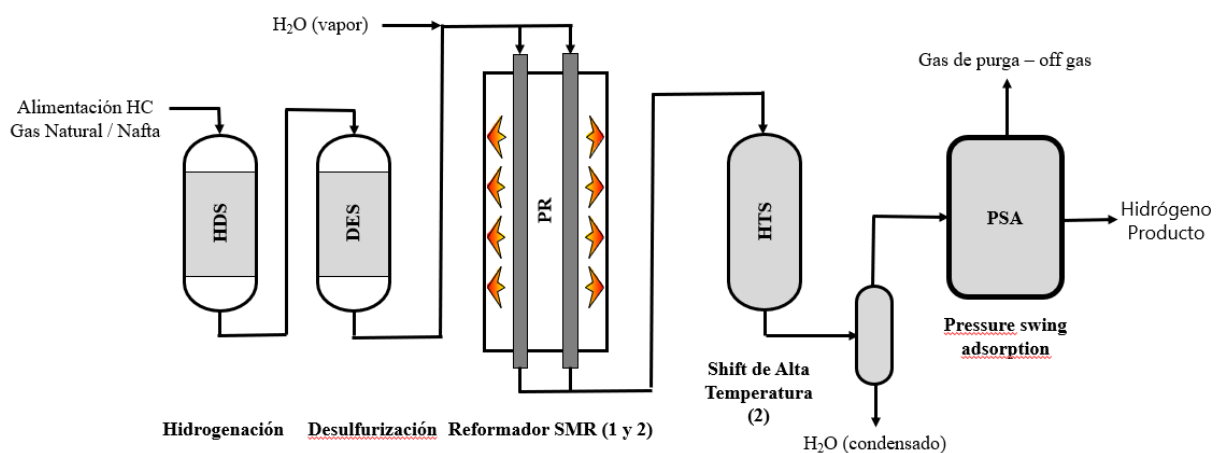
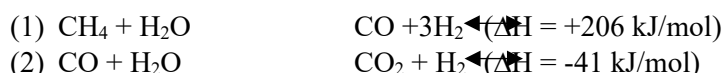


Figura 1. Esquema simplificado de una unidad de producción de Hidrógeno moderna tradicional

Las principales materias primas son vapor de agua y una fuente de hidrocarburo como gas natural, gases de refinería, LPG o nafta. En una primera sección se pretrata o acondiciona la fuente de hidrocarburo de manera de eliminar contaminantes para los catalizadores principales de las etapas siguientes

(principalmente compuestos azufrados, pero también metales, cloro, otros) y saturar olefinas si las hubiere. En las siguientes dos etapas se genera hidrógeno según las siguientes reacciones químicas:



La reacción (1) conocida como reacción de reformación es endotérmica y ocurre en un reactor conocido como horno de reformación.

La reacción (2) de carácter exotérmico es la reacción conocida como reacción de water-gas shift (shift), se trata de la conversión de monóxido de carbono (CO) a dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H₂). Si bien existen, según el diseño de la planta, opciones para llevar a cabo esta reacción a alta, media o baja temperatura (o combinación de ellas) con distinta tecnología de catalizadores, la opción más utilizada en plantas actuales convencionales e históricamente es la de alta temperatura. La reacción de shift de alta temperatura (HTS), es una etapa esencial en la producción de hidrógeno a partir de gas de síntesis. Desde principios del siglo XX, los catalizadores basados en óxidos de hierro y cromo han sido el estándar industrial para esta reacción, debido a su robustez, disponibilidad y desempeño aceptable en condiciones severas de operación.

Sin embargo, a pesar de su larga historia y mejoras incrementales en formulación y operación, los catalizadores Fe/Cr presentan limitaciones inherentes que afectan tanto la eficiencia del proceso como la seguridad y sostenibilidad de las plantas de hidrógeno. Una de las restricciones más significativas es la necesidad de mantener una relación mínima de vapor a carbono (S/C) en el gas de alimentación. Esta condición es necesaria para evitar la formación de carburos y la fragilización y desactivación prematura del catalizador, pero implica un mayor consumo de vapor y energía, afectando negativamente el balance energético y los costos operativos de la planta.

Adicionalmente, la presencia de cromo en la formulación, y en particular la formación de cromo hexavalente (Cr⁶⁺), representa un riesgo ambiental y de salud considerable. El cromo hexavalente es reconocido como carcinógeno y está sujeto a distintas regulaciones a nivel mundial, cada vez más estrictas como la legislación REACH en Europa, que obliga a buscar alternativas libres de este compuesto cuando estén disponibles. Durante la fabricación, manipulación, operación y disposición final de los catalizadores Fe/Cr, existe el riesgo de exposición a Cr⁶⁺, lo que incrementa la complejidad de los procedimientos de seguridad y manejo de residuos peligrosos.

Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de soluciones tecnológicas que permitan operar con mayor flexibilidad, reducir el impacto ambiental y mejorar la seguridad en la producción de hidrógeno. En este contexto, la innovación en catalizadores de HTS se vuelve fundamental para responder a los desafíos actuales y futuros de la industria.

2. Innovación: Catalizador SK-501FLEX™

2.1 Descripción de la tecnología y composición

El catalizador de nueva formulación SK-501 FLEX™ representa una innovación disruptiva en la tecnología de shift de alta temperatura (HTS), al ser el primer catalizador comercial libre de hierro y cromo, basado en una matriz de zinc y aluminio. Esta formulación fue desarrollada para superar las limitaciones de los catalizadores tradicionales, permitiendo operar en condiciones más flexibles y seguras. Desde su introducción industrial en 2014, este catalizador ha sido adoptado por numerosas plantas de hidrógeno y amoníaco, demostrando un desempeño robusto y confiable, como se presentará en el presente trabajo.

En su formulación el nuevo catalizador elimina completamente el uso de cromo, y por tanto, los riesgos asociados a la formación de cromo hexavalente. También, elimina completamente el uso de hierro, y por tanto los riesgos asociados a formación de carburos de hierro y catálisis de subproductos no deseados. Su composición principal incluye más de 30% en peso de zinc (Zn) y más de 20% en peso de aluminio (Al), lo que le confiere estabilidad térmica y alta actividad catalítica en el rango de temperaturas típico de la etapa HTS.

En la tabla a continuación se detalla la composición de un catalizador tradicional típico vs el nuevo catalizador

Catalizador Tradicional	SK-501FLEX™
Fe > 50% p/p Cr > 5% p/p Cr ⁶⁺ 0.02 – 2 p/p Cu (como promotor en ciertos productos) Grafito y oxígeno (metálico)	Zn > 30% p/p Al > 20% p/p Promotores Grafito y oxígeno (metálico)
26 Fe Iron 55.933 24 Cr Chromium 51.996	30 Zn Zinc 65.39 13 Al Aluminum 26.982



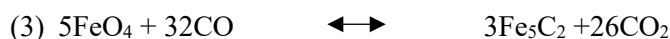
Tabla 1. Comparativa composición catalizadores tradicionales vs SK-501FLEX™

2.2 Ventajas técnicas y operativas

El SK-501 Flex™ permite operar a relaciones vapor/carbono (S/C) inferiores a las tradicionalmente requeridas por los catalizadores Fe/Cr, sin comprometer la estabilidad ni la actividad catalítica. En las unidades de producción de hidrógeno se asocia muy a menudo la relación S/C con la formación de carbono en el catalizador de reformación. Si bien esto es correcto, el análisis no es tan directo. Existen distintos tipos de carbono que se pueden formar sobre este catalizador y afectar así la performance y hasta operabilidad de la unidad, también entran en juego otros factores además del S/C: distribución de calor e intensidad, composición de la carga, etc. Y, por otro lado, con el avance de los catalizadores y tecnologías de reformación también se avanzó hacia condiciones de operación segura sin riesgo de formación de carbono a baja relación S/C, pasando a ser el primer factor limitante la relación vapor/gas seco que llega al reactor de HTS y riesgo de formación de carburo de hierro en estas condiciones sobre este catalizador. Si este límite sobre este último catalizador se elimina, la posibilidad de operar a relaciones S/C en toda la planta es factible.

Esta flexibilidad operativa, para operar a relación S/C más bajas, se traduce en una reducción significativa del consumo de vapor, lo que mejora el balance energético de la planta y puede liberar capacidad adicional en el reformador y otros equipos aguas abajo.

El carburo de hierro se forma a partir del Fe presente en los catalizadores tradicionales cuando la relación vapor/gas disminuye de un cierto nivel según la siguiente reacción:



Estos carburos fragilizan la estructura del catalizador, aumentando el riesgo de ruptura y consecuente incremento de la caída de presión, lo que puede derivar en el remplazo prematuro del catalizador. Por otro lado, son efectivos catalizadores de la exotérmica reacción de metanación y reacciones de Fischer Trops (4):



Como consecuencia, el hidrógeno valioso es consumido y se forman subproductos no deseados que afectan la producción de la unidad. Como se mencionó antes, todos estos riesgos son eliminados con la formulación disruptiva del nuevo catalizador.

Por otro lado, el nuevo catalizador presenta mayor actividad que los tradicionales lo que se traduce en ciclos de mayor duración y posibilidad de operar a temperaturas más bajas, favoreciendo el equilibrio de la reacción de shift (2) hacia menor fuga de CO y mayor producción de Hidrógeno.

Es beneficioso disminuir la temperatura de entrada lo más posible para favorecer el equilibrio hacia más hidrógeno producto, pero en contrapartida a menor temperatura, la cinética de la reacción ocurre más lento y es aquí donde un catalizador de mayor actividad dará el mayor beneficio. La mayor actividad del SK-501 FLEX™ fue demostrada en ensayos de laboratorio y confirmada con referencias industriales que se presentarán luego en el presente trabajo, permitiendo operar a más baja temperatura y aún así cerca del equilibrio.

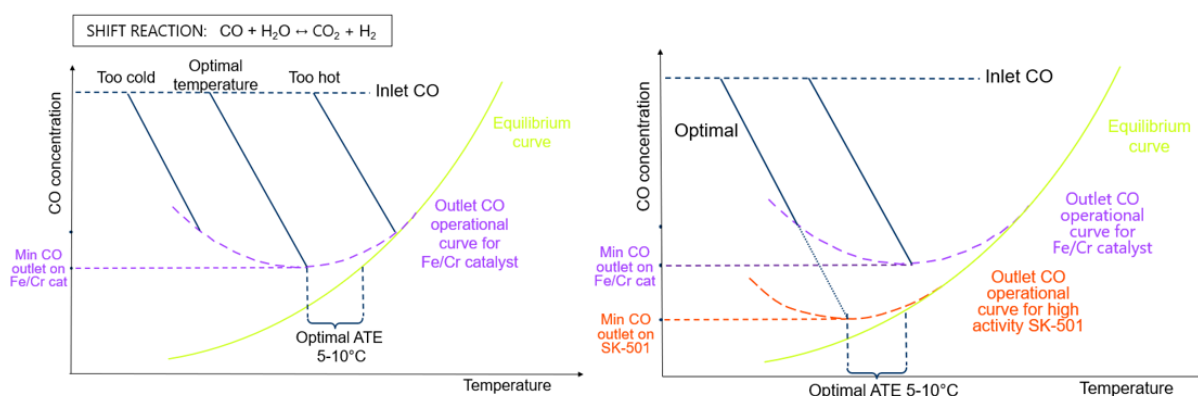


Figura 2. Importancia de un catalizador de alta actividad a baja temperatura para alcanzar baja concentración de CO a la salida del reactor

En la figura anterior se puede observar una comparativa entre un catalizador de menor actividad y uno de mayor actividad que permita aproximarse al equilibrio con menor temperatura de operación, dado el carácter exotérmico de la reacción de shift.

Por último, vale remarcar que el catalizador demostró ser además muy estable permitiendo lograr ciclos más extensos que los catalizadores tradicionales. Esta longevidad reduce la frecuencia de paradas para recambio de catalizador, disminuyendo los costos de mantenimiento y aumentando la disponibilidad de la planta.

2.3 Beneficios ambientales y de seguridad

En la producción de catalizadores tradicionales de HTS con base Fe-Cr no se puede evitar la presencia de pequeñas cantidades de cromo hexavalente (Cr^{6+}) durante el proceso de manufactura y luego durante el manejo y operación del catalizador. Por lo tanto, la única manera de eliminar Cr^{6+} es evitar el uso de cromo en el catalizador.

La eliminación del cromo en la formulación del SK-501 FLEX™ aporta beneficios ambientales y de seguridad significativos. Al no contener cromo hexavalente, se eliminan los riesgos de exposición a un compuesto carcinógeno al personal y el entorno, así como las complicaciones asociadas al manejo, arranque, descarga y disposición final del catalizador. Esto facilita el cumplimiento de normativas ambientales cada vez más estrictas y reduce la generación de residuos peligrosos.

3. Impacto operativo, económico y sustentabilidad. Caso de estudio

La mayor actividad junto con la posibilidad de operar a cualquier relación S/C abre un abanico de posibilidades para plantas existentes.

En plantas que operan al máximo de carga hidráulica, se puede reducir la cantidad de vapor y al mismo tiempo incrementar la alimentación de hidrocarburo a la planta y así aumentar, dentro de ciertos límites sin requerir ninguna otra modificación, la producción de la unidad.

En plantas donde no se necesita mayor producción, se puede lograr la misma producción de manera más eficiente energéticamente, por la mayor actividad del catalizador en sí y el ahorro en generación de vapor. Además, se reduce el consumo de gas combustible y las emisiones, lo que impacta positivamente en los costos operativos y en la huella de carbono del proceso.

A continuación, se presenta un caso de análisis para una planta de Hidrógeno cuyo diseño contempla una relación S/C de 3.45 y el impacto en los principales parámetros al reducir la operación a una relación S/C de 3.0. Se presentarán dos casos: uno a igual producción y otro maximizando la producción alcanzable.

	Caso Base	Caso 1: Igual producción		Caso 2: Incremento de producción
	S/C 3.45	S/C 3.00		S/C 3.00
Alimentación: Gas Natural	29.300 Nm ³ /h	+5,7%		+11.6%
Consumo GN combustible	7.716 Nm ³ /h	-22,7%		-18.3%
Alimentación + Combustible	37.016 Nm ³ /h	-0.23%		+5.3%
Duty Reformador	83,9 Gcal/h	=		+5%
Temperatura tubos reform.	897°C	+2°C		+5°C
GN comb./ comb. Total	13.6%	10.3%		10.3%
Gas alimentación PSA	133.570 Nm ³ /h	+1.4%		+7.0%
Emisiones CO ₂	936 kgCO ₂ / 1.000 Nm ³ H ₂	-0.4%		-0.4%
Producción Hidrógeno	88.388 Nm ³ /h	=		+5.5%
Consumo específico energía ^(*)	3,895 Gcal/ 1.000 Nm ³ H ₂	-0,016		-0.016

Tabla 2. Caso estudio. Impacto reducción relación S/C en planta de Hidrógeno

(*) El consumo específico calculado no contempla un crédito por el vapor adicional. De contemplarse, dependiendo diseño de la planta se podría lograr un ahorro de hasta -0.03 Gcal/ 1.000 Nm³ H₂ lo que representa el 1%.

El caso de mayor producción se planteó de manera de mantener el flujo volumétrico del proceso al reformador y equipos de manera de mantener la pérdida de carga en la unidad. Vale mencionar que para este caso particular, a una relación de 3.0 los catalizadores tradicionales pueden operar, aunque cercano al límite de formación de carburo. El estudio se muestra para analizar el impacto de reducir 0.45 la relación S/C y el impacto sobre los principales parámetros y consumos de la unidad, siendo similares para saltos de igual magnitud en valores menores de S/C donde sólo el catalizador de nueva formulación puede operar sin riesgos.

4. Casos de Estudio Industriales

La adopción del catalizador SK-501 FLEX™ ha sido validada en múltiples instalaciones industriales a nivel global, tanto en plantas de hidrógeno como de amoníaco, bajo diversas condiciones operativas. A continuación, se presentan ejemplos representativos que ilustran los beneficios obtenidos en términos de eficiencia, capacidad y seguridad, manteniendo la confidencialidad de las instalaciones específicas.

4.1 Planta europea de hidrógeno: eficiencia y vida útil extendida

En 2014, una planta europea de hidrógeno implementó el SK-501 FLEX™ con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y reducir la relación S/C de 2.8 a 2.6. El catalizador ha operado de manera

continúa durante más de 10 años, superando la vida útil de los catalizadores Fe/Cr tradicionales, que típicamente alcanzaban 8 años en esta unidad. Además, la planta ha mantenido la producción de hidrógeno sin incidencias operativas, evidenciando la estabilidad y robustez del nuevo catalizador ya por más de 10 años.

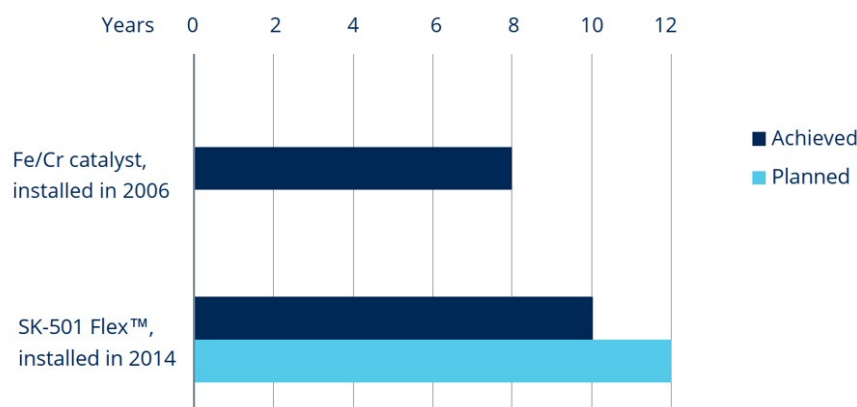


Figura 3. Vida útil del catalizador. Comparación con ciclo de catalizador tradicional previamente instalado

El desempeño del catalizador evidenció una mayor actividad que el catalizador tradicional de Fe/Cr y desactivación reducida y el perfil de temperatura muestra que logra una conversión cercana al equilibrio a temperaturas bajas:

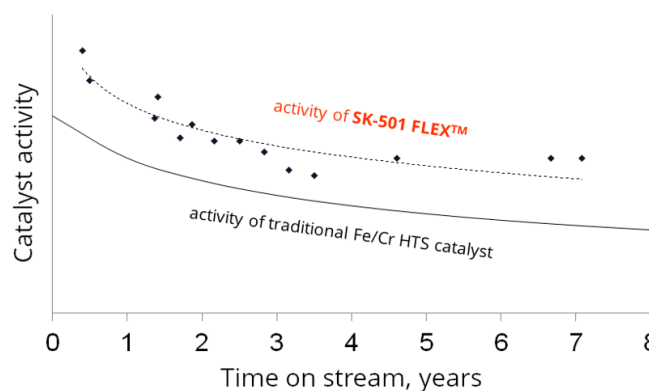


Figura 4. Comparativa actividad del catalizador nuevo vs tradicional

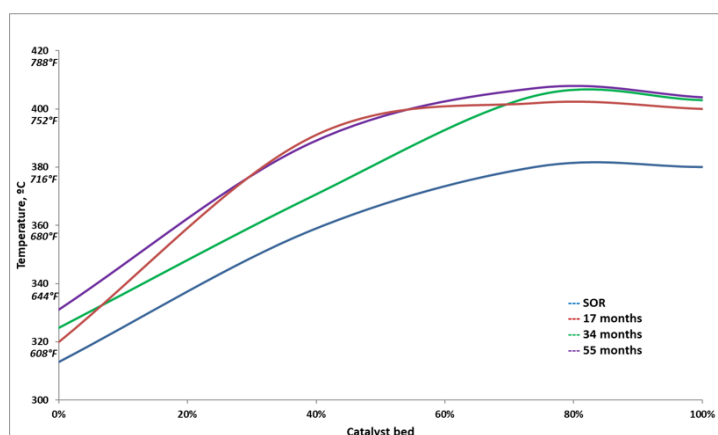


Figura 5. Evolución del perfil de temperatura del nuevo catalizador a lo largo de los primeros 55 meses de corrida

En la figura anterior se ve una temperatura de entrada al inicio del ciclo de 310°C vs 340°C típicamente para catalizadores tradicionales. Por otro lado, el perfil plano alcanzado entre el 70%-100% de lecho es un indicativo que opera cerca del equilibrio aún después de 55 meses de corrida.

4.2 Alta actividad y eficiencia energética por incremento de vapor de exportación

En otra unidad se instaló el nuevo catalizador con el objetivo de reducir la relación S/C. Se logró reducir de 3.4 a 2.8 como puede verse en la siguiente figura, permitiendo incrementar el vapor de exportación para el mismo consumo energético

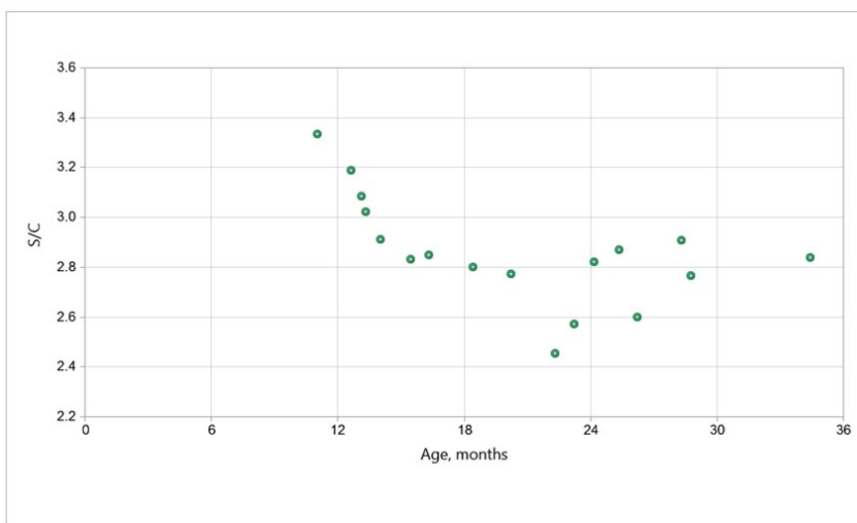


Figura 6. Disminución de relación S/C alcanzada con la instalación de nuevo catalizador

Cabe remarcar que la relación de 2.8 no hubiera sido posible de alcanzar con catalizadores tradicionales sin sufrir consecuencias. El catalizador fue remplazado luego de 6 años, siendo la primera carga en ser remplazado por motivos de agenda de parada de planta. Ensayos realizados al catalizador descargado mostraron una actividad remanente e integridad que confirmaron que el catalizador pudiese haber operado por más años.

En cuanto al desempeño, en las gráficas siguientes se pueden observar una pérdida de carga y fuga de CO estables hasta los 60 meses de operación y a una temperatura de entrada baja sin necesidad de incrementarse.

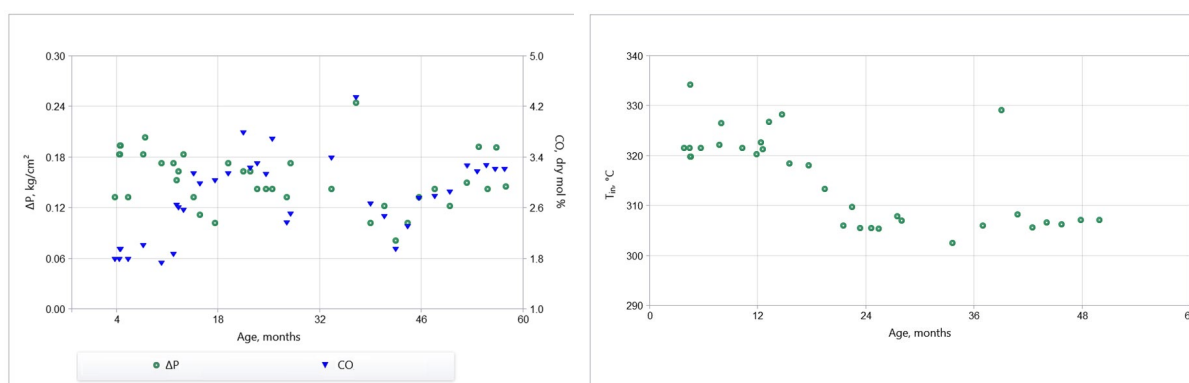


Figura 7. Datos operativos. Pérdida de carga y fuga de CO (izquierda). Temperatura de entrada (derecha)

4.3 Planta industrial: aumento de capacidad y flexibilidad operativa

En otra instalación industrial, la introducción del SK-501 FLEX™ permitió incrementar la capacidad de producción de hidrógeno hasta un 112–115% del diseño original, superando el límite anterior del 108% alcanzado con catalizadores Fe/Cr. Este aumento se logró gracias a la posibilidad de operar a menores relaciones S/C y a la alta actividad catalítica del nuevo catalizador, que permitió reducir la temperatura de entrada al reactor HTS y aumentar el flujo de alimentación.

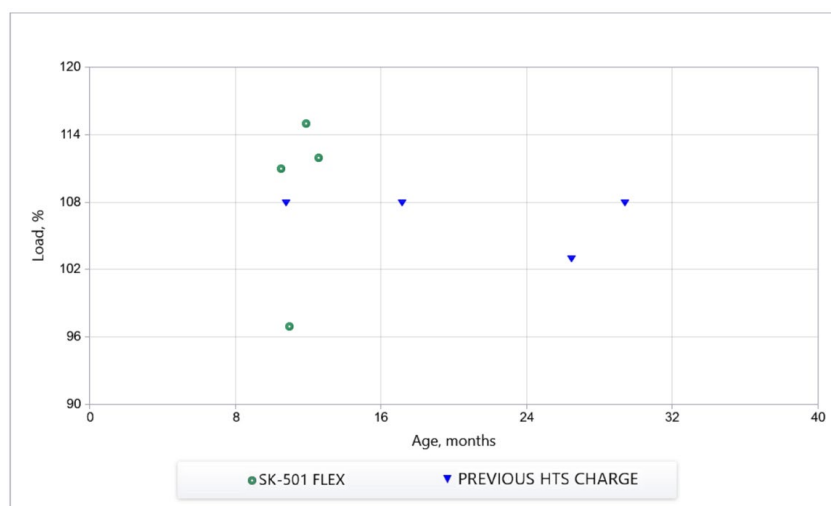


Figura 8. Capacidad de producción de Hidrógeno (% sobre capacidad de diseño)

4.4 Planta de Hidrógeno latinoamericana: beneficios por operación a menor relación S/C

En una planta latinoamericana de producción de hidrógeno, la adopción del nuevo catalizador posibilitó la operación estable con una relación S/C inferior al diseño original, generando ahorros energéticos y permitiendo un aumento en la producción de hidrógeno.

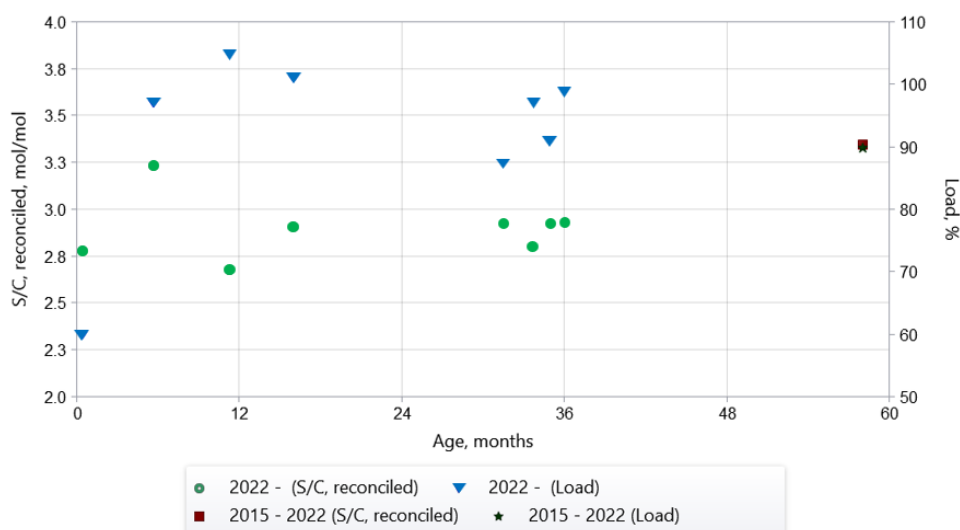


Figura 9. Comparativa relación S/C y producción (load%) de operación con catalizador nuevo (ciclo 2022-actualidad) y catalizador tradicional anterior (ciclo 2015-2022)

Un test run realizado en la unidad realizado a una relación S/C de 2.9 permitió certificar un incremento de la producción de hidrógeno del 5.2% comparado con el diseño de la unidad, una disminución del 9% en el vapor consumido por la unidad y una disminución del consumo específico de energía del 5.8%.

4.5 Puesta en marcha simple y rápida

Para catalizadores convencionales de Fe/Cr, se deben tener presente consideraciones especiales durante el arranque para asegurar que son adecuadamente reducidos manteniendo simultáneamente una relación S/C mínima para evitar la sobre-reducción del Fe y controlando la reducción exotérmica de Cr^{+6} a Cr^{+3} , que consume tiempo y por lo tanto pérdida de producción. Otros catalizadores tradicionales con alto contenido de azufre incluso requieren un proceso de reducción separado para evitar el envenenamiento de catalizadores aguas abajo (caso plantas de amoníaco o plantas de hidrógeno que tengan reactores de shift de baja temperatura, LTS). Estas demoras y precauciones por procedimientos específicos de puesta en marcha no son necesarias para poner en servicio el catalizador SK-501FLEX™ por su composición distinta e innovadora.

La gráfica a continuación muestra una puesta en servicio del nuevo catalizador para una planta de amoníaco en Asia. Se puede observar que la misma es rápida y ocurre en conexión con el calentamiento de la sección de reformación.

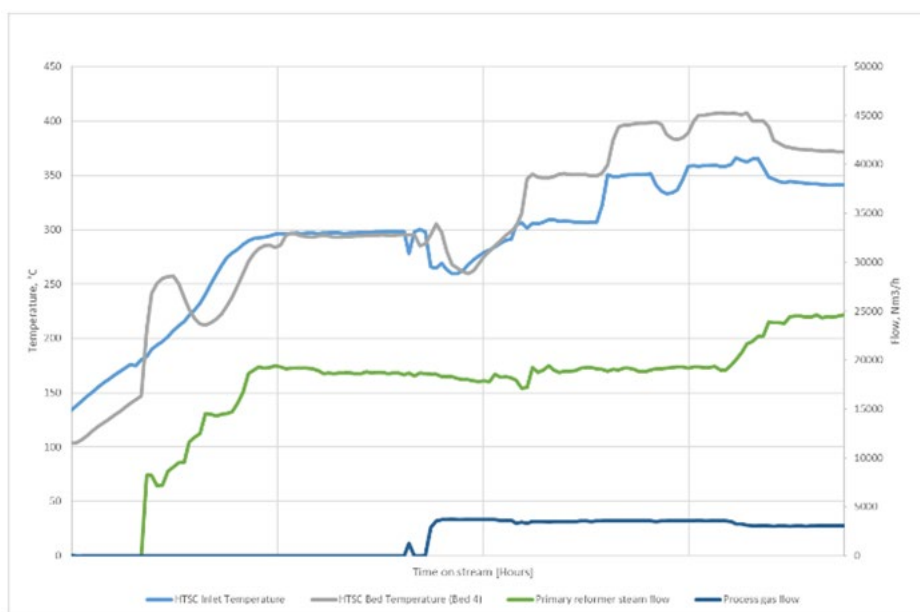


Figura 10. Tendencias de temperatura durante puesta en servicio de SK-501FLEX™ en referencia industrial

Conclusiones

La implementación de catalizadores HTS libres de hierro y cromo, como el SK-501 FLEX™, representa un avance significativo para la industria de producción de hidrógeno y gas de síntesis. La evidencia industrial demuestra que esta tecnología permite operar de manera segura y eficiente a relaciones vapor/carbono inferiores a las tradicionales, optimizando el consumo energético y aumentando la capacidad de producción sin comprometer la estabilidad operativa. Además, la eliminación del cromo hexavalente reduce los riesgos ambientales y de salud, simplificando los procedimientos de manejo y disposición del catalizador. Los casos de estudio presentados confirman que la adopción de esta tecnología no solo responde a los desafíos regulatorios actuales, sino que también aporta beneficios económicos y operativos sostenibles, posicionando al nuevo catalizador como una alternativa robusta y confiable.

Bibliografía

1. “10 years of industrial experiences with iron-chromium free high temperature shift catalyst”. Dmitriy Lipkind, Mads Feddersen. – Nitrogen + Syngas 2024 International Conference & Exhibition.
2. “Breaking frontiers with new innovative developments in high temperature shift catalysts”. Johan Jonsson – Nitrogen + Syngas Conference 2016, Berlin.
3. “Operación de la planta de Hidrógeno a menor relación S/C”. Matías Garios – Taller de intercambio de mejores prácticas en unidades de Hidrógeno, Hydrocracking e Hidroprocesos, Arpel, Barrcancabermeja 2023.
4. “Base de datos operativos de referencias industriales de catalizadores” – Topsoe A/S.

CV del autor

- Matías Garios

Matías Garios es Technical Sales & Service Manager en Topsoe América Latina. Ingeniero Químico, egresado de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina y cuenta con más de 17 años de experiencia profesional. Se desarrolló en la industria de refinación y petroquímica como ingeniero de procesos y operaciones en YPF y Petrobras Argentina. En Topsoe cuenta con más de 8 años de experiencia como Ingeniero de Servicio Técnico, brindando soporte a plantas de gas de síntesis, hidrógeno, metanol y amoníaco. Desde 2022 lidera el equipo de Servicio Técnico para las áreas de Refinación, Químicos y Ácido Sulfúrico en América Latina.