FCCSA

Momento Técnico

ARTÍCULO

V-KETCH™ – Tecnología para la Captura de Vanadio en Unidades de FCC

V-KETCH™



NOVIEMBRE
2026

V-KETCH™ – Tecnología para la Captura de Vanadio en Unidades de FCC



Tiago Coelho
Consultor de Estrategia e Inteligencia de Mercado
FCCSA

1. Introducción

Los contaminantes metálicos como el níquel (Ni), vanadio (V) y el hierro (Fe) están presentes en diferentes concentraciones en los petróleos crudos. La deposición de estos metales sobre el catalizador de FCC es inevitable durante el craqueo catalítico y se intensifica con el procesamiento de corrientes residuales (gasóleo de vacío residual, residuo atmosférico). El mecanismo de desactivación y el impacto operacional de cada contaminante son diferentes.

El vanadio se destaca como el contaminante de mayor impacto sobre la actividad catalítica en operaciones con cargas residuales. Diferente del hierro y del níquel, que se depositan predominantemente sobre la superficie externa de las partículas del catalizador, el vanadio presenta una alta movilidad en el ambiente oxidante del regenerador e interactúa directamente con la zeolita Y, el componente catalítico responsable de la mayor parte de la actividad de craqueo. Como resultado, se produce la destrucción progresiva e irreversible de la estructura zeolítica, con reducción del área específica, la cristalinidad y la densidad de los sitios ácidos de Brønsted [1, 2].

La base de datos de FCCSA y Ketjen evidencia un crecimiento consistente del contenido relativo de vanadio en los catalizadores de equilibrio (Ecat) monitoreados durante los últimos cinco años, como reflejo de la tendencia de las refinerías a procesar corrientes cada vez más pesadas y contaminadas. Comprender el mecanismo de acción del vanadio y desarrollar soluciones catalíticas eficaces para su control constituyen requisitos técnicos fundamentales para la operación rentable de las unidades de FCC que procesan cargas residuales desafiantes.

NOVIEMBRE
2026

2. Distribución del vanadio en la partícula del catalizador

Los análisis de tomografía por microfluorescencia de rayos X en Ecats con alta concentración de contaminantes metálicos revelan que el calcio y el hierro se concentran predominantemente en la superficie externa de las partículas catalíticas[3]. Estos elementos se depositan en la región periférica y, en conjunto, comprometen el acceso a la estructura interna de la partícula y las propiedades de fluidización del catalizador.

El vanadio presenta un comportamiento fundamentalmente diferente. En el regenerador, bajo condiciones oxidantes y a temperaturas entre 690 y 750 °C, el vanadio se oxida al estado pentavalente (V^{5+}), formando pentóxido de vanadio (V_2O_5). Este compuesto posee un punto de fusión de 690 °C, valor que normalmente es inferior a las temperaturas de operación del regenerador de FCC, lo que le confiere una elevada movilidad en estado fundido. Como resultado, el vanadio penetra en el interior de la partícula catalítica y alcanza la zeolita Y, como se demuestra en diferentes estudios reportados en la literatura mediante análisis de EDS y tomografía de fluorescencia de rayos X en secciones transversales de partículas de Ecat [3].

Esta movilidad intrínseca, ausente en los demás contaminantes metálicos, es el principal factor responsable del carácter destructivo diferenciado del vanadio sobre la actividad catalítica de la unidad.

3. Como el vanadio acelera la degradación de la zeolita

Durante la operación de una unidad de FCC, la zeolita Y sufre un envejecimiento natural debido a las severas condiciones de temperatura y vapor presentes en el regenerador. Sin embargo, cuando se produce la deposición del vanadio en el catalizador, este proceso de degradación se acelera significativamente.

Aunque las especies ácidas de vanadio puedan interactuar con la estructura de la zeolita y contribuir a su destrucción (mediante la eliminación de aluminio de la red), las evidencias experimentales muestran que el principal mecanismo de desactivación en los catalizadores comerciales de FCC está relacionado con la interacción entre el vanadio y sodio[4,5].

El principal efecto del vanadio sobre la zeolita no se produce por un ataque directo a la estructura cristalina, sino por la movilización de parte del sodio presente en el catalizador, favoreciendo la formación de hidróxido de sodio (NaOH). El NaOH es una especie altamente alcalina que ataca los enlaces Si–O de la estructura de la zeolita, promoviendo la pérdida de cristalinidad, la reducción del área específica y la disminución de la actividad catalítica de la zeolita [4].

Esta interacción explica por qué las refinerías que procesan cargas con mayor contaminación por sodio suelen presentar una desactivación más intensa del catalizador, incluso operando con contenidos similares de vanadio en el Ecat. El sodio puede incorporarse a la unidad como consecuencia de una desalación ineficiente, la contaminación de corrientes o el procesamiento de petróleos con alto contenido de sales.

4. Efecto adicional: actividad de deshidrogenación

Además de la destrucción de la zeolita, el vanadio en su estado oxidado (+5) actúa como catalizador de reacciones de deshidrogenación, lo que provoca un aumento del rendimiento de hidrógeno y del delta coque en el *riser*. Estos efectos pueden imponer restricciones operacionales relacionadas con la capacidad del sistema de gas húmedo, elevar la temperatura del regenerador y reducir la producción de productos líquidos de mayor valor comercial [6].

La actividad de deshidrogenación del vanadio aumenta con su grado de oxidación: el V^{5+} es más activo que el V^{4+}. En consecuencia, este efecto es más pronunciado en las unidades que operan en modo de combustión completa (full burn), en las que el inventario de catalizador circula bajo condiciones más oxidantes y el vanadio se encuentra predominantemente en el estado pentavalente.

La combinación de ambos mecanismos, la aceleración de la destrucción de la zeolita y la deshidrogenación, fundamenta el monitoreo activo del vanadio y del sodio como una prioridad técnica en las refinerías que procesan cargas residuales con elevado contenido metálico.

5. Diagnóstico y monitoreo del impacto del vanadio en el Ecat

El seguimiento sistemático del impacto del vanadio sobre el catalizador requiere el análisis de cuatro dimensiones complementarias del Ecat:

- **Contenido de metales:**

El análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) permite determinar con precisión los contenidos de vanadio y sodio presentes en el ECAT. El monitoreo continuo de estos elementos proporciona informaciones sobre la acumulación de contaminantes en el inventario catalítico y sirve de base para correlacionar el nivel de metales con la pérdida de desempeño del catalizador a lo largo del tiempo.

- **Integridad estructural de la zeolita:**

La difracción de rayos X (DRX) cuantifica la cristalinidad relativa del catalizador con respecto al catalizador fresco. Las reducciones progresivas del índice de cristalinidad indican la destrucción de la red zeolítica. El seguimiento de la retención de cristalinidad en función de la acumulación de vanadio en el Ecat permite un diagnóstico temprano de la desactivación y la estimación de la tasa de degradación del inventario.

- **Integridad del sistema de poros:**

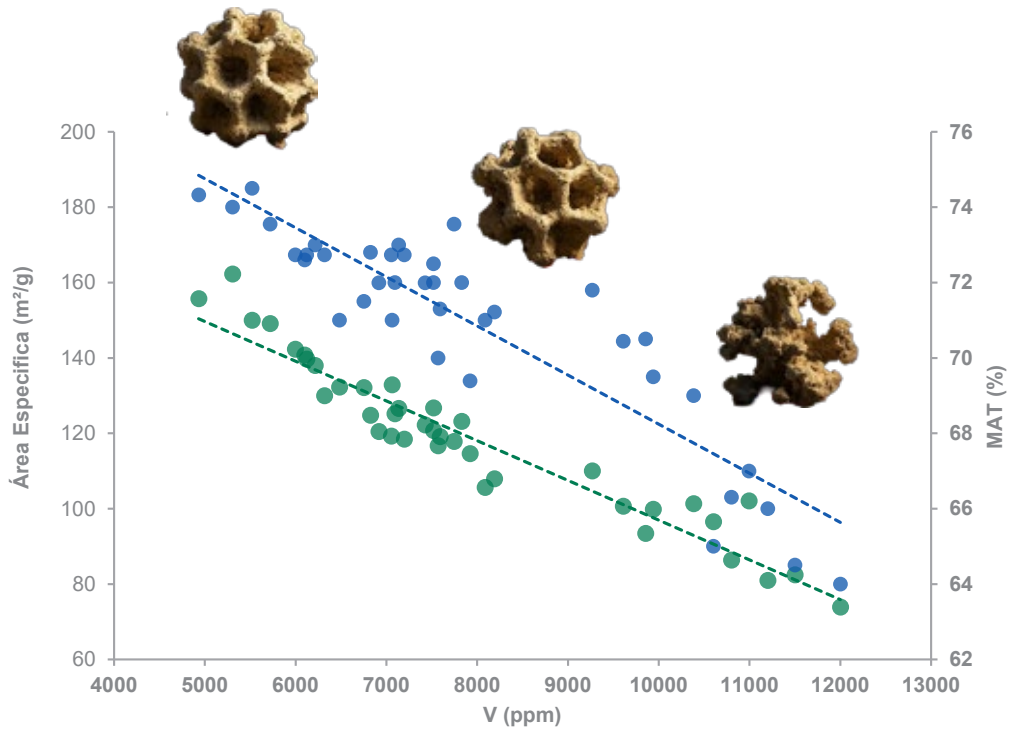
El análisis de fisisorción de N_2 permite determinar el área específica total y, mediante un tratamiento analítico, el área de zeolita (ZSA). La disminución del área específica es uno de los indicadores más sensibles de la desactivación por vanadio, en particular de la pérdida de microporosidad zeolítica. La correlación entre el incremento del contenido de vanadio en el Ecat y la reducción de ZSA constituye una herramienta de diagnóstico de alto valor operacional.

- **Actividad y selectividad catalítica:**

Los ensayos que analizan el desempeño del catalizador (MAT, ACE o FST) también pueden utilizarse como herramienta complementaria para el monitoreo del impacto del vanadio en la unidad. Estos ensayos traducen las alteraciones estructurales del Ecat en un impacto directo sobre los rendimientos de los productos. El seguimiento periódico de la actividad catalítica en función del contenido de vanadio en el Ecat, integrado con los análisis de DRX y fisisorción de N2, permite identificar de forma anticipada tendencias de desactivación antes de que sean perceptibles y/o significativas en los rendimientos de la unidad comercial.

Los datos de FCCSA indican que, en catalizadores sin mecanismos específicos de protección contra el vanadio, el área específica disminuye de aproximadamente 200 m²/g para valores inferiores a 80 m²/g a medida que la concentración de vanadio en el Ecat aumenta de 4.000 para 12.000 ppm. En ese mismo intervalo, la actividad MAT presenta un comportamiento similar, reduciéndose de alrededor del 74% a aproximadamente 63% (Figura 1). Esta pérdida de desempeño está asociada al colapso progresivo de la estructura zeolítica provocado por la interacción del vanadio y el sodio con la rede cristalina, fenómeno que también se esquematiza en la Figura 1.

Figura 1. Efecto del aumento de la concentración de vanadio bajo las propiedades físico químicas de un catalizador de FCC sin mecanismo específico de pasivación de vanadio.



Fuente: Banco de datos de FCCSA

Reducciones de esta magnitud se traducen en una pérdida de conversión, elevación de fondos y una disminución de gasolina en la unidad comercial, y con frecuencia se confunden con variaciones de calidad de carga cuando el monitoreo analítico del Ecat no se lleva a cabo de manera rigurosa y sistemática.

6. Solución: V-KETCH™ - Trampa de vanadio

La estrategia catalítica para mitigar la desactivación por vanadio consiste en incorporar al catalizador componentes capaces de reaccionar con el vanadio, inmovilizándolo antes de que se produzca la formación de ácido vanádico y la subsecuente secuencia de reacciones con el sodio.

6.1. Limitaciones de las trampas convencionales a base de óxidos alcalinotérreos

Existen en el mercado de trampas de vanadio que emplean óxidos de metales alcalinotérreos, como CaO y MgO, como sitios reactivos para la pasivación del vanadio. Sin embargo, estos óxidos presentan una reacción competitiva que limita su eficacia operacional: los SOx presentes en el regenerador de FCC reaccionan preferencialmente con el CaO o el MgO, sulfatándolos antes de que puedan reaccionar con el vanadio.

Los cálculos termodinámicos indican que el orden de preferencia de sulfatación entre los óxidos comúnmente utilizados como trampas es el siguiente, del más al menos reactivo frente a los SOx: Ba > Ca > Mg > óxidos de tierras raras. Por lo tanto, los óxidos de tierras raras son los más tolerantes a la presencia de SOx en las condiciones del regenerador, preservando su capacidad de reaccionar con el vanadio incluso en unidades que procesan cargas con alto contenido de azufre.

6.2. Mecanismo de pasivación por óxidos de tierras raras

La tecnología V-KETCH™ desarrollada por Ketjen en colaboración con FCCSA, consiste en una trampa de vanadio que incorpora óxidos de tierras raras (TR2O3) en la matriz del catalizador. La reacción de pasivación puede describirse mediante:

$$V_2O_5 + TR_2O_3 \leftrightarrows 2TRVO_4$$

Los vanadatos de tierras raras ($TRVO_4$) formados son compuestos termodinámicamente estables bajo las condiciones del regenerador. La inmovilización del vanadio en la fase matricial reduce drásticamente su movilidad hacia la zeolita.

La ubicación de las tierras raras en la matriz del catalizador, y no exclusivamente asociados a la zeolita, es fundamental para la efectividad del mecanismo de protección. Al incorporarse en la matriz, los óxidos de tierras raras quedan disponibles para reaccionar con el vanadio inmediatamente después de su ingreso a la partícula, en la región periférica, antes que el vanadio alcance la zeolita.

La trampa de vanadio también ejerce un efecto sobre la actividad de deshidrogenación: al inmovilizar el vanadio en la forma de vanadato de tierra rara, la tecnología V-KETCH™ reduce la concentración de vanadio activo disponible para las reacciones de deshidrogenación en el *riser*, contribuyendo a menores rendimientos de hidrógeno y a menor formación de coque.

7. Evidencias de la eficiencia de la trampa de vanadio V-KETCH™

7.1. Preservación estructural: área de zeolita y cristalinidad

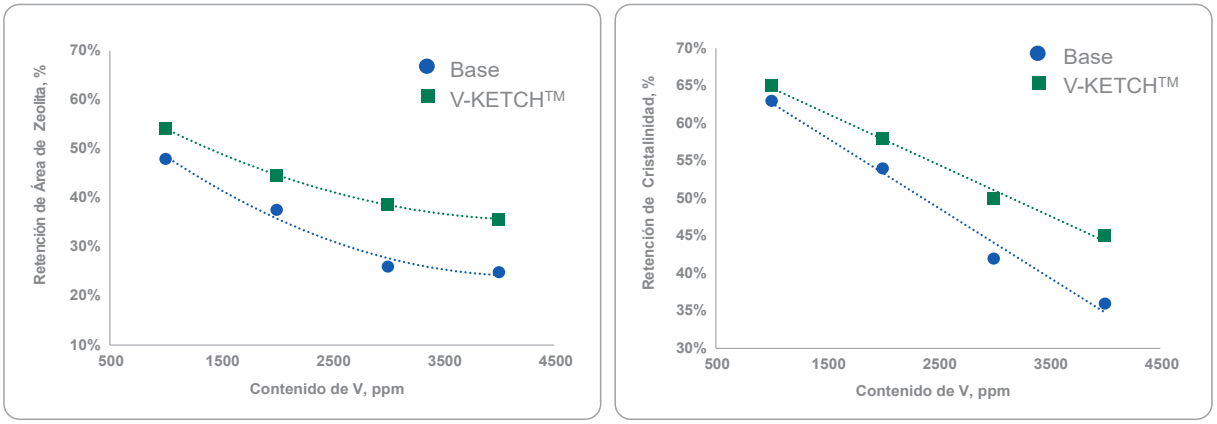
La evaluación comparativa entre catalizadores con y sin trampa de vanadio (Figura 2), sometidos en laboratorio a niveles crecientes de contaminación por vanadio, demuestra una preservación estructural consistentemente superior en los sistemas con V-Trap.

En el intervalo de 1000 ppm a 4.000 ppm de vanadio, el catalizador base retiene entre el 48% y el 28% del área original de zeolita, mientras que el catalizador con V-Trap mantiene el 54% y el 38% en las mismas condiciones, respectivamente. La diferencia entre el catalizador base y el catalizador con trampa es mayor a niveles más elevados de vanadio, precisamente cuando la acción del vanadio es más perjudicial para el catalizador y resulta posible comprobar el efecto de la trampa en la protección de la zeolita.

La retención de cristalinidad sigue una tendencia análoga (Figura 2): en el mismo intervalo de contaminación, el catalizador base presenta entre el 63% y el 36% de cristalinidad relativa con respecto al catalizador virgen, contra 65% al 45% para el sistema con V-Trap.

La mayor preservación del área de zeolita y de la cristalinidad se traduce en el mantenimiento de una mayor densidad de sitios ácidos activos en el inventario de Ecat, con un impacto directo sobre la actividad de craqueo y los rendimientos de la unidad. En términos prácticos, un catalizador que presenta una mayor retención del área de zeolita bajo condiciones de alta contaminación por metales evita que la refinería tenga que aplicar incrementos elevados en la tasa de reposición de catalizador para ajustar la calidad del inventario durante el procesamiento de cargas más contaminadas, sin impactos significativos en el costo operativo de la unidad.

Figura 2. Evidencias de la eficiencia de la trampa de vanadio: preservación de la estructura y sistema de poros de la zeolita en diferentes niveles de vanadio en el catalizador.



Fuente: Banco de datos de FCCSA

7.2. Actividad y selectividad: ensayos ACE en condición de isocoque

Las evaluaciones comparativas (Tabla 1) demostraron que V-KETCH™ preserva de manera más eficiente la actividad catalítica durante la desactivación, resultando en mayores niveles de conversión y rendimiento de gasolina, así como una menor producción de fondos en comparación con el catalizador base. Este comportamiento está directamente relacionado con la mayor preservación de la estructura cristalina de la zeolita, como se discutió en la Figura 2.

Los resultados se presentan de forma consolidada en la Tabla 1.

Parámetro	V-KETCH™ (1)	V-KETCH™ (2)
Conversión (%m/m)	+3,6	+7,0
Gas Seco (%m/m)	−0,08	−0,03
Propileno (%m/m)	+0,28	+0,30
Olefinas C_4 (%m/m)	+0,4	+0,3
Gasolina (%m/m)	+2,5	+2,9
LCO (%m/m)	+0,5	+0,7
Fondos (%m/m)	−4,1	−5,2
GLP (%m/m)	+0,7	+1,4

Tabla 1: Evaluación comparativa de desempeño entre el catalizador base y las formulaciones V-KETCH™ (1) y V-KETCH™ (2). Los resultados fueron obtenidos bajo las mismas condiciones experimentales

Para un mismo nivel de generación de coque, los catalizadores con trampa de vanadio presentan una conversión significativamente superior (+3,6 a +7,0 p.p.), con incremento de gasolina (+2,5 a +2,9 p.p.) y una reducción significativa de fondos (−4,1 a −5,2 p.p.). El rendimiento de gas seco permanece prácticamente inalterado, lo que indica que la mejora en la conversión es atribuible al craqueo de las moléculas pesadas de los fondos y no a la intensificación de las reacciones de deshidrogenación o de craqueo térmico.

Consideraciones Finales

El vanadio representa uno de los principales desafíos para los catalizadores de FCC. Su capacidad para migrar hacia el interior de la partícula y promover reacciones que destruyen la integridad de la zeolita resulta en pérdida de desempeño para la refinería.

La trampa de vanadio V-KETCH™, basada en óxidos de tierras raras incorporados a la matriz del catalizador, actúa directamente sobre este mecanismo de desactivación. Su superior tolerancia termodinámica a los SOx, con relación a las trampas convencionales basadas en óxidos alcalinotérreos, constituye una ventaja técnica relevante para las refinerías que procesan cargas con alto contenido de azufre. Los resultados de laboratorio presentados demuestran mejoras consistentes en actividad, conversión y rendimiento de productos de mayor valor agregado.

Las recomendaciones prácticas para las refinerías que operan con niveles crecientes de vanadio en el Ecat son:

- Implementar un monitoreo sistemático: cristalinidad (DRX), el área específica de zeolita (Fisisorción de N2) y la actividad catalítica (MAT/ACE), en función del contenido de vanadio en el Ecat (FRX), con una frecuencia suficiente para identificar tendencias de desactivación antes de que se manifiesten de forma significativa en los rendimientos de la unidad comercial.
- Evaluar el contenido de sodio disponible en el Ecat (FRX). En unidades con un control deficiente del sodio, la desactivación por vanadio será proporcionalmente más intensa de lo que el contenido de vanadio en el Ecat indicaría por sí solo.
- Adoptar catalizadores con trampa de vanadio (V-KETCH™) como medida preventiva en operaciones con cargas altamente contaminadas con vanadio, antes de que la acumulación en el Ecat alcance niveles críticos de desactivación, evitando que la respuesta operacional se limite al incremento de la tasa de reposición de catalizador.

El equipo de Servicios Técnicos de FCCSA está a su disposición para apoyar el análisis del perfil de desactivación del Ecat e identificar la tecnología catalítica más adecuada para las condiciones operativas de cada unidad.

Referencias:

1. Vogt, E. T. C.; Weckhuysen, B. M. Fluid Catalytic Cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis. Chem. Soc. Rev., 2015, 44, 7342-7370.
2. Sadeghbeigi, R. Fluid Catalytic Cracking Handbook: An Expert Guide to the Practical Operation, Design, and Optimization of FCC Units. 4th ed. Elsevier, 2012.
3. Meirer, F.; Morris, D. T.; Kalirai, S.; Liu, Y.; Andrews, J. C.; Weckhuysen, B. M. Mapping metals incorporation of a whole single catalyst particle using element specific X-ray nanotomography. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137, 102-105.
4. Xu, M.; Liu, X.; Madon, R. J. Pathways for Y Zeolite Destruction: The Role of Sodium and Vanadium. Journal of Catalysis, 2002, 207, 237-246.
5. Pine, L. A. Vanadium-catalyzed destruction of USY zeolites. Journal of Catalysis, 1990, 125, 514-524.
6. Souza, N. L. A.; Tkach, I.; Morgado Jr., E.; Krambrock, K. Vanadium poisoning of FCC catalysts: a quantitative analysis of impregnated and real equilibrium catalysts. Applied Catalysis A: General, 2018, 560, 206-214.

CONOZCA NUESTRO ESPECIALISTA

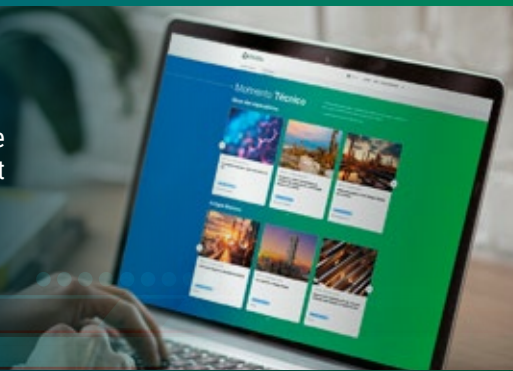


Tiago Coelho
Consultor de Estrategia e Inteligencia de Mercado

Químico Industrial, doctor en Catálisis por la UFRJ, con más de 13 años de experiencia en catálisis y procesos catalíticos. Se desempeña como Consultor Técnico en FCCSA, liderando proyectos de desarrollo de catalizadores para unidades de FCC, además de iniciativas de diversificación de portafolio. Cuenta con experiencia en diferentes laboratorios de catálisis de la Université de Strasbourg y University of Calgary. Es autor de 12 artículos científicos y 2 capítulos de libros.

Conozca nuestro Momento Técnico

Dentro del Portal **FCC Connect, Momento Técnico** es la línea editorial que reúne sugerencias operacionales de nuestros especialistas, estudios, resultados de test en unidades de FCC, soluciones catalíticas inovadoras, y mucho más.



HAGA CLICK



Sobre FCCSA

FCCSA es una empresa de tecnología de punta, con su oficina central en Río de Janeiro, formada por la unión de las empresas Petrobras S.A. y Ketjen. Única fabricante de catalizadores de craqueo catalítico y aditivos para el refino de petróleo en el mercado sudamericano.

FCCSA

www.fccsa.com.br

Para más informaciones, entre en contacto con el equipo de Servicios Técnicos de FCCSA

Rua Nelson da Silva, 663 - Distrito Industrial de Santa Cruz
CEP: 23565-160 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil