



Impacto del Control de la Razón Vapor/Carbono

en la confiabilidad del reformador y su relación con el daño por metal dusting aguas abajo

Documento técnico
Preparado por Oscar Olatte

Sumario: la razón vapor/carbono (S/C) debe controlarse como variable de proceso y, al mismo tiempo, como variable de integridad mecánica. Una S/C insuficiente favorece la formación de carbono en el catalizador, mayor severidad térmica del reformador y una atmósfera más carburizante en la descarga, lo que puede contribuir al riesgo de ataque por metal dusting en componentes aguas abajo.

28 de marzo de 2026

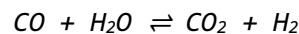
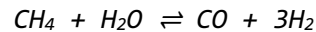
1. Introducción

En los reformadores primarios de vapor, el control de la razón vapor/carbono (S/C) es una de las variables operacionales de mayor influencia sobre la conversión, la estabilidad del catalizador, la transferencia de calor y la vida útil de los tubos. Aunque muchas veces se interpreta sólo como una variable de proceso, en la práctica su control tiene impacto directo en la confiabilidad del horno y en la condición del gas de síntesis que abandona el reformador.

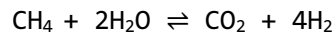
Cuando la razón S/C cae por debajo del rango recomendado de operación, aumenta la tendencia a deposición de carbono sobre el catalizador de níquel. Esto puede generar pérdida de actividad (desactivación / bloqueo de sitios / obstrucción del lecho), aumento de la caída de presión, desbalance térmico y, en último término, incremento de la temperatura de pared de los tubos. Aguas abajo, una composición de gas más carburizante puede contribuir a condiciones favorables para metal dusting, especialmente si existen zonas con enfriamiento local o metales expuestos al rango crítico de temperatura.

2. Reacciones relevantes y definición de la razón S/C

Las reacciones principales que gobiernan el comportamiento del reformador son la reformación con vapor y la reacción de desplazamiento gas-agua (shift). En una formulación simplificada, pueden expresarse como sigue:



En general:



En forma general, la razón vapor/carbono puede expresarse como:

$$S/C = (\text{moles de vapor (agua) alimentados}) / (\text{moles de átomos de carbono (metano) en la alimentación})$$

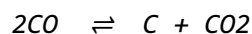
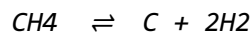
Si la alimentación se aproxima a metano puro, una forma simplificada es:

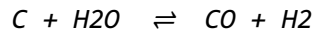
$$S/C \approx n(H_2O) / n(CH_4)$$

3. Impacto de la razón S/C en la formación de carbono

La función más inmediata del vapor adicional es disminuir la tendencia termodinámica y cinética a la formación de carbono. Cuando la S/C es baja, ciertas reacciones de deposición de carbono pueden avanzar con mayor facilidad, en especial en zonas con mala distribución de flujo, puntos calientes, mala mezcla o pérdida local de actividad del catalizador.

Las reacciones más importantes asociadas con la formación o remoción de carbono son las siguientes:





En términos conceptuales, la condición riesgosa puede resumirse así:

*S/C baja → mayor tendencia a formar carbono → pérdida de actividad del catalizador
→ mayor severidad térmica (Los tubos operan a mayor temperatura)*

4. Consecuencias sobre la confiabilidad del reformador

La pérdida de margen de temperatura o factor de seguridad, frente a formación de carbono no es sólo un problema químico. La secuencia habitual para la confiabilidad de los componentes del horno es: menor S/C, mayor riesgo de coque, pérdida de actividad del catalizador, necesidad de elevar la severidad térmica para mantener conversión, incremento de temperatura de pared y aceleración del daño por creep dado que el esfuerzo de anillo se mantiene.

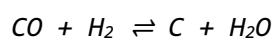
En términos de operación, una deposición de carbono sostenida o recurrente puede producir flujo no o informe a través de los tubos lo que afecta la presión de tubo a tubo, incremento de la caída de presión del sistema (tubos “tapados”), alteración de perfiles térmicos y mayor sensibilidad frente a transcientes (paradas, trips, cambios operacionales, puestas en servicio). Esto reduce la estabilidad operacional y aumenta la probabilidad de fallas prematuras en tubos, pigtails, fittings, cabezales de salida y componentes asociados.

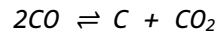
La siguiente tabla muestra un resumen:

Variable	Efecto inmediato	Impacto en confiabilidad
S/C insuficiente	Mayor tendencia a coque (carbón)	Menor margen operacional y mayor probabilidad de desvíos – Baja confiabilidad
Coque en catalizador	Pérdida de actividad y aumento de ΔP – Tubos con menos flujo.	Menor estabilidad de operación y mayor exigencia del sistema – Baja confiabilidad
Compensación con mayor firing	Aumento de T de pared – Alto riesgo en caso de problemas con los quemadores o distribución del flue gas.	Aceleración del creep y reducción de vida remanente – Fallas, altos costos de reparación, baja producción.
Desuniformidad térmica – Alto ΔT dentro de la caja radiante	Tubos operando con distinta severidad	Mayor dispersión de daño y aumento de riesgo de falla localizada

5. Relación entre la composición del gas y el metal dusting aguas abajo

El metal dusting es un mecanismo severo de degradación que puede afectar componentes metálicos expuestos a gases con alta actividad de carbono. En sistemas de síntesis asociados a reformadores, el riesgo aparece cuando coinciden una atmósfera carburizante y una temperatura metálica dentro de un rango susceptible, normalmente entre 450°C y 850 °C. De forma simplificada, pueden representarse las siguientes reacciones:





La última reacción conocida como reacción de Buduard. La reacción de Boudouard depende principalmente de la actividad de CO y de las condiciones termodinámicas; en cambio, el vapor tiende en general a contrarrestar la deposición de carbono al favorecer su gasificación.

Una manera útil de interpretar el riesgo es mediante la actividad de carbono, a_c . Cuando $a_c > 1$, existe potencial termodinámico para precipitación de carbono sólido. Si la superficie metálica se encuentra además en el rango crítico de temperatura ya mencionado, el sistema puede volverse susceptible al ataque por metal dusting, una forma de carburización que “desintegra” el metal.

6. Cómo una S/C deficiente puede agravar el riesgo aguas abajo

Un mal control de la S/C no significa automáticamente que ocurrirá ataque por metal dusting aguas abajo del reformador, pero sí puede aumentar la severidad del ambiente gaseoso. Al reducirse el contenido de vapor y aumentar el potencial carburizante relativo del gas, la actividad de carbono puede acercarse o superar valores críticos en ciertos puntos del sistema.

El problema se vuelve más serio cuando existen enfriamientos locales, pérdidas de aislación, puntos fríos, cambios de geometría, soldaduras heterogéneas o zonas de recirculación; por ejemplo el extremo inferior de algunos diseños de tubos cuando el pigtail de salida está localizado muy arriba. En esos lugares, un gas que en promedio parece aceptable puede transformarse localmente en un medio muy agresivo para el metal.

7. Efectos del metal dusting sobre confiabilidad

Desde la perspectiva de integridad mecánica, el metal dusting puede producir picaduras profundas, pérdida localizada de espesor, generación de polvo metálico-carbonoso y, eventualmente, perforación. A diferencia de una corrosión uniforme lenta, se trata de un mecanismo capaz de provocar falla rápida y paradas no programadas.

Por ello, en equipos aguas abajo del reformador — por ejemplo, pigtails fríos, headers, líneas de descarga, entradas a intercambiadores o equipos de recuperación de calor (WHBs) — el riesgo debe ser evaluado no sólo por el material y la temperatura, sino también por la composición real del gas en servicio, transientes y condiciones locales de operación.

metal dusting → wastage localizado → fuga → paro no programado

8. Comentarios prácticos para operación y confiabilidad

Desde una mirada práctica, el control de la razón S/C debe formar parte de la estrategia de confiabilidad del reformador. No basta con cumplir un valor promedio diario; se requiere verificar estabilidad, distribución, exactitud de medición de vapor, respuesta del sistema en cambios de carga y control durante arranques o desvíos operacionales. La ubicación, calibración y frecuencia de la lectura de los instrumentos es vital en este caso.

Asimismo, cuando existen antecedentes de ataque por metal dusting aguas abajo, conviene revisar si han ocurrido excursiones de S/C, variaciones de firing, pérdidas de aislación, zonas con enfriamiento

localizado o cambios de régimen que hayan incrementado la actividad de carbono del gas. En otras palabras, la confiabilidad del reformador y la integridad del sistema de salida deben analizarse como un solo problema integrado.

Existen soluciones tanto operativas como de diseño y materiales que pueden ser útiles para resolver los potenciales problemas por ataque por Metal Dusting.

9. Conclusión

La razón vapor/carbono debe considerarse una variable crítica para la confiabilidad del reformador. Una razón S/C adecuada ayuda a mantener al catalizador fuera de la zona de formación de carbono, reduce la pérdida de actividad, disminuye la necesidad de sobre exigir térmicamente los tubos y protege la vida mecánica del sistema en caliente.

Aguas abajo, el mismo control contribuye a moderar el potencial carburizante del gas reformado o de síntesis. Si la razón S/C es insuficiente o inestable, el sistema no sólo queda expuesto a problemas dentro del horno, sino también a una mayor propensión a condiciones que favorezcan el ataque por metal dusting en equipos de descarga y recuperación de calor. Por eso, el control de la razón S/C debe tratarse simultáneamente como una herramienta de operación, de mantenimiento y de integridad mecánica.

Una S/C baja no implica automáticamente ataque por metal dusting, porque el mecanismo requiere además temperatura metálica susceptible, material expuesto, actividad de carbono alta y, muchas veces, condiciones locales o transientes. Una razón S/C deficiente puede contribuir a un gas más carburizante y, por lo tanto, incrementar el riesgo de ataque por metal dusting, si coinciden las demás condiciones.

10. Referencias técnicas consultadas

- Honeywell UOP. Low carbon hydrogen production case study. Referencia utilizada para márgenes operacionales y discusión industrial de la razón vapor/carbono.
- TNO. Estudios y material técnico sobre reformación con vapor y equilibrio de composición del gas.
- EIGA, Documento DOC202. Revisión técnica sobre metal dusting en sistemas de gases de síntesis, incluyendo rango susceptible de temperatura y mecanismos relevantes.
- Argonne National Laboratory. Publicaciones técnicas sobre actividad de carbono y degradación por metal dusting en ambientes carburizantes.
- Literatura técnica general sobre deposición de carbono en catalizadores base níquel y su impacto sobre pérdida de actividad y caída de presión en reformadores.