

Evaluación del Desempeño Operacional de Planta de Steam Reforming para Determinar  
Capacidad de Hidrógeno

Andrea Camila Arévalo Sánchez

Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Ingeniería del Gas

Director

Andrés Fernando Muñoz Quintero

Magíster en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	8
1. Objetivos .....	10
1.1 Objetivo General .....	10
1.2 Objetivos Específicos.....	10
2. Marco Teórico.....	11
2.1 Proceso de Reformado .....	11
3. Herramienta Digital de Análisis Operacional .....	19
4. Conclusiones .....	31
Referencias Bibliográficas .....	34

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Composición del gas natural de carga del diseño de la unidad</i> .....	12
Tabla 2. <i>Límites de control en reactor de desulfurización</i> . .....	14

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Proceso de reformado</i> .....	11
Figura 2. <i>Sección de desulfurización</i> .....	14
Figura 3. <i>Pantalla principal de herramienta de Análisis Operacional de planta de Generación de H2.</i> .....	20
Figura 4. <i>Pantalla herramienta de Análisis Operacional de sección de carga y desulfurización.</i> .....	21
Figura 5. <i>Despliegue de tendencia de flujo de gas natural a Reformado.</i> .....	21
Figura 6. <i>Despliegue de calidad de gas natural de carga a la unidad de generación de H2.</i> .....	22
Figura 7. <i>Despliegue de la tendencia del diferencial de presión en reactores de desulfurización.</i> .....	23
Figura 8. <i>Pantalla herramienta de Análisis Operacional de sección de reformado con vapor.</i> ..	24
Figura 9. <i>Despliegue de la tendencia del diferencial de presión en el horno de reformado.</i> .....	24
Figura 10. <i>Apariencia típica de problemas en tubos de reformado.</i> .....	25
Figura 11. <i>Despliegue de la tendencia de la presión del gas de proceso a horno de reformado.</i> ..	26
Figura 12. <i>Despliegue de la tendencia de la temperatura del gas de proceso a horno de reformado.</i> .....	26
Figura 13. <i>Despliegue del contenido de H2 en el gas de síntesis a la salida del horno.</i> .....	27
Figura 14. <i>Despliegue de la apertura de los HIC para control del tiro del horno de reformado.</i> ..	27
Figura 15. <i>Pantalla herramienta de Análisis Operacional de sección de Conversión a alta temperatura.</i> .....	28

Figura 16. *Despliegue del diferencial de presión del reactor de conversión a alta temperatura.* 29

Figura 17. *Pantalla herramienta de Análisis Operacional de sección de Purificación del H<sub>2</sub>.* .. 30

Figura 18. *Despliegue de la pureza del H<sub>2</sub> producido en la planta evaluada.* ..... 30

Figura 19. *Despliegue de la producción de H<sub>2</sub> en planta de reformado con vapor.*..... 31

## Resumen

**Título:** Evaluación del Desempeño Operacional de Planta de Steam Reforming para Determinar Capacidad de Hidrógeno\*

**Autor:** Andrea Camila Arévalo Sánchez\*\*

### Palabras claves

#### Descripción

En la presente monografía se realiza la descripción del proceso de generación de hidrógeno mediante el reformado con vapor o Steam Reforming, y se identifican las variables claves de seguimiento de cada una de las secciones que componen el proceso, partiendo desde la composición del gas natural y finalizando el aseguramiento de la calidad de hidrógeno producto con más del 99 % molar. Se desarrolla una herramienta digital para fortalecer la práctica de análisis operacional, mediante el seguimiento en línea de las variables claves del proceso, y al realizar el diagnóstico del desempeño de la unidad, se observa que existe restricción para aumentar la capacidad de hidrógeno, debido a que la planta fue diseñada para un gas natural con mayor número de metano y menor contenido de CO<sub>2</sub>, y adicionalmente, se identifica oportunidad en la operación de los ventiladores de tipo inducido del horno de reformado.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Andrés Fernando Muñoz Quintero, Magister em Ingeniería Química

**Abstract**

**Title:** Evaluation of the Operational Performance of the Steam Reforming Plant to Determine Hydrogen Capacity\*

**Author:** Andrea Camila Arévalo Sánchez\*\*

**Keywords:****Description**

In this monograph, the description of the hydrogen generation process through steam reforming or Steam Reforming is carried out, and the key monitoring variables of each of the sections that make up the process are identified, starting from the composition of natural gas and finalizing the assurance of the quality of hydrogen product with more than 99% mole. A digital tool is developed to strengthen the practice of operational analysis, through online monitoring of the key variables of the process, and when carrying out the diagnosis of the unit's performance, it is observed that there is a restriction to increase the hydrogen capacity, due to that the plant was designed for a natural gas with a higher methane number and lower CO<sub>2</sub> content, and additionally, an opportunity is identified in the operation of the induced-type fans of the reforming furnace.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Andrés Fernando Muñoz Quintero, Master in Chemical Engineering

## Introducción

El azufre se encuentra naturalmente presente en los combustibles como el Diésel y la Gasolina, que al ser utilizados en los automotores emiten partículas de sulfatos y dióxido de azufre, que son contaminantes para el medio ambiente (Blumberg, Walsh, & Pera, mayo, 2003). En Colombia, en el año 2003 las regulaciones ambientales del Ministerio de Minas y Energía establecieron la calidad del Diésel y la Gasolina en 500 y 300 partes por millón de azufre (ppm), respectivamente, con el propósito de garantizar el goce de un ambiente limpio y sano a los colombianos, sin embargo para el año 2006 estas normativas fueron actualizadas a valores más exigentes en parámetro de control de azufre (Congreso de la República, 2008); debido a estos requerimientos del mercado, las Refinerías del país debieron realizar proyectos de inclusión de plantas de hidrotatamiento y generación de hidrógeno para eliminar principalmente los contaminantes azufrados. Para el año 2021 la Resolución 40103 del 7 de abril, fijó los parámetros y requisitos de 50 ppm de azufre en el Diésel, con proyección al 2023 de 15 ppm; mientras que la Gasolina Motor Regular (GMR) debe cumplir estándar de calidad menor a 50 ppm y con proyección de en los siguientes años comercializarla en menos de 20 ppm (Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Debido a estos nuevos parámetros de calidad, el sector de Refinación se enfrenta a la necesidad de hidrogenar cada vez más los combustibles para reducirles las ppm de azufre y cumplir con los requerimientos del mercado y las leyes ambientales; para esto, es necesario aumentar la cantidad de hidrógeno disponible para ser utilizado en los procesos de hidrotatamiento y desarrollar nuevas tecnologías de generación que hagan parte de la transición energética.

En septiembre del 2021 se presentó en Colombia La Hoja de Ruta del Hidrógeno, donde se señala el acelerado crecimiento de la demanda del H<sub>2</sub>, y se proyecta que para el año 2050 se tendrá un consumo mundial de 800 Mt de este compuesto puro mediante producción a bajas emisiones (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Sin embargo, para alcanzar este objetivo, el negocio tradicional de refinación y de generación de H<sub>2</sub> mediante Reformado de Gas Natural, será el encargado de apalancar la creciente demanda.

Esta situación, obliga a que en las Refinería de Colombia se haga más eficiente la generación actual de H<sub>2</sub> y se aproveche cada molécula mediante el seguimiento estricto al desempeño de las unidades utilizando la metodología de Análisis Operacional diario. Esta práctica viene realizándose hace algunos años en las Refinerías, sin embargo, presenta oportunidad en la rigurosidad con la que se hace, dado que se tiene limitación en herramientas digitales integrales, la información de la planta se encuentra dispersa y la evaluación de desempeño toma mayor tiempo para decidir realizar ajustes operacionales.

Así pues, el Análisis Operacional permite comparar el proceso con un estándar de referencia para identificar oportunidades de mejora y plantear acciones para cerrar brechas y fortalecer el mejoramiento continuo de la unidad (Ecopetrol S.A., 2019), es por ello por lo que surge el presente trabajo, donde se evaluará el desempeño operacional de una planta de Steam Reforming para determinar la capacidad de hidrógeno aplicando Análisis Operacional mediante una herramienta en línea de seguimiento de variables y KPIs.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar evaluación del desempeño de planta de Steam Reforming y determinar máxima capacidad de hidrógeno aplicando Análisis Operacional.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Estudiar el proceso de Steam Reforming para la generación de hidrógeno en una Refinería de Colombia.

Determinar las variables claves y KPI del proceso que son indispensables en la práctica de Análisis Operacional.

Diseñar mediante el software PI System la pantalla de monitoreo de unidad de Generación de Hidrógeno que permita potenciar el Análisis Operacional.

Evaluar el desempeño actual y determinación de capacidad de hidrógeno de una unidad de Steam Reforming.

## 2. Marco Teórico

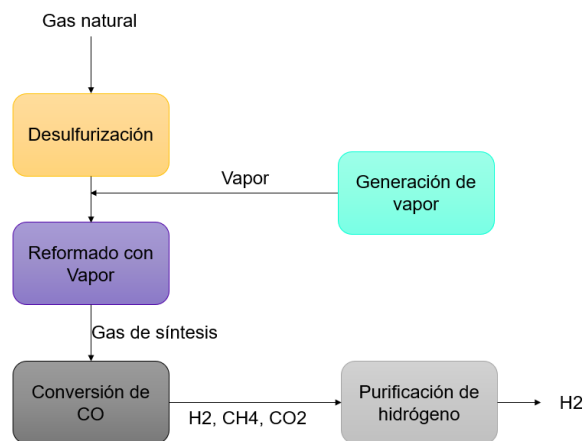
### 2.1 Proceso de Reformado

El Reformado con Vapor (steam reforming) es uno de los métodos más utilizados en las Refinerías para la generación de hidrógeno. En términos generales, consiste en un proceso catalítico donde el gas natural rico en metano ( $\text{CH}_4$ ) y etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) se mezcla con vapor de agua e ingresa a un horno empacado con un lecho catalítico que a altas temperaturas permite romper el enlace entre el carbono y el hidrógeno; el producto de esta reacción se conoce como gas de síntesis que consta de una mezcla rica en hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua, metano y etano (Barelli, Bidini, Gallorini, & Servili, 2008), esta corriente posteriormente se purifica y se obtiene el hidrógeno con una pureza superior al 99 %.

A continuación, se realiza la descripción detallada del proceso (Simpson & Lutz, 2007):

#### Figura 1.

##### *Proceso de reformado*



*Nota:* Simpson, A. y Lutz, A. (dic. 2007). *Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming*. Int. J. Hydrog. Energy, vol. 32, n.o 18, pp. 4811-4820, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.08.025

Una planta de Reformado con Vapor consta de seis secciones principales a las cuales se le debe hacer seguimiento diario para la óptima generación de hidrógeno: Sección de Carga, Sección de Desulfurización, Sección de Generación de vapor, Sección de Reformado con vapor, Sección de Conversión de CO y Sección de purificación del H<sub>2</sub> (Fierro, Parola, Thomas, Guil-López, & Navarro, 2020), (Ecopetrol S.A. , 2009). La ruta global del proceso se presenta en la Figura 1.

#### Sección de Carga:

La materia prima de una planta de generación de hidrógeno mediante reformado es el gas natural proveniente de los campos y el vapor de agua. El gas natural debe ser rico en metano y etano para favorecer la producción de hidrógeno y al entrar a la unidad debe ser filtrado con el fin de retirar el material particulado mayor a 5 micras que genera taponamiento en los catalizadores. El vapor debe ser de 400 psi aproximadamente.

#### **Tabla 1.**

*Composición del gas natural de carga del diseño de la unidad.*

Gas natural de diseño		
Metano	% mol	92
Etano	% mol	4
Propano	% mol	1
Nitrógeno	% mol	2,6
Dióxido de Carbono	% mol	0,4
Peso Molecular	lb/lbmol	17,31
Azufre total (H <sub>2</sub> S)	ppmV	10

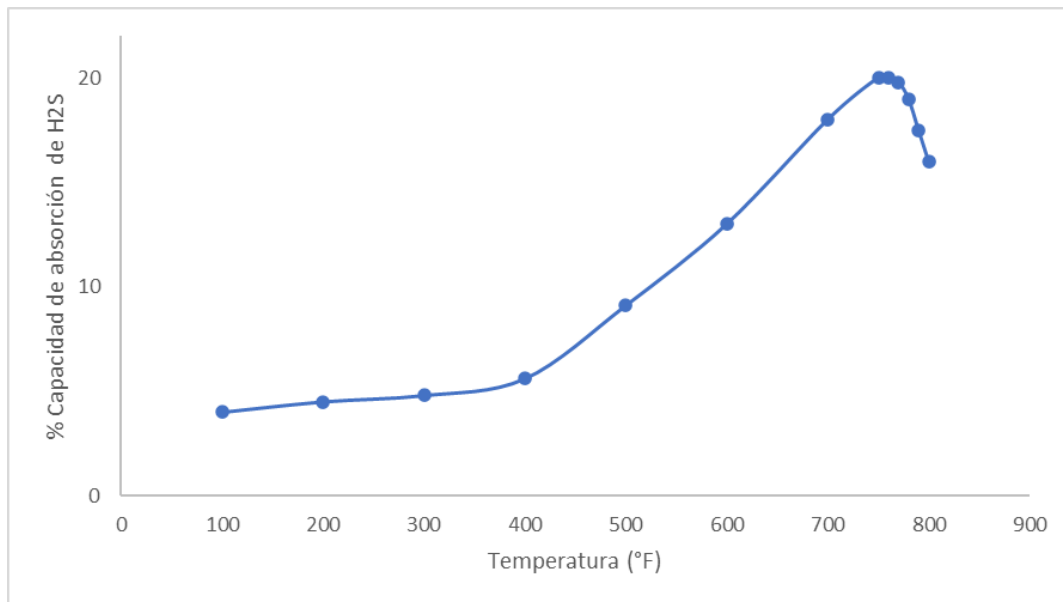
*Nota:* Adaptado de: Bases de diseño de Ecopetrol GRB.

## Sección de Desulfurización:

El gas natural filtrado, se divide en dos corrientes: una de menor volumen que va hacia el cabezal de gas combustible como suministro a los quemadores del horno de reformado, y la otra va hacia el proceso de generación de H<sub>2</sub>. A esta segunda corriente, se le debe retirar cualquier traza de compuesto azufrado que pudiese contaminar el proceso aguas abajo. Para esto, se utilizan dos reactores verticales que pueden operar en serie o en paralelo, lo cuales están empacados con catalizador de Óxido de Zinc (ZnO), los cuales retienen el H<sub>2</sub>S presente en el gas para formar sulfuro de Zinc (ZnS), así como muestra la ecuación 1.



Esta reacción exotérmica, con un  $\Delta H_{750\text{ }^\circ\text{F}} = -75.5 \text{ kJ/mol}$ , es favorable a altas temperaturas, pues alto contenido de CO<sub>2</sub> y bajas temperaturas de reacción, generan la formación de carbonatos de zinc los cuales desactivan el catalizador. El rango de temperatura de operación óptima es entre 600 °F y 700 °F para controlar el contenido de H<sub>2</sub>S en 0.1 ppmv máximo para el gas de carga con menor de 0.5 g de H<sub>2</sub>S por cada 100 pies cúbicos de gas, así como muestra la Figura 2.

**Figura 2.***Sección de desulfurización*

*Nota:* Galstyan, Vardan & Poli, Nicola & Comini, Elisabetta. (2019). *Highly Sensitive and Selective H2S Chemical Sensor Based on ZnO Nanomaterial*. Applied Sciences. 9. 1167. 10.3390/app9061167

Una variable adicional clave de seguimiento en esta etapa del proceso es a la presión diferencial de los rectores, pues al aumentar indica que el lecho catalítico se encuentra saturado y con baja actividad, lo cual indica que se debe cambiar.

**Tabla 2.***Límites de control en reactor de desulfurización.*

Reactor de desulfurización		
Azufre total (H2S) efluente	ppmV	>0,1
Temperatura de entrada	°F	600-700
Temperatura de salida	°F	800

### Sección de Reformado con Vapor:

El gas natural con menos de 0.1 ppmv de H<sub>2</sub>S se encuentra en el punto de mezcla con el vapor de agua de 400 psig, donde se debe mantener una relación vapor/carga entre 3/1 y 4/1 para asegurar una buena operación del horno de reformado, pues si la relación cae por debajo del valor mínimo crítico, se formará carbón en el catalizador de reformado instantáneamente y como consecuencia, este deberá ser cambiado; así mismo, la operación con relaciones muy altas de vapor a carbón sería desfavorable respecto a la economía total de vapor y aumentaría la caída de presión sobre los tubos del reformador (García, 2015, págs. 83-107).

El gas natural mezclado con el vapor de agua pasa por un intercambiador de calor que aumenta la temperatura a valores alrededor de 1040 °F antes de ingresar al horno de reformado, intercambiando calor con los gases de combustión provenientes del horno. Mayores temperaturas deben ser evitadas debido a que aumentan la tasa de craqueo térmico en el sistema de entrada, temperaturas menores aumentarán el duty absorbido en el reformador, en consecuencia, el flujo de calor y las temperaturas de piel de los tubos aumentarán.

Luego, ingresa al horno de reformado, en donde en presencia de un catalizador de Óxido de Níquel (NiO), se presentan las siguientes reacciones principales que aplican para el etano, butano, etc.:



Estas reacciones son favorecidas a baja presión y alta temperatura, manteniendo la relación de Vapor/Carga. Sin embargo, al darse en presencia de un catalizador, se tiende a la formación de carbón, como indica la reacción (4) colateral.



La mezcla de gases salida del horno de reformado se conoce como Gas de Síntesis está compuesto principalmente por H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub> que no reaccionó; la temperatura y presión de esta corriente es normalmente 1590 °F y 370 psig, por lo que estas condiciones termodinámicas son aprovechadas para generar vapor de 400 psig que se usará en el mismo proceso. Mayores temperaturas aumentarán la conversión de hidrocarburos, así como aumentará la temperatura de piel de los tubos (menor tiempo de vida de los tubos); y menor temperatura en la salida del horno, hará que la conversión de hidrocarburos disminuya, por lo que la temperatura de salida debe mantenerse por encima de 1380°F.

#### Sección de Conversión:

El gas de síntesis, luego de intercambiar calor en la caldera para producir vapor de 400 psig, ingresa a un reactor de conversión a alta temperatura con el fin de aumentar el contenido de H<sub>2</sub> en el gas de síntesis. El CO presente reacciona con el agua para producir CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> (Ec. 5) en presencia de un lecho catalítico comúnmente compuesto por óxido de hierro, cobre y cromo.



Debido a que la reacción de monóxido de carbono-agua es exotérmica, una disminución en la temperatura sería favorable para la conversión. Sin embargo, esto es limitado por el hecho de que el catalizador no se encuentra más activo bajo cierta temperatura de entrada mínima. La temperatura de entrada durante la condición inicio de corrida de la planta es de aproximadamente 600°F y durante la condición final de corrida es 670°F. A mayores temperaturas, la concentración de CO en el gas de salida será mayor que el valor de diseño. Esto reduce la capacidad de la planta y da mayor carga de CO para la etapa de purificación del Gas. El establecimiento de las

temperaturas de entrada debe hacerse con base en la concentración de CO en el gas de salida en la mayor temperatura del convertidor.

Al reactor de conversión a alta temperatura se le debe monitorear el diferencial de presión, pues esta variable es una indicación directa de la eficiencia del lecho catalítico.

El gas de síntesis rico en hidrógeno que sale del reactor es enfriado a través de un tren de intercambiadores que lleva su temperatura desde 780 °F a 290 °F aproximadamente para entrar a un primer separador caliente, donde se recupera el condensado que se retorna hacia el sistema de generación de vapor. El gas que sale de este sistema es enfriado nuevamente con mediante un aroenfriador hasta alcanzar una temperatura alrededor de 100 °F e ingresa a otro separador donde se le retira el exceso de condensado con el fin de asegurar que el gas vaya lo suficientemente seco hacia la sección de purificación del H<sub>2</sub>.

#### Sección de Purificación de H<sub>2</sub>:

El gas rico en H<sub>2</sub> y libre de agua entra a la sección de purificación, donde los contaminantes son retirados mediante un proceso de adsorción por cambio de presión (PSA).

El proceso de adsorción consta típicamente de 6 tambores empacados, los cuales retienen las partículas con mayor tamaño que el hidrógeno y deja pasar a esta última hasta conseguir una corriente con una pureza superior al 99 %.

Los seis adsorbedores operan automática y cíclicamente. Es decir, mientras un tambor se encuentra adsorbiendo, los otros cinco se están regenerando mediante: proceso de purga, drenaje y ecualización (igualación de presiones a través de represurización y despresurización).

La purga de este sistema se aprovecha hacia los quemadores del horno de reformado junto con el gas combustible (Simpson & Lutz, 2007), (Fierro, Parola, Thomas, Guil-López, & Navarro, 2020).

#### Sección de Generación de Vapor:

Como se ha mencionado a lo largo de este texto, el vapor de agua juega un papel indispensable en la generación de hidrógeno, por lo que las Refinerías optan por aprovechar la energía producida en la combustión del horno de reformado para generar vapor de alta presión que se consumirá dentro de la unidad.

Las corrientes de condensados recuperados en los separadores caliente y frío, más agua de restitución, son precalentadas con la corriente de gas de proceso salida del reactor de conversión y es enviada hacia un desaireador, donde se le retiran las trazas de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> los cuales son venteados a la atmósfera. El agua libre de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> es enviada hacia la caldera para la generación de vapor de 400 psig de presión.

- Análisis operacional:

El análisis operacional es una práctica estructurada que consiste en el seguimiento, evaluación y análisis continuo del comportamiento de la operación con el objetivo de identificar desviaciones del proceso y así tomar decisiones pertinentes. Este ejercicio se convierte en la esencia del control de la operación como proceso sistemático de optimización y sostenibilidad que permite (Ecopetrol S.A., 2019):

- Garantizar la seguridad de las personas y la integridad de los procesos a cargo.
- Asegurar el excelente desempeño de los equipos y activos para el incremento de valor sobre las materias primas procesadas.
- Optimizar los costos de la operación y así aportar a la rentabilidad como negocio.
- Entregar productos/servicios acordes con los compromisos de calidad en oportunidad, volumen y especificaciones requeridas y establecidos con clientes internos y externos.
- Mantener y mejorar con responsabilidad el ambiente y entorno

- **PI SYSTEM:**

PI System es un software que permite recopilar, almacenar y administrar grandes volúmenes de datos operativos de las unidades de proceso mediante el uso de marcas de tiempo en el pasado, presente y futuro. Cada dato es registrado en Tags o puntos de almacenamiento únicos que permite a los usuarios identificar la información mediante el uso de una convención de nomenclatura (Osisoft, 2020).

Para acceder a la información recopilada se pueden utilizar distintas herramientas como:

- **PI Vision:**

Es una aplicación en un navegador web que permite analizar la información de los procesos a través del uso de gráficas y representaciones visuales.

- **PI DataLink:**

Es un complemento de Microsoft Excel que permite generar la información operativa en hojas de cálculo para procesar los datos.

### **3. Herramienta Digital de Análisis Operacional**

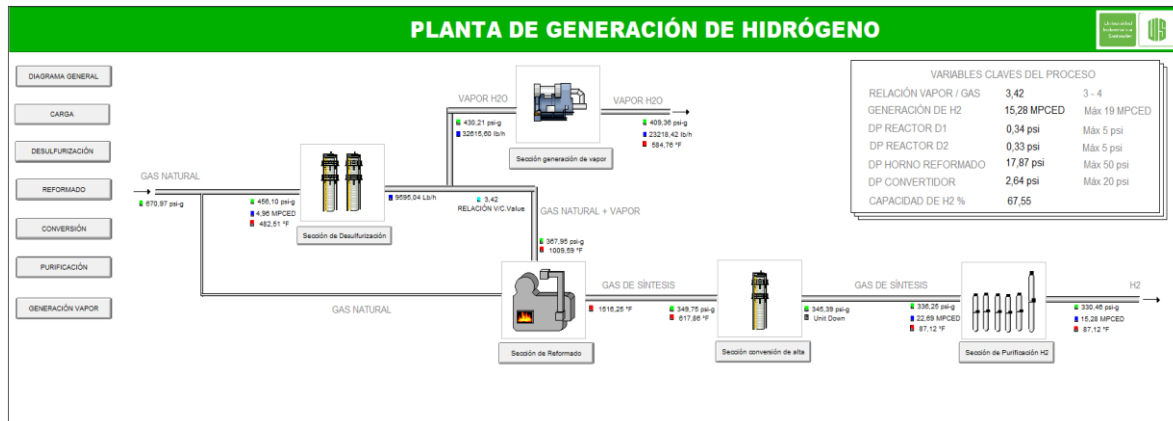
La herramienta digital fue desarrollada mediante el programa de PI Process Book, que permite esquematizar el proceso y traer el histórico en línea de las variables claves en la generación de hidrógeno.

En la figura 3 se presenta la pantalla general de la herramienta, indicando las variables de operación más importantes de cada una de las secciones de: carga; desulfurización; reformado con vapor; conversión a alta temperatura; purificación de H<sub>2</sub>; y generación de vapor. Al darle clic a cada sección, se desplegará el proceso específico y detallado de cada uno.

En el recuadro ubicado a la izquierda de la pantalla, denominado “Variables claves del proceso” se plasman los valores puntuales de los KPI que deben ser de seguimiento diario del ingeniero de proceso y de los operadores de la unidad.

**Figura 3.**

*Pantalla principal de herramienta de Análisis Operacional de planta de Generación de H<sub>2</sub>.*



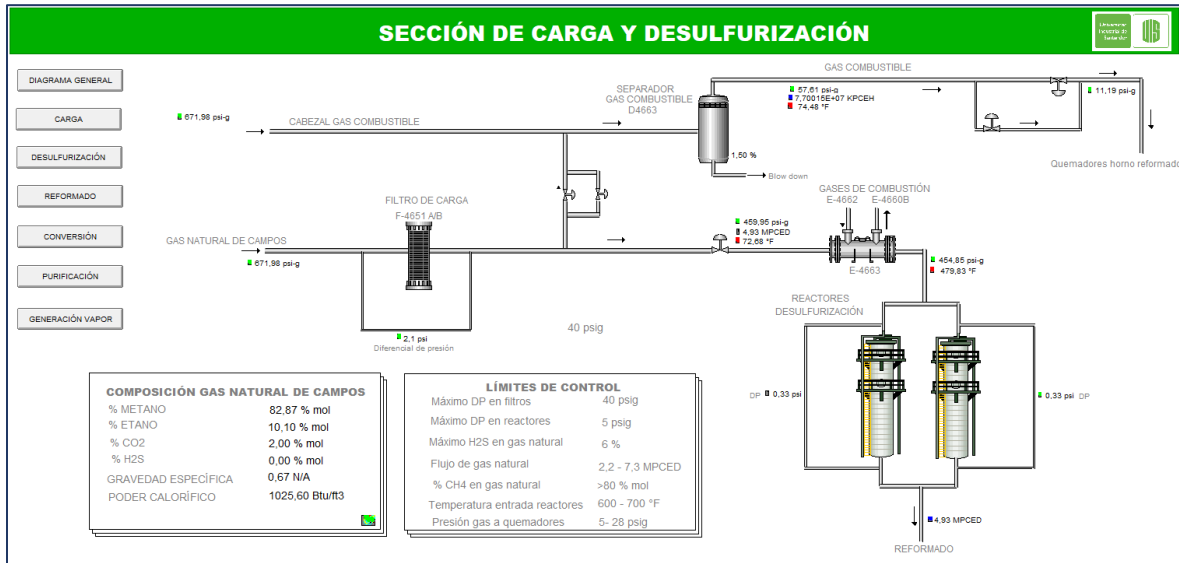
A continuación, se realiza el análisis operacional de planta por cada sección, utilizando la herramienta digital desarrollada.

#### Sección de Carga y Desulfurización:

En la figura 4 se muestra el estado actual de la sección de carga y desulfurización de la unidad de generación de hidrógeno. Se puede observar que el flujo de gas natural que va hacia el proceso de reformado puntualmente reporta 5,05 MPCED, valor que se encuentra dentro del rango óptimo de operación (plasmado en la tabla titulada dentro de la pantalla como “Límites de control”).

**Figura 4.**

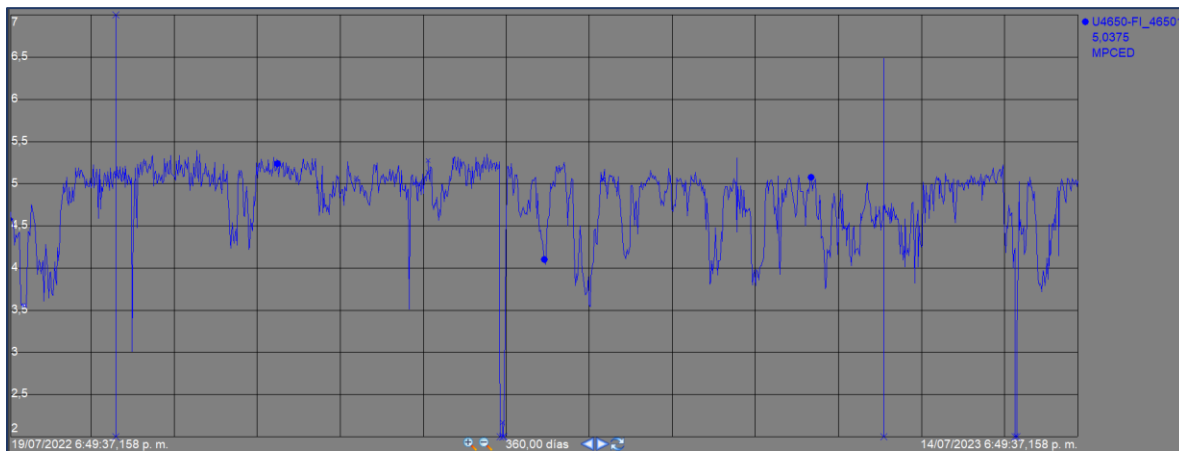
*Pantalla herramienta de Análisis Operacional de sección de carga y desulfurización.*



Durante el último año, la carga de gas natural ha oscilado en valores entre 3,5 MPCED y 5,2 MPCED, manteniéndose en promedio en 4,8 MPCED, como se observa en la figura 5; reflejando un 65 % de la capacidad de carga de gas natural en la planta de generación de hidrógeno según el diseño, la limitación principal para no llevar la unidad a 7,3 MPCED se debe a la calidad del gas natural que se recibe actualmente.

**Figura 5.**

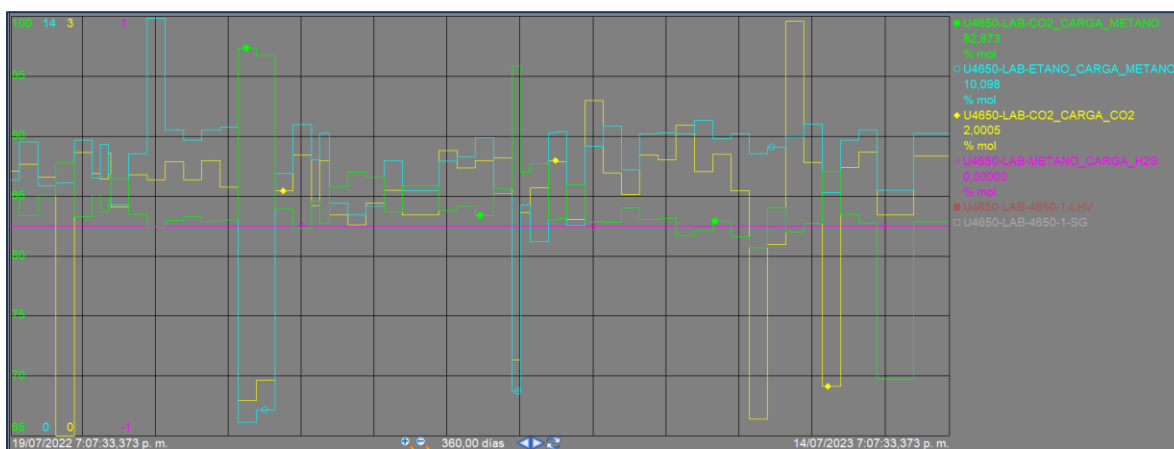
*Despliegue de tendencia de flujo de gas natural a Reformado.*



La planta en estudio fue diseñada para procesar gas natural proveniente de Provincia – Payoa, con un porcentaje de metano superior al 92 %, como se indica en la Tabla 1; y con un contenido de etano y dióxido de carbono de 4 y 0,4 % mol, respectivamente. El gas natural que se recibe actualmente en la unidad es proveniente de La Guajira y durante el último año ha presentado la composición reportada en la figura 6.

### Figura 6.

*Despliegue de calidad de gas natural de carga a la unidad de generación de H<sub>2</sub>.*



El contenido de metano (línea verde) en el gas Guajira que llega a la Refinería oscila entre 80 y 90 % mol, en promedio en 84 % mol, reportando 10 % mol menos del diseño de la unidad.

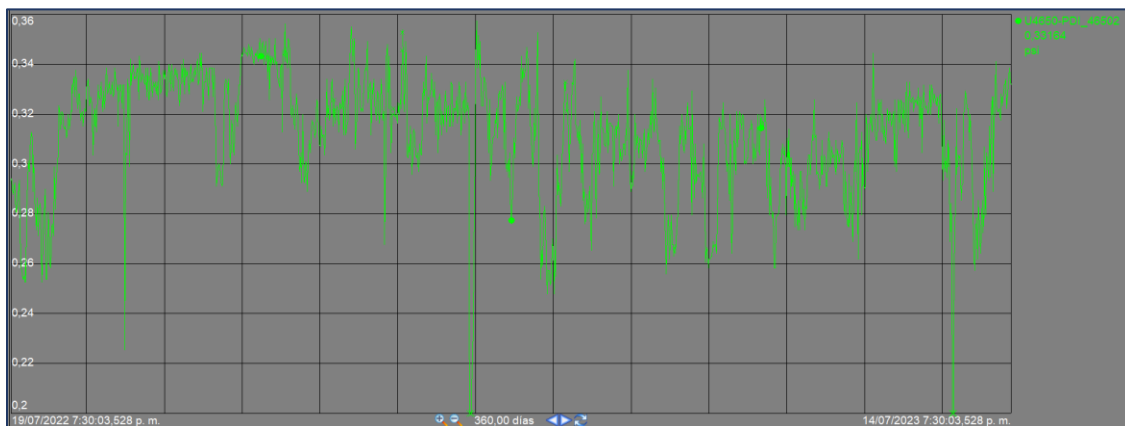
Así mismo, el contenido de etano (línea azul) y CO<sub>2</sub> (línea amarilla) se encuentran por encima del diseño, reportando en promedio 10 % mol y 2 % molar, respectivamente. Aumentar el flujo de gas natural al proceso de reformado, implica un aumento en el volumen de etano y CO<sub>2</sub> que llegan al horno que opera a altas temperaturas y podría generar coquizamiento en el catalizador y/o un taponamiento de los tubos del horno, lo que implicaría un cambio completo del lecho catalítico y una parada general de la unidad.

Por otra parte, el contenido de H<sub>2</sub>S en el gas natural ha reportado 0 % mol en todo el periodo analizado, lo que establece que este gas no es ácido y no implica mayor esfuerzo en la

operación de los reactores de desulfurización, lo cual se puede comprobar con la tendencia del diferencial de presión de los dos reactores de desulfurización, figura 7.

### Figura 7.

*Despliegue de la tendencia del diferencial de presión en reactores de desulfurización.*



Sin embargo, se observa que la temperatura del gas natural a la entrada de los reactores de desulfurización se encuentra en promedio en 480 °F, valor que está por debajo de la temperatura óptima para garantizar la posible remoción de H<sub>2</sub>S con que pueda venir el gas. Aunque la historia de la unidad, no se han presentado valores alto de H<sub>2</sub>S en el gas natural proveniente de campos, la operación correcta de estos reactores es una barrera de protección al catalizador del horno de reformado.

Por otra parte, la presión de gas combustible a los quemadores del horno de reformado se ha mantenido en el último año dentro del rango óptimo de operación, reportando en promedio en 13 psig vs 28 psig máximo.

#### Sección de Reformado con Vapor:

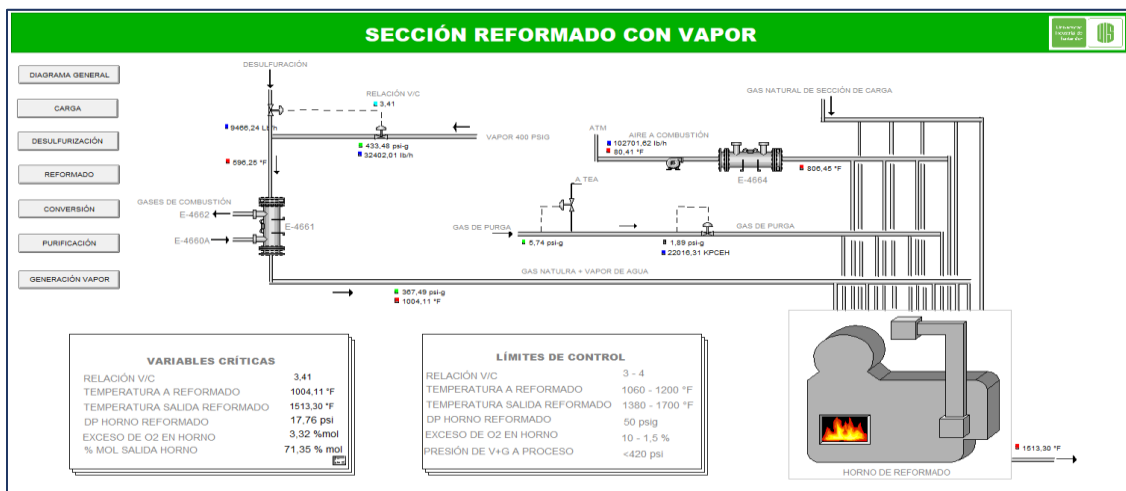
En el análisis de esta sección utilizando la Figura 8, se observa que la relación de vapor y gas natural se encuentra puntualmente en 3,4 lb de vapor/lb de gas natural, cumpliendo dentro del rango óptimo para garantizar la conversión de los hidrocarburos en H<sub>2</sub> y asegurar el no

coquizamiento del catalizador del horno de reformado. Así mismo, en el despliegue de la tendencia de esta variable, se observa que en el último año se ha mantenido en control.

La diferencia de presión en los tubos del horno de reformado se puede observar en la figura 9, esta refleja la correcta operación de la mezcla entre vapor y gas, pues en el último año, no se observan valores por encima del 18 psig en el diferencial de presión, estando muy por debajo del límite para el cambio del lecho que es 50 psig.

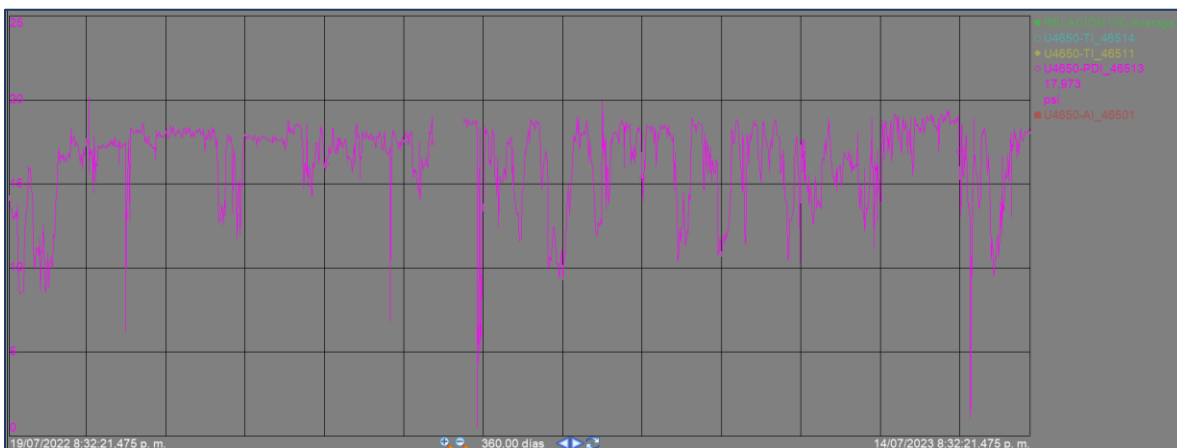
**Figura 8.**

*Pantalla herramienta de Análisis Operacional de sección de reformado con vapor.*



**Figura 9.**

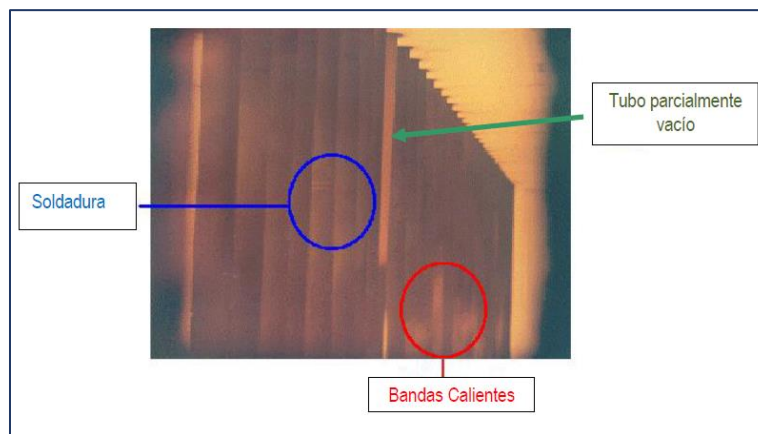
*Despliegue de la tendencia del diferencial de presión en el horno de reformado.*



El análisis del diferencial de presión de los tubos del horno de reformado y la formación de carbón en ellos, debe estar acompañada con la inspección visual en campo, mínimo cada 2 meses, de la coloración de los tubos (Matthey, 2015), pues estos nos pueden indicar tubos parcialmente vacíos, problemas de soldaduras o formación de bandas por generación de coque, como se ilustra en la figura 10.

**Figura 10.**

*Apariencia típica de problemas en tubos de reformado.*



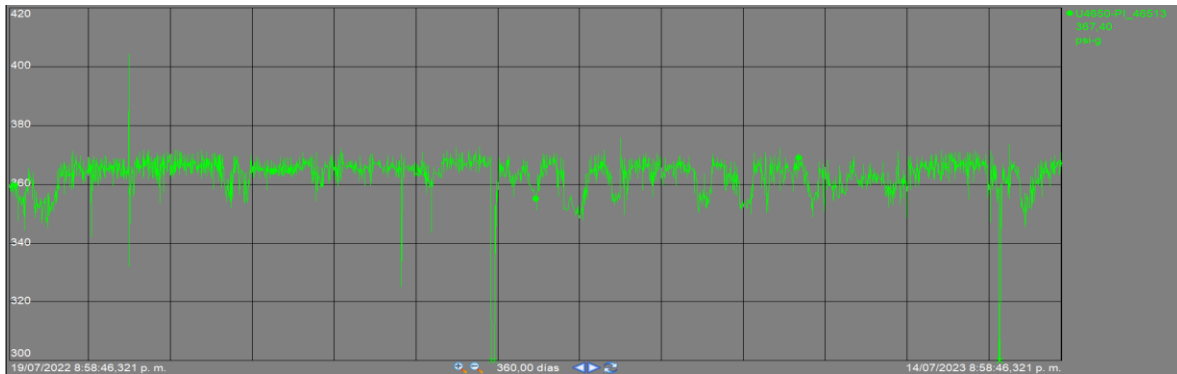
*Nota:* Tomado de: Matthey, Johnson. (2015). 101 Cosas que pueden estar mal en tu Reformador Primario.

Dado que la reacción de reformado se ve favorecida a bajas presiones y altas temperaturas, una de las variables de seguimiento es la presión y la temperatura de entrada al horno. En las Figuras 11 y 12 se adjuntan las tendencias de estas dos variables.

La presión a la entrada del reactor se ha mantenido por debajo de 420 °F, reportando en promedio 365 °F, lo cual es favorable para la reacción de reformado.

**Figura 11.**

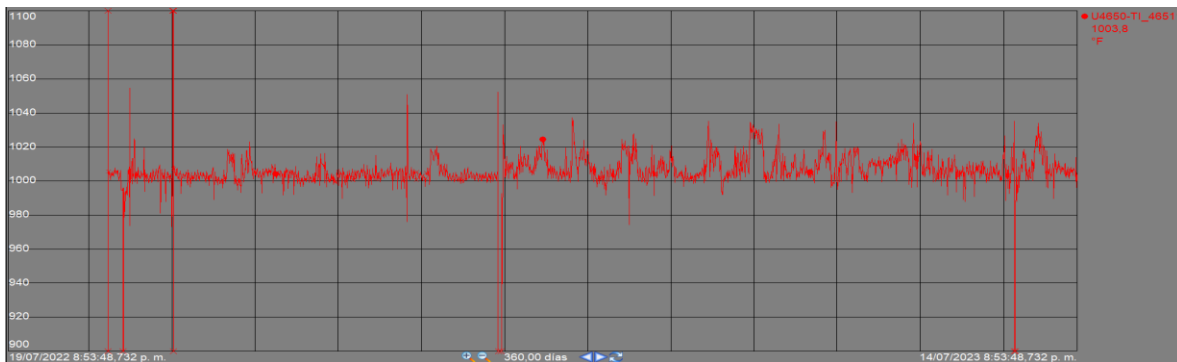
*Despliegue de la tendencia de la presión del gas de proceso a horno de reformado.*



Por su parte, la temperatura ha oscilado en valores entre 1000 y 1020 °F, un poco por debajo de lo recomendado para la maximización de la producción de H<sub>2</sub> en el horno. Podría pensar en hacer una evaluación operacional, subiendo gradualmente 50 °F la entrada al horno, validando la temperatura de salida en el reformado, el porcentaje de H<sub>2</sub> en la composición del gas de síntesis y la variación en el diferencial de presión del horno.

**Figura 12.**

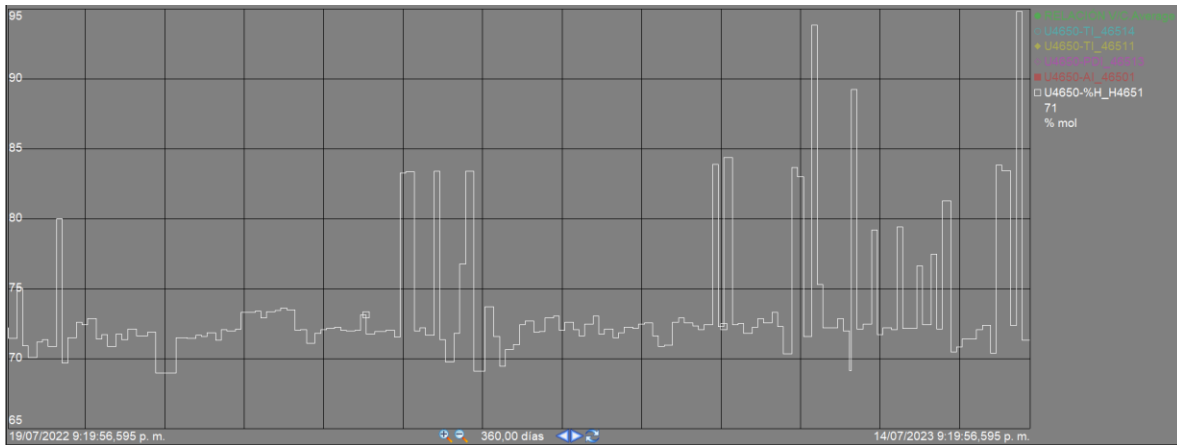
*Despliegue de la tendencia de la temperatura del gas de proceso a horno de reformado.*



En cuanto a la conversión de reformado, el porcentaje de H<sub>2</sub> en el gas de síntesis de la salida del horno ha estado en promedio en el último año en 73 % mol. Sin embargo, se observa que se han obtenido valores alrededor de 80 % mol de H<sub>2</sub>, cuando se ha operado el horno con temperaturas de entrada superiores a los 1030 °F.

**Figura 13.**

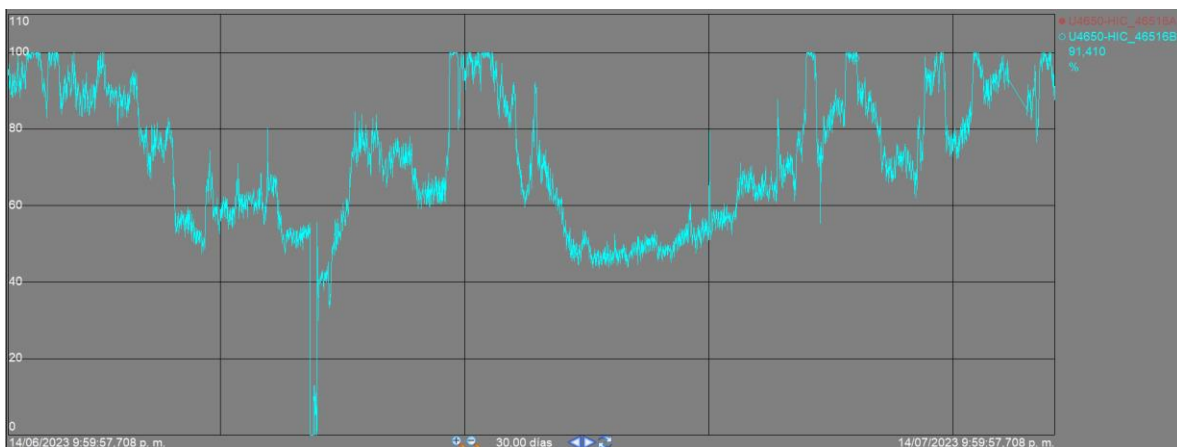
*Despliegue del contenido de H2 en el gas de síntesis a la salida del horno.*



El principal cuello de botella de la unidad de generación de hidrogeno de que se está estudiando, se encuentra en el horno de reformado en el sistema de combustión, pues la presión en el hogar es controlada por un PIC que regula el flujo de gases de combustión a través de los ventiladores inducidos un HIC que se encuentra en la succión de estos. La unidad opera con una capacidad de reformado de aproximadamente el 73 %, valor para el cual los HIC abren al 90%.

**Figura 14.**

*Despliegue de la apertura de los HIC para control del tiro del horno de reformado.*



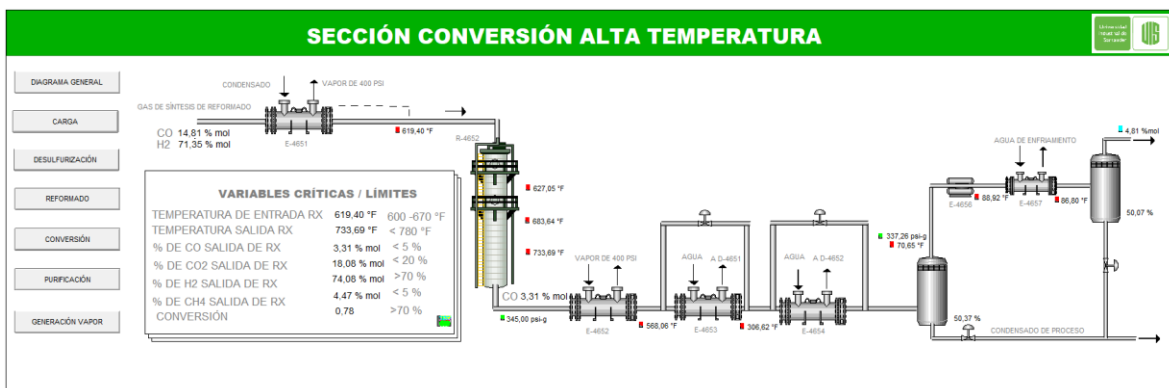
Adicionalmente, la unidad que se evalúa lleva más de 10 años en operación y el horno de reformado ha ido perdiendo capacidad de transferencia de calor en su zona de convección por ensuciamiento de los intercambiadores, lo que ha generado un aumento en la temperatura de los gases de chimenea que pasan a través de los ventiladores de tiro inducido. Este incremento en la temperatura de los gases de chimenea genera una disminución en su densidad, y por consiguiente un incremento en el flujo volumétrico a través de estos ventiladores, disminuyendo así su capacidad de flujo másico. Así pues, el incremento en la temperatura del gas de chimenea resta capacidad a los ventiladores de tiro inducido para desplazar dicho gas y genera restricción en el incremento de conversión en el reformado.

Es importante evaluar en campo, otros factores de limitación como, por ejemplo, la entrada de corrientes parásitas al horno u otras restricciones de tipo mecánico.

Sección de Conversión:

**Figura 15.**

*Pantalla herramienta de Análisis Operacional de sección de Conversión a alta temperatura.*



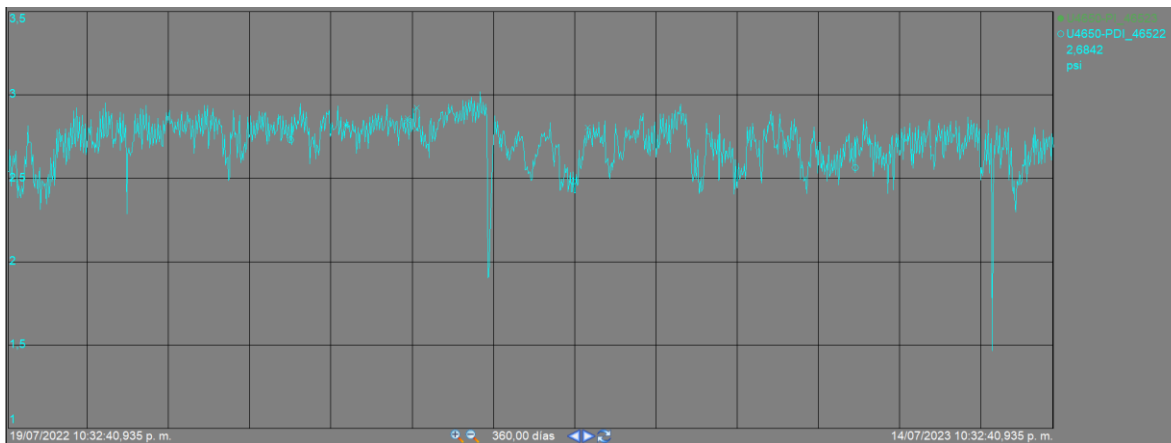
Se observa con los resultados de calidad del efluente que la actividad del catalizador ha venido disminuyendo durante toda la corrida (85% conversión inicio de corrida vs 78% datos actuales; esta actividad se puede recuperar aumentando la temperatura de entrada al R-4652 que actualmente es de 619°F que, si bien está dentro del parámetro de control y sabiendo que esta

reacción es exotérmica, es necesario en los años mantener la actividad catalítica del lecho, subiendo alrededor de 5 °F y evaluando la conversión de CO.

El diferencial de presión del reactor se ha mantenido estable en el último año de operación en 2,6 psi, como se ve en la figura 15.

### Figura 16.

*Despliegue del diferencial de presión del reactor de conversión a alta temperatura.*



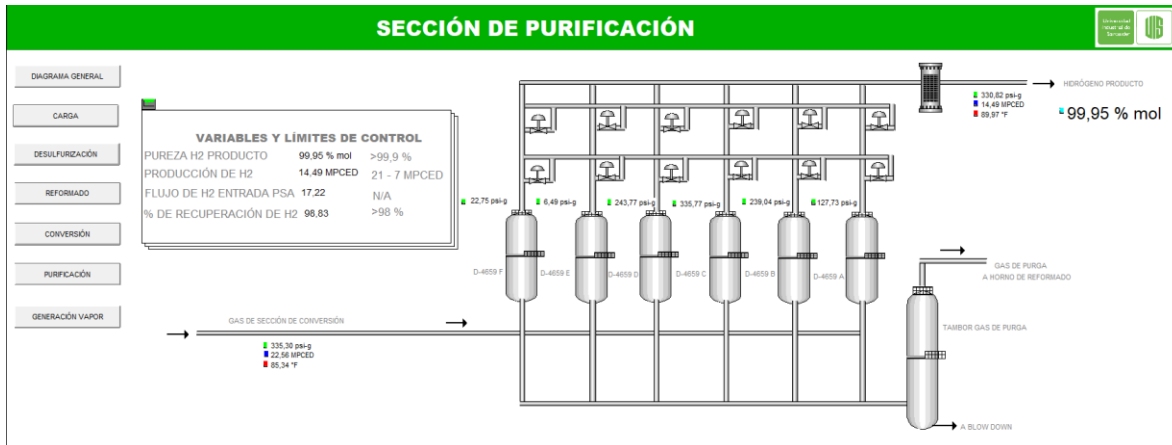
#### Sección de Purificación de H<sub>2</sub>:

En la figura 16 se presenta el esquemático de la sección de purificación de hidrógeno. La variable más importante en esta parte del proceso es el % de H<sub>2</sub> en la corriente de producto final, pues debe ser >99 % para garantizar la calidad y eficiencia en el proceso de hidrot ratamiento que queda aguas abajo del proceso.

Para el análisis puntal de la unidad, se tiene una pureza del 99,95 % mol de H<sub>2</sub> en la salida de planta; reflejando una recuperación del 98 % del hidrógeno presente en la corriente de gas de síntesis generada y tratada a lo largo del proceso, evidenciando así una correcta operación de los lechos adsorbedores de la PSA.

**Figura 17.**

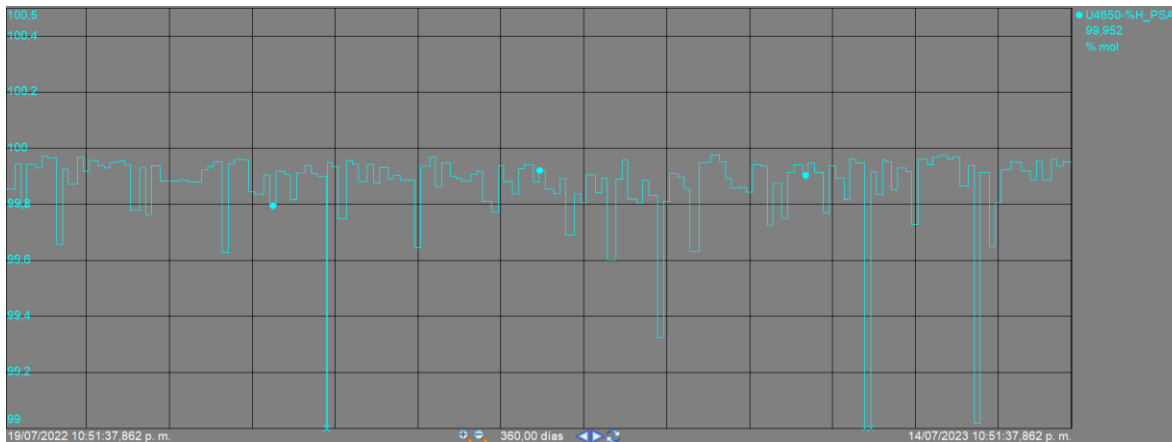
*Pantalla herramienta de Análisis Operacional de sección de Purificación del H2.*



En la Figura 17 se despliega la tendencia de la calidad el hidrógeno producido en el último año en la unidad de reformado con vapor estudiada. Como se ve, siempre se ha estado por encima del 99 % de pureza. Los picos por debajo de este valor que se observan en la gráfica corresponden a eventos puntuales de apagados de la planta de generación de H2.

**Figura 18.**

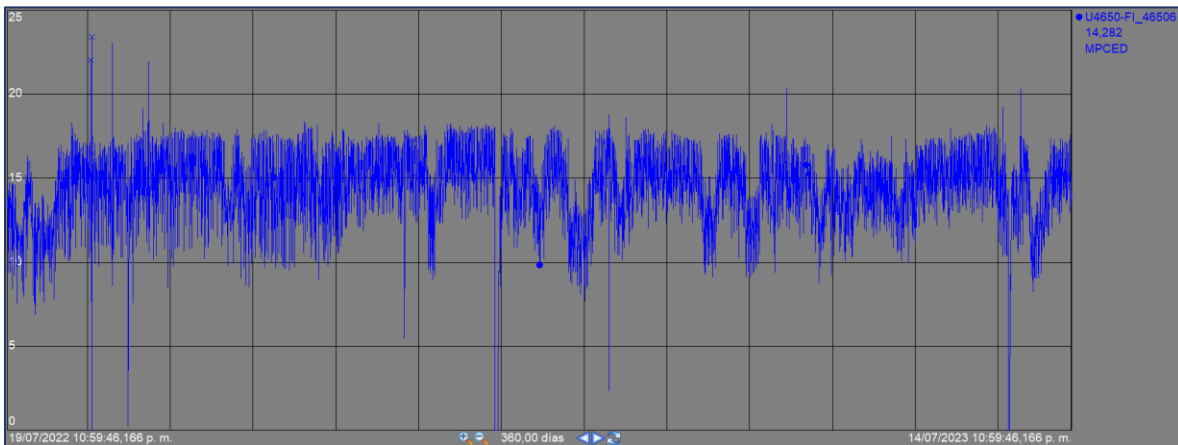
*Despliegue de la pureza del H2 producido en la planta evaluada.*



La mayor producción de H<sub>2</sub> que se ha obtenido en el último año ha sido de 15,5 MPCED en promedio.

**Figura 19.**

*Despliegue de la producción de H<sub>2</sub> en planta de reformado con vapor.*



#### 4. Conclusiones

El desarrollo de esta monografía permitió evaluar el desempeño operacional de una planta de generación de hidrógeno mediante Steam Reforming, desarrollando una herramienta digital de fortalecimiento al análisis operacional de la unidad.

La planta de steam reforming para la producción de hidrógeno evaluada presenta una capacidad de generación entre 65 y 70 %. Las limitaciones principales para llevar este parámetro a valores de diseño >80 %, se deben al cambio composicional en el gas natural que llega a la unidad, pues la disminución del metano y el aumento de CO<sub>2</sub> y Etano, disminuye la conversión del horno de reformado. Así mismo, se ha identificado restricción en la operación de los ventiladores de tipo inducido, que limitan el flujo de los gases de chimenea de este sistema, pues la presión en el hogar del horno que es controlada por el PIC que regula el flujo de gases de

combustión a través de los ventiladores inducidos, el HIC se encuentra en la succión de estos. La unidad opera con una capacidad de reformado de aproximadamente el 73 %, valor para el cual los HIC tienen apertura  $> 90\%$ .

Dado lo anterior, se deberá incluir en el alcance de la próxima parada general de la unidad, la intervención mecánica de los ventiladores de tipo inducido de los gases de chimenea del horno de reformado, al igual que las válvulas HIC para el control del tiro, con el fin de minimizar el cuello de botella presentado en la combustión del horno.

Se deberá incluir alcance de la próxima parada general de la unidad, la intervención mecánica y limpieza de los intercambiadores de la zona de convección del horno de reformado: E-4660 A/B, E-4661, E4662, E4663 y E-4664, con el fin de controlar la temperatura de los gases de chimenea y no forzar la operación de los ventiladores de tipo inducido.

Se recomienda realizar ajuste de temperatura en convertidor de alta temperatura para mejorar la remoción de CO y aumentar la producción de H<sub>2</sub> de la unidad, dado el tiempo de corrida de la unidad. Esto deberá hacerse evaluando el comportamiento del contenido de CO a la entrada y la salida del reactor.

La carga máxima de gas natural que presenta la unidad es de 5,2 MPCED, siendo un 71 % de la carga máxima de diseño de la unidad. El incremento de carga se ve limitado por la calidad del gas combustible y por las restricciones en la combustión del horno debido a la operación de los ventiladores de tiro inducido.

Aunque el gas natural recibido en la unidad no es un gas ácido, y su contenido de H<sub>2</sub>S es casi nulo, se recomienda que se incremente la temperatura de entrada del gas natural a los reactores de desulfurización para garantizar la efectividad de estos como barrera de protección del

catalizador de reformado, en caso de alguna contaminación de gas con H<sub>2</sub>S en el proceso aguas arriba.

El análisis operacional es una metodología que permite facilitar la evaluación del desempeño de las unidades de proceso y permite identificar rápidamente las oportunidades de mejora para asegurar el margen más alto del desempeño de las unidades.

El análisis operacional mediante herramientas digitales debe ir acompañado con análisis operacional en campo para evidenciar alertas en el proceso que no son remotamente apreciables. Como, por ejemplo, la validación visual del estado y color de los hornos de los tubos de reformado.

### Referencias Bibliográficas

- Fisher, B.R. Johnson Matthey. (sf). *Steam Reformer Design, Maintenance and Inspection*. (Diseño del Reformador con vapor, Mantenimiento e inspección)
- Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., & Servili, S. (abr. de 2008). *Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: A review*, *Energy*, vol. 33, n.o 4, pp. 554-570,. Obtenido de doi: 10.1016/j.energy.2007.10.018
- Blumberg, K., Walsh, M., & Pera, C. (mayo, 2003). *Gasolina y Diesel de Bajo Azufre: La Clave para Disminuir las Emisiones Vehiculares*. Obtenido de [http://theicct.org/sites/default/files/Bajo\\_Azufre\\_ICCT\\_2003.pdf](http://theicct.org/sites/default/files/Bajo_Azufre_ICCT_2003.pdf)
- Congreso de la República. (2008). *Ley 1205 de 2008, "Por medio de la cual se mejora la calidad de vida a través de la calidad del diésel y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=31441>
- Cromarty, B.J. (May 1990). *Carbon Formation and Removal in Primary Reforming Process*. (*Formación de Carbón y remoción en procesos de reformación primaria*). ICI Customer Symposium Bangkok.
- Ecopetrol S.A. (2019). *Ecopetrol S.A. Metodología para el análisis operacional integral de la refinería de Barrancabermeja*. Obtenido de <https://files.ecopetrol.com.co/web/esp/agaesp2023/informe-integrado-gestion2022.pdf>
- Ecopetrol S.A. (2009). *Manual de Descripción de Procesos de la Unidad de Generación de Hidrógeno*.
- Fierro, J., Parola, V.L., Thomas, S., Guil-López, R., & Navarro, R. (2020). *Producción de hidrógeno a partir del gas natural sin emitir dióxido de carbono*. Instituto de catálisis y

- Petroleoquimica*, CSIC. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/2020/Hidrogeno%20a%20partir%20de%20GN%20s%20in%20contaminar.pdf>
- Galstyan, V. & Poli, N. & Comini, E. (2019). Highly Sensitive and Selective H<sub>2</sub>S Chemical Sensor Based on ZnO Nanomaterial. *Applied Sciences*. 9. 1167. 10.3390/app9061167.
- García, L. (2015). 4 - *Hydrogen production by steam reforming of natural gas and other nonrenewable feedstocks*, Editor(s): Velu Subramani, Angelo Basile, T. Nejat Veziroğlu, In *Woodhead Publishing Series in Energy, Compendium of Hydrogen Energy*, . Woodhead Publishi.
- García, L. (2015). 4 - Hydrogen production by steam reforming of natural gas and other nonrenewable feedstocks, Editor(s): Velu Subramani, Angelo Basile, T. Nejat Veziroğlu, In *Woodhead Publishing Series in Energy, Compendium of Hydrogen Energy*, Woodhead Publishing, Pag. 83-107.
- Matthey, J. (2015). *101 Cosas que pueden estar mal en tu Reformador Primario*. .
- Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (abril de 7 de 2021). *Resolución 40103, “Por la cual se establecen los parámetros requisitos de calidad del combustible Diésel, biocombustibles y gasolinas*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-40103-de-2021/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Hoja de Ruta de Hidrogeno en Colombia*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/es/micrositios/enlace-ruta-hidrogeno/>
- Osisoft. (2020). *Visualizar datos de PI System*.

Simpson, A., & Lutz, A. (dic. de 2007). *Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming*. Obtenido de Int. J. Hydrog. Energy, vol. 32, n.o 18, pp. 4811-4820: doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.08.025