

Optimización de la Gestión del Hidrógeno en Refinería Luján de Cuyo

Adrián Guzmán¹, Carlos Vera², Enrique Tarifa³

¹ YPF Tecnología, Baradero s/n, (1925) Ensenada, Prov. de Buenos Aires, Argentina, a.guzman@ypf.com

² INCAPE, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santiago del Estero 2654, (3000) Santa Fe, Argentina

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy, Gorriti N° 237, (4600) San Salvador de Jujuy, Argentina

Resumen - Una adecuada gestión del hidrógeno en las refinerías es de gran importancia para la rentabilidad del negocio. La red de hidrógeno de una refinería se compone de unidades productoras, unidades consumidoras, unidades de purificación, compresores y piping.

La configuración óptima de la red es aquella que permite minimizar los requerimientos de producción de hidrógeno para satisfacer las necesidades y maximizar el margen de la refinería.

Dada la gran complejidad física de una red de este tipo la configuración óptima no resulta evidente a simple vista. El presente trabajo describe el estudio de optimización de la red de hidrógeno de la Refinería Luján de Cuyo realizado mediante la aplicación de programación no lineal.

Mediante esta técnica avanzada de optimización es posible analizar virtualmente todas las interconexiones posibles teniendo en cuenta los beneficios y costos asociados.

Se presentan las alternativas de optimización identificadas y su correspondiente análisis de factibilidad técnico-económica.

Palabras claves: hidrógeno, red, refinería, optimización, programación no lineal

Abstract - A proper hydrogen management in a refinery is very important for the profitability of the business. The hydrogen network is composed of production units, consumer units, purification units, compressors and piping.

The optimum network configuration is the one that minimizes the hydrogen production requirements to satisfy the refinery needs, maximizing the profits.

Given the great physical complexity of this type of network, the optimum configuration is not evident at first sight. The present work describes the network optimization study for Lujan de Cuyo Refinery, performed through the application of non-linear programming.

With this advanced optimization technique, it is feasible to analyze virtually every possible connection, taking into account the resulting benefits and costs.

The optimization alternatives that were identified are presented, with their corresponding technical-economic feasibility analysis.

Keywords: hydrogen, network, refinery, optimization, non-linear programming

INTRODUCCIÓN

La red de hidrógeno de la Refinería Luján de Cuyo está compuesta actualmente por las siguientes unidades (entre paréntesis se indica el código asignado a cada unidad):

- Steam reforming (SMR): producción de hidrógeno por reformado con vapor de gas natural.
- Platforming (PLAT): reformado catalítico de nafta para incrementar su octano. En este proceso se genera hidrógeno.
- Isomax (ISOM): hidrocrqueo de cortes pesados para producir nafta y destilados medios.
- Booster (BOOS): sector de compresión de Isomax.
- Alquilación (ALQ): proceso en el cual se combina una isoparafina (isobutano) y una olefina (butileno) para producir un compuesto de mayor peso molecular, llamado alquilato, que se encuentra dentro del rango de destilación de las naftas.
- Isomerización (ISO): proceso que incrementa el octano de naftas livianas de Topping.
- Unifining I (UNI I): hidrotratamiento de naftas pesadas para acondicionar la carga a Platforming.
- Unifining II (UNI II): similar a Unifining I.
- HDS I (HDS I): hidrotratamiento de gasoil.
- Fuel gas (FG): sector de acumulación de fuel gas.
- Gascon (GCN): unidad de concentración de gases.
- Antorcha (ANT): eliminación por combustión de gases y líquidos.

En el presente trabajo a la red compuesta por estas unidades se la denomina “red actual”.

Adicionalmente, antes de finales de 2013 se completará la puesta en marcha de 3 nuevas unidades que se incorporarán a la red de hidrógeno de la refinería:

- HR III (HR III): producción de hidrógeno por reformado con vapor de gas natural o de naftas.
- HTN II (HTN II): hidrotratamiento de naftas de FCC (craqueo catalítico).
- HDS III (HDS III): hidrotratamiento de gasoil.

En el presente trabajo a la red que incorpora estas nuevas unidades se la denomina “red futura”.

Los datos operativos de la red actual, tanto instrumentales como analíticos, fueron tomados del período comprendido entre marzo de 2009 y marzo de 2011 de manera de cubrir un ciclo completo de Platforming entre dos regeneraciones de catalizador. El período seleccionado para realizar el análisis pinch y la optimización de la red fue el comprendido entre el 20 de julio y el 17 de agosto de 2009.

En el caso de las nuevas unidades que se incorporarán a la red, sus datos operativos fueron inferidos a partir de las ingenierías correspondientes.

El trabajo realizado se dividió en las siguientes etapas:

- Balance de hidrógeno de la red.
- Estudio de instrumentación y mediciones (orientado a identificar oportunidades de mejora con impacto en el error de los balances).
- Análisis pinch de la red de hidrógeno.
- Optimización por programación no lineal.

DESARROLLO

Balance de la red de hidrógeno actual

Se confeccionó un diagrama de bloques de la red de hidrógeno actual y se identificaron las corrientes. Este diagrama se presenta en la Fig. 1.

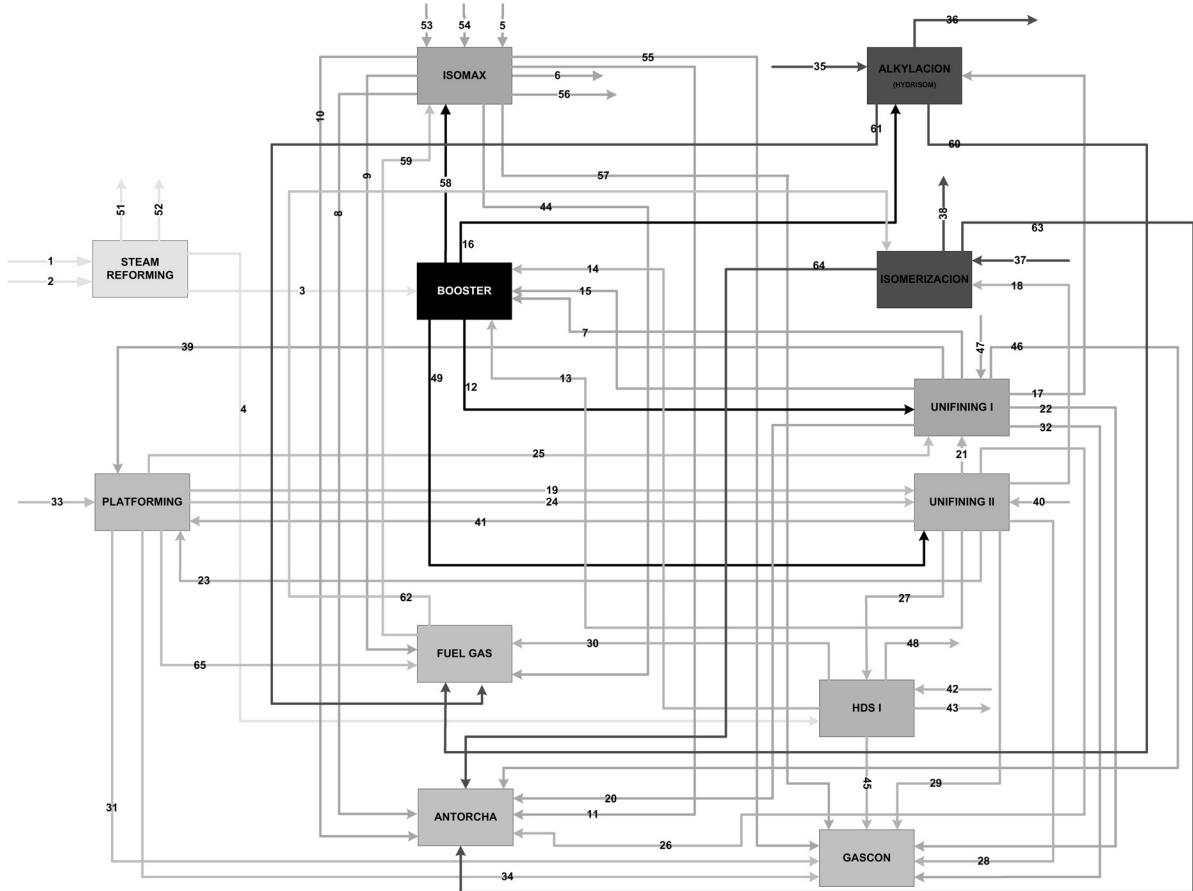


Figura 1 – Diagrama de bloques de la red de hidrógeno actual

Se realizó el balance de hidrógeno para cada una de las unidades involucradas. En cada caso el balance se realiza calculando la diferencia entre el hidrógeno que ingresa y el que abandona la unidad menos el hidrógeno consumido:

$$Entrada_{H_2} - Salida_{H_2} - Consumo_{H_2} = Error_{H_2} \tag{1}$$

donde $Error_{H_2}$ es el error del balance. El error también se reporta como un porcentaje de la entrada $Error\%_{H_2}$ (%):

$$Error\%_{H_2} = \frac{Error_{H_2}}{Entrada_{H_2}} \tag{2}$$

El consumo de hidrógeno fue calculado en función de las reacciones químicas involucradas en cada planta en particular (hidrogenación de olefinas, hidrogenación de aromáticos, craqueo, eliminación de heteroátomos, etc.), a partir de los datos de composición química de las corrientes de entrada y salida.

En algunos casos fue necesario estimar la composición de corrientes para las cuales no se disponía de

mediciones, por ejemplo mediante cálculos de equilibrio termodinámico.

El contenido de hidrógeno disuelto en las corrientes líquidas fue estimado aplicando la ley de Henry.

Para cada unidad se elaboró una planilla Excel con macros que permite seleccionar un período de tiempo y realizar el balance de forma automática.

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

	Unifining I	Unifining II	Isomerización	Isomax	Platforming	HDS I
Error en el balance de H ₂	1.11%	0.73%	5.05%	3.93%	7.40%	3.10%

Tabla 1 – Balance de hidrógeno

Estudio de instrumentación y mediciones

Algunas componentes del error del balance son sistemáticas y otras son aleatorias. Entre estas últimas se consideraron los errores de medición de las variables involucradas en los balances y las variaciones de dichas variables provocadas por los estados transitorios del proceso. Ambas componentes fueron atenuadas empleando valores promedios en los balances (i.e., balances con valores promediados). La promediación atenúa las citadas variaciones; mientras mayor sea el periodo de promediación, y por lo tanto mayor sea la cantidad de valores promediados, mayor será la atenuación. De esta manera el error de los balances promediados puede ser acotado al grado que se desee por medio de la selección adecuada del tamaño del periodo de promediación. Por el contrario, esto no es posible para los balances realizados con valores instantáneos. Por ese motivo es importante estimar el efecto que las variaciones consideradas tienen sobre esos balances. Esta información permite identificar las variables críticas, a las cuales se debe prestar especial atención. Ello se puede realizar por medio de un estudio de sensibilidad. En el presente trabajo se presenta el estudio de sensibilidad de los balances de dos unidades: Unifining I (hidrotratamiento de naftas) e Isomax (hidrocrqueo).

Un estudio de sensibilidad sobre un sistema dado determina la influencia que las variables de entrada -variables independientes- tienen sobre las variables de salida analizadas -variables dependientes- (Saltelli et al., 2004). Para realizar el estudio de sensibilidad del balance de un sector se definen como variables de entrada a todas aquellas cuyos valores se fijan en las hojas de entrada de datos del correspondiente libro de Excel (i.e.: caudales, temperaturas, presiones, composiciones, etc.) y como variables de salida se toman a aquellas cuyos valores se reportan en la hoja de resultado de Balance (i.e.: Entrada, Salida, Consumo, Generación, Error, Error%).

La repetibilidad es la precisión asociada a varios análisis realizados por el mismo operador sobre la misma muestra y con el mismo método en un periodo corto de tiempo. La reproducibilidad es la precisión asociada a diferentes análisis donde cada análisis es realizado por un laboratorio diferente sobre la misma muestra y usando el mismo método. Para el caso que se está estudiando la medida más apropiada de la precisión es la repetibilidad.

La repetibilidad de las medidas de laboratorio fue obtenida de “Precision and Bias” de los métodos ASTM específicos, mientras que para las mediciones instrumentales se recurrió a las especificaciones técnicas de los instrumentos correspondientes.

Para implementar el estudio de sensibilidad se realizaron simulaciones de Monte Carlo utilizando 10.000 iteraciones. A partir de los valores de repetibilidad asociados a cada variable de entrada, en cada iteración el programa genera un valor aleatorio para cada variable de entrada y calcula todas las variables de salida. Finalmente procesa los datos producidos y brinda diferentes reportes.

De los dos tipos de estudios posibles, sensibilidad en balance promedio o balance instantáneo, se escogió

el estudio de sensibilidad del balance instantáneo ya que es el más afectado por los errores de medición. Si bien el balance con valores promedios es también afectado por los errores de medición, este efecto puede ser atenuado hasta el grado que se desee aumentando el intervalo de promediación: si σ_x es la desviación estándar de la variable x , entonces la desviación estándar σ_{xm} correspondiente a la variable x_m que resulta de promediar m muestras de x es:

$$\sigma_{xm} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{m}} \quad (3)$$

De esta ecuación es evidente que al trabajar con promedios se reduce la varianza del resultado.

A continuación se presentan los resultados de los estudios de sensibilidad realizados en las unidades de Unifining I e Isomax.

Estudio de sensibilidad en Unifining I

En la Tabla 2 se presentan los coeficientes de regresión estandarizados correspondientes al balance en Unifinnig I. Las variables de entrada están ordenadas de acuerdo a la importancia que tienen sobre el Error_{H2} %. En la tabla se presentan las seis primeras variables. El ID es el número de la corriente a la cual está asociada la variable de entrada analizada. Las gráficas incluidas en las celdas corresponden a los diagramas de dispersión asociados a la variable de salida de la correspondiente columna con respecto a la variable de entrada de la correspondiente fila. Debido a que R_y^2 es prácticamente uno los coeficientes de regresión estandarizados son una adecuada medida de la sensibilidad.

Los resultados indican que las cuatro variables que introducen mayor error (las primeras de la tabla) son las siguientes, en orden de importancia:

- Caudal de make-up de hidrógeno de la unidad (medido por brida orificio).
- Caudal de venteo de hidrógeno del separador de alta presión de la unidad (medido por brida orificio).
- Índice de bromo de la nafta alimentada a Unifining I (insaturación relativa de la carga).
- Caudal de LPG que sale del acumulador de cabeza del stripper (medido por brida orificio).

Estos resultados también pueden visualizarse mediante un gráfico de tornado en la Fig. 2.

Estudio de sensibilidad en Isomax

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la unidad de Isomax.

Las variables con mayor impacto sobre el error de balance, en orden decreciente de importancia, son:

- Caudal de gasoil de hidrocrqueo (medido por brida orificio).
- Caudal de nafta de hidrocrqueo (medido por brida orificio).
- Caudal de kerosene de hidrocrqueo (medido por brida orificio).

Luego siguen con una menor contribución a la incertidumbre del error:

• Caudal de alimentación (medido por caudalímetros másicos en cada rama de alimentación y totalizado para dar la corriente 103).

- Caudal de hidrógeno de make-up de la unidad.

En la Tabla 3 y en la Fig. 3 se presentan más detalles.

Conclusiones generales del estudio de sensibilidad

Además de los resultados presentados anteriormente se obtuvieron las siguientes conclusiones generales:

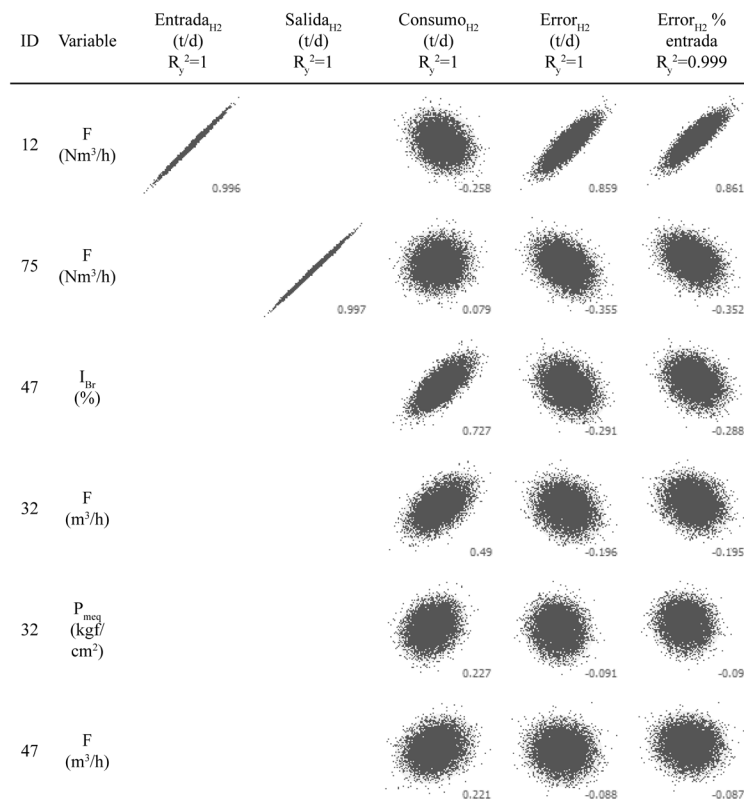


Tabla 2 - Coeficientes de regresión estandarizados correspondientes al balance en Unifining I. Las variables de entrada están ordenadas de acuerdo a la importancia que tienen sobre el Error_{H2} %

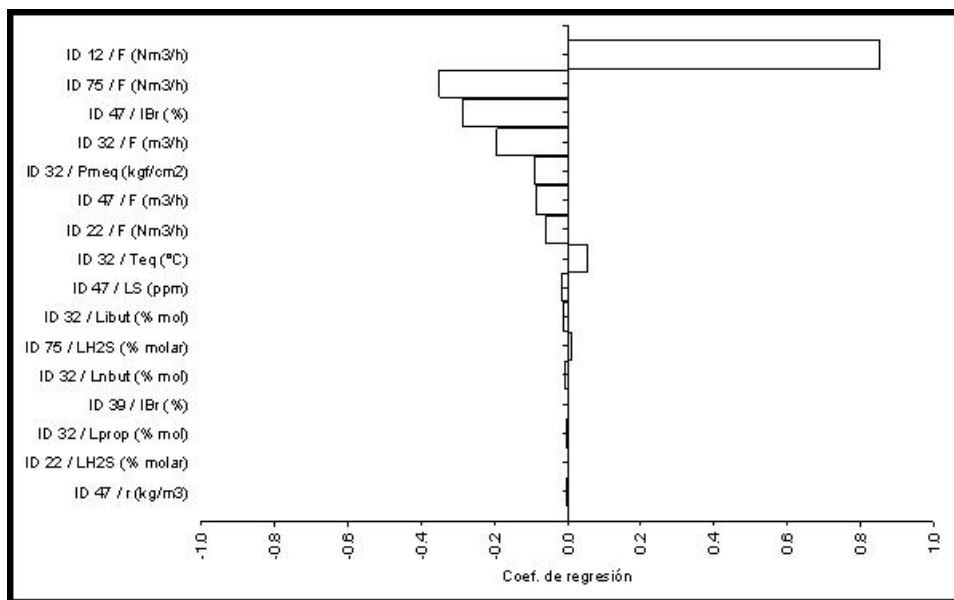


Figura 2 – Gráfico de tornado de los coeficientes de regresión estandarizados correspondientes al Error_{H2} % del balance en Unifining I

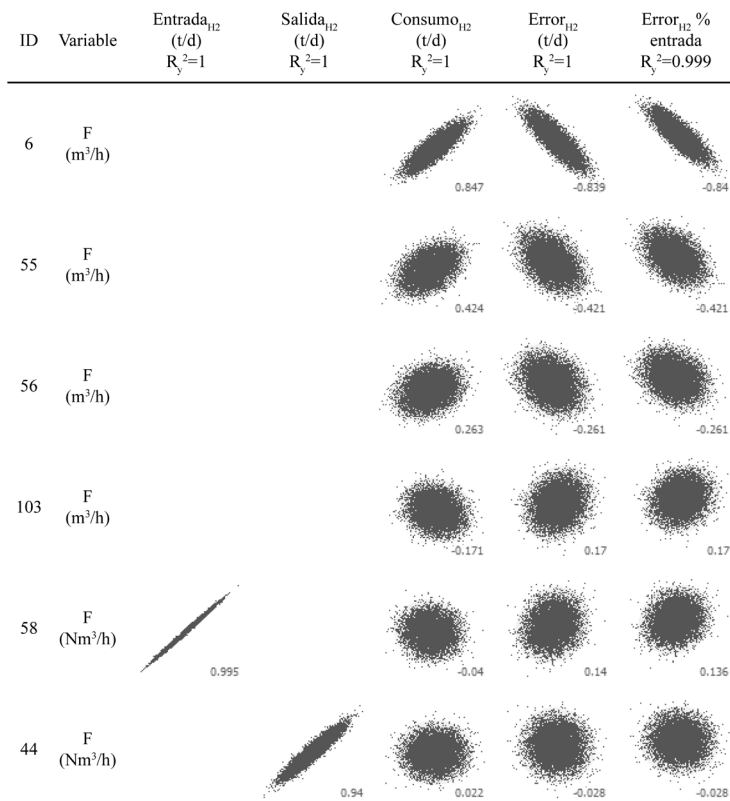


Tabla 3 - Coeficientes de regresión estandarizados correspondientes al balance en Isomax. Las variables de entrada están ordenadas de acuerdo a la importancia que tienen sobre el Error_{H2} %

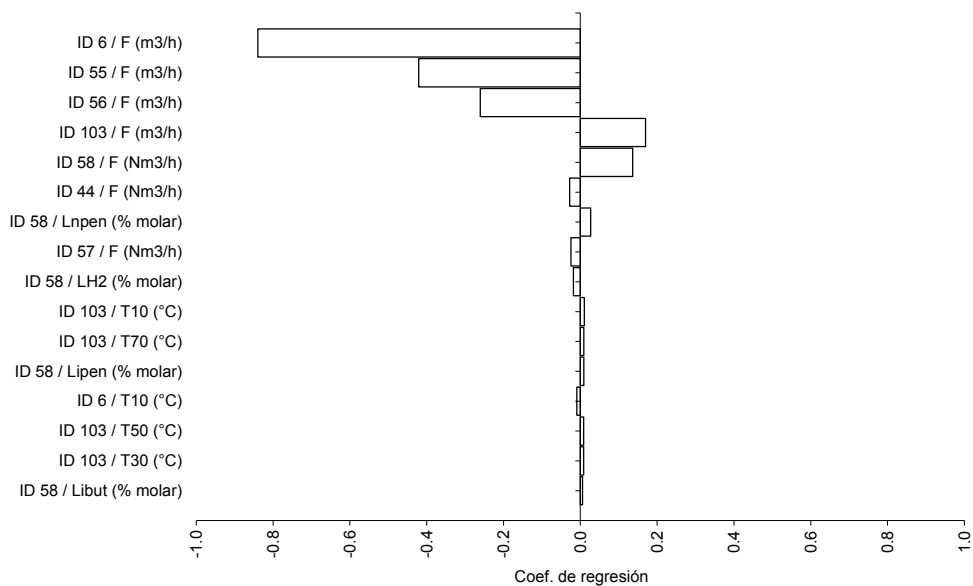


Figura 3 - Gráfico de tornado de los coeficientes de regresión estandarizados correspondientes al Error_{H2} % del balance en Isomax

- De las variables necesarias para la corrección de caudal de bridas orificio la mayor incertidumbre la introduce la composición, mientras que los errores de presión y temperatura son despreciables. La incertidumbre del coeficiente de corrección del caudal está acotada en un rango pequeño. Sin embargo el valor en sí de la corrección es importante. De no realizarse la corrección por ausencia de datos de calibración el error puede ser tan grande como 20%.

- Los caudalímetros másicos (Coriolis o ultrasónicos) presentan numerosas ventajas respecto de las placas de orificio: no requieren mediciones auxiliares de densidad (o composición), presión y temperatura. Para realizar la compensación no necesitan de recalibración periódica debido al desgaste del orificio y la deriva de los medidores de presión y temperatura. No son afectados por cambios súbitos en la velocidad del fluido. Se pueden calibrar con agua. Se recomendó analizar el reemplazo de placas orificio por este tipo de caudalímetros en ciertas corrientes para mejorar la precisión de los balances.

- Se identificaron algunas placas orificio sin datos de calibración y se recomendó su calibración.

- Se identificó una placa orificio calibrada para una composición de gas alejada de la real en la corriente medida y se procedió a su recalibración.

- Se identificó una placa orificio con un significativo error sistemático de medición debido a un problema instrumental y se procedió a su reparación.

- Se recomendó implementar mediciones analíticas o incrementar su frecuencia en ciertos puntos con el fin de mejorar la calidad de los balances de hidrógeno.

Análisis pinch de la red de hidrógeno

Básicamente el pinch de hidrógeno es la pureza a la cual la red de hidrógeno no posee ni excedente ni déficit. El pinch muestra el cuello de botella o cuánto hidrógeno puede ser recuperado y reusado. El enfoque tradicional al pinch de hidrógeno no considera la presión de hidrógeno pero el análisis sí provee un requerimiento teórico mínimo de hidrógeno (Alves et al., 2002, Bealins et al., 2002, Foo et al., 2006, Zhao et al., 2006). Además brinda una visión importante del ahorro de hidrógeno y de la purificación de off-gas en la refinería. Los cambios necesarios en la red real para alcanzar este mínimo pueden ser tan simples como la apertura y cierre de algunas válvulas, o tan costosos como la instalación de un compresor multietapa para hacer posible la conexión de una fuente de baja presión a un sumidero de alta. Un cambio intermedio puede ser la implementación de conexiones en cascadas entre la purga de una unidad y el make-up de otra (Zagoria et al., 2003).

Los primeros métodos de análisis de pinch de hidrógeno son gráficos y de naturaleza iterativa requiriendo una suposición inicial acerca del caudal de hidrógeno fresco. El análisis involucra la elaboración de una gráfica de pureza en función del caudal para todas las fuentes y sumideros. Este gráfico se llama fuente-demanda o curva compuesta de hidrógeno. El área comprendida entre la fuente y la demanda compuestas produce el diagrama de excedente (surplus diagram). Para identificar el punto de pinch de hidrógeno el procedimiento gráfico debe ser repetido varias veces con diferentes caudales de hidrógeno fresco hasta que no hay ni excedente ni déficit.

En el trabajo realizado se empleó una planilla automática, implementada en Excel, que permite al usuario identificar en forma inmediata y precisa la pureza del hidrógeno en el punto de pinch y los caudales mínimos que deben proveer las fuentes de hidrógeno sin necesidad de una construcción gráfica iterativa. La planilla representa todas las corrientes con la misma pureza separadamente como corrientes individuales, puede manejar problemas de pinch-múltiple fácilmente y es eficiente para estudiar los efectos cuantitativos de caudales variables de las fuentes o del agregado de unidades de purificación. Esta planilla de cálculo es una extensión de un trabajo realizado recientemente sobre la optimización de sistemas de agua (Liu et al., 2004) y una adaptación del trabajo presentado por Nelson y Liu en 2008.

Análisis pinch de la red actual

En las Figs. 4 y 5 se presentan los gráficos fuente-demanda y de excedente para la red actual de la Refinería de Luján de Cuyo.

Se observa que el punto de pinch corresponde a un excedente prácticamente nulo (0,11 Nm³/h) con una pureza de demanda relativamente alta del 81,8%. Esto significa que todo el hidrógeno con pureza superior al valor del pinch ya está siendo consumido, por lo tanto no pueden realizarse ahorros de hidrógeno asociados a purezas de este valor o superiores. Por otro lado también indica que todo el hidrógeno excedente está disponible a valores menores que el valor de oferta en el pinch, es decir, menores del 81,6%. El excedente total de hidrógeno acumulado es de casi 3000 Nm³/h, con purezas variables debajo del pinch hasta un mínimo de 26,3%.

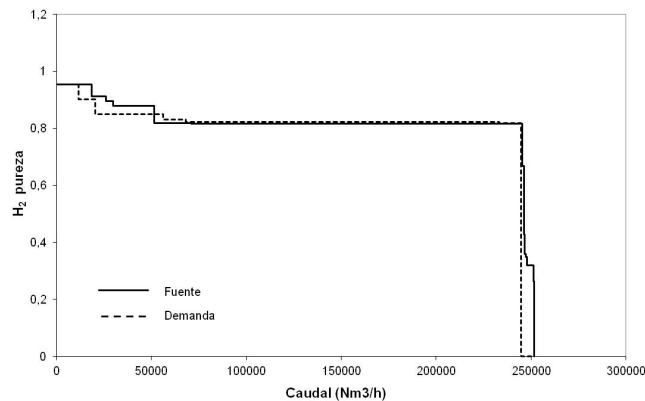


Figura 4 – Gráfico fuente-demanda red actual

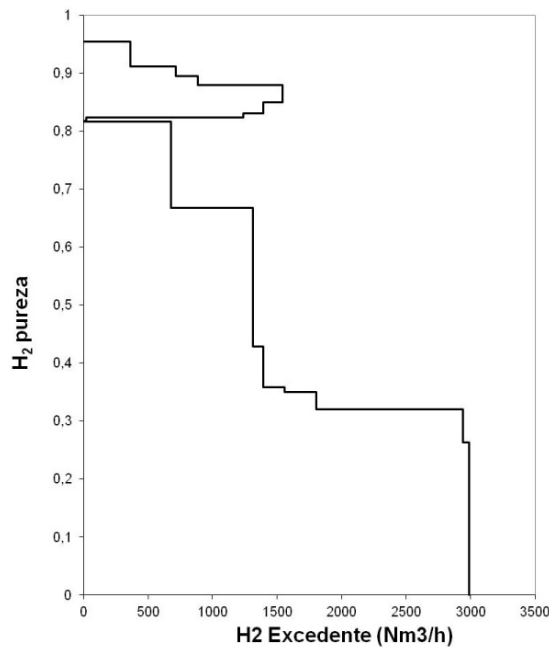


Figura 5 – Gráfico excedente red actual

Análisis pinch de la red futura

En las Figs. 6 y 7 se presentan los gráficos fuente-demanda y de excedente para la red futura de la Refinería de Luján de Cuyo.

El punto de pinch en la red futura corresponde a un excedente de 491 Nm³/h con una pureza de demanda relativamente alta del 81,8%. Este excedente de 491 Nm³/h en el pinch parece previsible ya que la oferta de la nueva unidad HR III no sería totalmente consumida por los nuevos consumidores HDS III y HTN II. Esto puede resolverse fácilmente reduciendo la producción de hidrógeno en HR III hasta eliminar este excedente. Otra opción sería utilizar este excedente para aumentar la producción o procesar cargas más severas en alguna unidad consumidora, por ejemplo Isomax.

Si se reduce la producción de HR III para anular el excedente en el punto pinch todo el hidrógeno con pureza superior al valor del pinch ya estaría siendo consumido.

El excedente total de hidrógeno de la refinería se reduciría así de los 5760 Nm³/h de hidrógeno representados en el gráfico anterior a 5269 Nm³/h.

Este excedente está disponible a valores menores que el valor de oferta en el pinch, es decir, menores del 81,6 %.

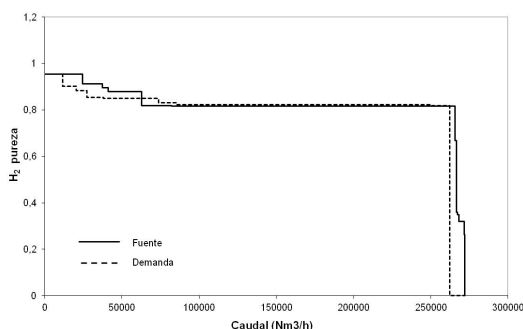


Figura 6 – Gráfico fuente-demanda red futura

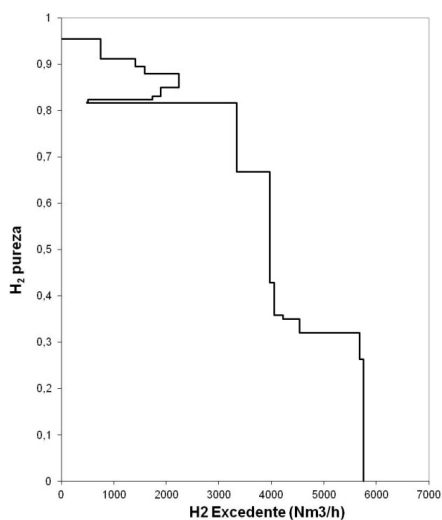


Figura 7 – Gráfico excedente red futura

Conclusiones generales del análisis pinch

Como se ha visto, el análisis pinch permite cuantificar el excedente total de hidrógeno de la red. Este valor constituye la cota máxima teórica de posibles ahorros en la red y aunque en la práctica sea inalcanzable, es de utilidad para fijar una referencia.

La pureza del punto pinch indica la pureza a la cual la red de hidrógeno no posee ni excedente ni déficit. Los excedentes de la red se encuentran por debajo de la pureza de este punto. A partir del análisis de los segmentos del gráfico de excedentes que los representan pueden identificarse oportunidades de recuperación de corrientes mediante purificación.

Sin embargo el análisis pinch no tiene en cuenta presiones ni restricciones por contaminantes, por lo que estos aspectos deben ser analizados manualmente cuando se plantean posibles alternativas de optimización de la red a partir de sus resultados.

Optimización por programación no lineal

Un modelo de optimización tiene como objetivo determinar la mejor solución para un problema dado. El modelo de optimización está compuesto por variables de decisión, una función objetivo y las restricciones. Las variables de decisión son las variables del problema que pueden variarse con el fin de encontrar la mejor solución. En esta búsqueda las variables de decisión deben respetar las condiciones impuestas por las restricciones del problema. La bondad de las alternativas exploradas es medida por la función objetivo. La mejor alternativa será aquella que minimiza o maximiza la función objetivo.

La función objetivo es un elemento fundamental en un problema de optimización matemática. Su complejidad depende tanto del número y estructura de los objetivos parciales buscados como del tipo de programación matemática utilizada.

La optimización de la red de hidrógeno de la Refinería de Luján de Cuyo se realizó únicamente para la red futura, incorporando las nuevas plantas que entrarán en servicio en los próximos meses.

Modelo para optimizar la demanda de hidrógeno producido por reformado con vapor

Como se indicó en el punto 2, la producción de hidrógeno en la red futura de la Refinería Luján de Cuyo se realiza en dos tipos de unidades:

- Reformado catalítico de naftas.
- Reformado con vapor de gas natural o naftas.

La unidad de reformado catalítico de naftas (Platforming) también tiene como objetivo la producción de nafta de elevado octanaje por lo que su nivel de utilización no puede manipularse únicamente en función de la necesidad de producción de hidrógeno.

Las unidades de reformado con vapor son las que pueden utilizarse para ajustar la producción total de hidrógeno de la refinería en función de las demandas de la red. Por lo tanto la función objetivo a minimizar será la producción de hidrógeno en estas unidades Fg , y las restricciones tendrán en cuenta las presiones y las capacidades de los compresores para determinar la factibilidad de los flujos en la red. El modelo determinará las conexiones a realizar junto con los flujos y las purezas de todas las corrientes de la red que hacen mínima la demanda de hidrógeno. En condiciones ideales la demanda podría ser reducida hasta la cota mínima determinada por el análisis pinch.

La implementación del modelo requiere modelar la red como una superestructura compuesta por nodos fuente y nodos sumidero.

Se define N como el conjunto de nodos fuentes y sumideros pertenecientes a la red.

La Fig. 8 presenta un esquema simplificado de una unidad consumidora de hidrógeno. En este diagrama se define la correcta localización de los nodos fuentes y sumideros.

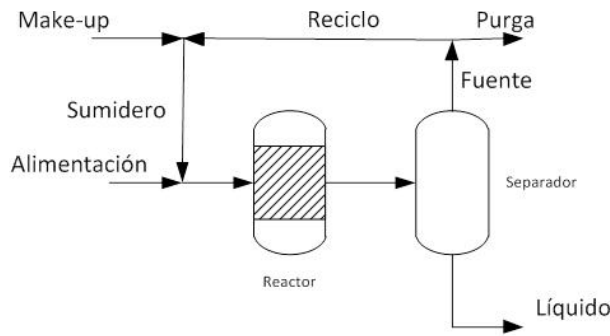


Figura 8 - Esquema simplificado de una unidad consumidora de hidrógeno, en el que figura la localización correcta del nodo fuente y el nodo sumidero

Cada fuente consta de un núcleo de proceso y un divisor de salida (Fig. 9) mientras que cada sumidero está conformado por un mezclador a la entrada y un núcleo de proceso (Fig. 10). Cada nodo así definido tiene los siguientes atributos:

- Tipo:
 - o FUE: fuente
 - o SUM: sumidero
- Equipo: Código identificador del equipo al que pertenece el nodo.
- Clase: define el tipo de equipo al que pertenece el nodo, puede ser:
 - o UP: unidad de proceso

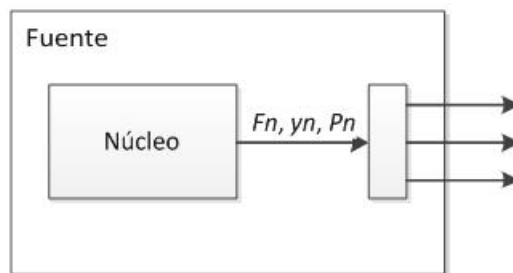


Figura 9 - Estructura de un nodo fuente

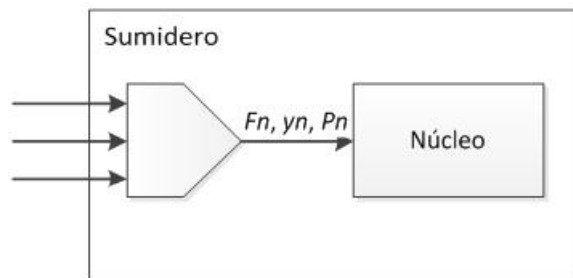


Figura 10 - Estructura de un nodo sumidero

o COM: compresor. Se modela como la combinación de un sumidero y una fuente. Esto es, tiene una única corriente de entrada y una única corriente de salida.

o SEP: separador

o GEN: generador puro, sólo tiene nodos fuentes.

o CON: consumidor puro, sólo tiene nodos sumideros.

• P_n : presión del núcleo (kgf/cm^2).

• F_n : flujo de la corriente conectada al núcleo (Nm^3/h).

• yn : pureza de H_2 de la corriente conectada al núcleo (fracción molar).

• Femax: flujo máximo de entrada (máximo compatible con la capacidad del equipo o unidad en cuestión). Este atributo sólo es válido para los sumideros de equipos Clase COM.

A partir del conjunto N se definen los siguientes subconjuntos:

• CF: conjunto de nodos fuentes.

• CS: conjunto de nodos sumideros.

Los datos requeridos por las fuentes son los siguientes:

• De equipos clase UP: P_n, F_n, yn

• De equipos clase COM: P_n

• De equipos clase SEP: P_n, F_n, yn

• De equipos clase GEN: P_n, yn

Los datos requeridos por los sumideros son los siguientes:

• De equipos clase UP: P_n, F_n, yn

• De equipos clase COM: $P_n, Femax$

• De equipos clase SEP: P_n, F_n, yn

• De equipos clase CON: P_n

Por conveniencia se define el conjunto derivado FxS cuyos elementos son pares ordenados (i, j) del tipo fuente-sumidero:

$$(i, j) \in FxS \Leftrightarrow i \in CF, j \in CS \quad (4)$$

Los elementos de este conjunto tienen los siguientes atributos:

• F : flujo de la corriente que va de la fuente i al sumidero j (Nm^3/h).

• y : pureza de H_2 de la corriente que va de la fuente i al sumidero j (fracción molar).

También se define el conjunto derivado $FxSP$ cuyos elementos son elementos de FxS que representan a conexiones entre nodos que no pertenecen a un mismo equipo y que son posibles por la diferencia de presión existente entre el origen y el destino de la conexión:

$$(i, j) \in FxSP \Leftrightarrow (i, j) \in FxS \wedge (Equipo_i \neq Equipo_j) \wedge (P_n_i \geq P_n_j) \quad (5)$$

Es decir, se definen pares ordenados de fuente-sumidero donde la primera condición evita la conexión de la fuente de un equipo con el sumidero del mismo equipo y la última condición selecciona las conexiones que

son factibles por las presiones de los nodos conectados.

La función objetivo es la demanda total Fg de servicio de hidrógeno. El problema de optimización se plantea para minimizar esta función objetivo variando los flujos de hidrógeno existentes entre los nodos de la red. El planteo matemático correspondiente es el siguiente:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{F_{i,j}, y_{i,j}, F n_k, F n_l, y n_i, F g} F g \\ & k \in N \mid Clase_k = \text{GEN}, l \in N \mid (Clase_l = \text{CON}) \vee (Clase_l = \text{COM}) \end{aligned} \tag{6}$$

La función objetivo se define como sigue:

$$Fg = \sum_{i \in CF \mid Clase_i = \text{GEN}} F n_i y n_i \tag{7}$$

Por otra parte se deben plantear los balances de masa en el divisor de cada fuente k y en el mezclador de cada sumidero l :

$$\sum_{(i,j) \in FxSP \mid i=k} F_{i,j} = F n_k \quad k \in CF \tag{8}$$

$$\sum_{(i,j) \in FxSP \mid j=l} F_{i,j} = F n_l \quad l \in CS \tag{9}$$

Las purezas de las corrientes de intercambio deben cumplir con la siguiente restricción:

- Definición de fracción molar:

$$0 \leq y_{i,j} \leq 1 \quad (i,j) \in FxSP \tag{10}$$

- Balance de hidrógeno en los divisores de las fuentes:

$$y n_i = y_{i,j} \quad (i,j) \in FxSP \tag{11}$$

- Balance de hidrógeno en los mezcladores de los sumideros:

$$\sum_{(i,j) \in FxSP \mid j=l} F_{i,j} y_{i,j} = F n_l y n_l \quad l \in CS \tag{12}$$

Para los compresores se plantean las siguientes restricciones adicionales:

$$Fn_i = Fn_j$$

$$(i, j) \in FxS \mid (Equipo_i = Equipo_j) \wedge (Clase_i = COM) \quad (13)$$

$$yn_i = yn_j$$

$$(i, j) \in FxS \mid (Equipo_i = Equipo_j) \wedge (Clase_i = COM) \quad (14)$$

$$Fn_j \leq Femax_j \quad j \in CS \mid Clase_j = COM \quad (15)$$

También se deben anular todas aquellas conexiones que son imposibles:

$$F_{i,j} \leftarrow 0 \quad (i, j) \in FxS \mid (i, j) \notin FxSP \quad (16)$$

$$y_{i,j} \leftarrow 0 \quad (i, j) \in FxS \mid (i, j) \notin FxSP \quad (17)$$

Por el mismo motivo, para todos los nodos que no son entradas de compresores se debe anular Femax:

$$Femax_k \leftarrow 0 \quad k \in N \mid (k \notin CS) \vee (Clase_k \neq COM) \quad (18)$$

Por último se fijan las purezas de todas las corrientes que nacen en fuentes que tienen purezas fijas:

$$y_{i,j} \leftarrow yn_i \quad (i, j) \in FxSP \mid (Clase_i \neq COM) \quad (19)$$

La solución de este problema puede generar flujos sin sentido práctico. Dichos flujos podrían ser automáticamente eliminados si se incorpora a la función objetivo el costo de compresores y de tuberías. Sin embargo, una alternativa menos compleja para eliminar esos flujos es minimizar la cantidad de conexiones de la red, como se explica en la sección siguiente.

Modelo para minimizar el número de conexiones de la red

Con el objeto de eliminar los flujos espurios mencionados se debe resolver nuevamente el modelo de optimización planteado en la sección anterior, pero esta vez adoptando la siguiente función objetivo y restricción adicional:

$$\text{Min}_{F_{i,j}, y_{i,j}, Fn_k, Fn_l, yn_i, yn_l, Fg} \sum_{(i,j) \in FxSP} \text{sign}(F_{i,j}) \quad (20)$$

$$k \in N \mid Clase_k = GEN, l \in N \mid (Clase_l = CON) \vee (Clase_l = COM)$$

$$Fg \leq Fg_{\min} \quad (21)$$

donde Fg_{min} es la demanda mínima de hidrógeno determinada por el modelo de la sección anterior y $sign(x)$ es la función signo de x . Como todos los flujos $F_{i,j}$ son no negativos, la función objetivo representa la cantidad de corrientes que emplea la solución. Lo que se desea es minimizar esta cantidad manteniendo el consumo mínimo conseguido en la primera solución; para ello se agrega la restricción adicional.

Modelo para minimizar el número de conexiones de la red

Los modelos presentados en las dos secciones anteriores no consideran las longitudes de las tuberías requeridas para la implementación de la solución. En esta sección se modifica el modelo de la sección “Modelo para optimizar la demanda de hidrógeno producido por reformado con vapor” adoptando la siguiente función objetivo y restricción adicional:

$$\text{Min}_{F_{i,j}, y_{i,j}, Lt_{i,j}, F_{n_k}, F_{n_l}, y_{n_l}, Fg} \sum_{(i,j) \in FxSP} \text{sign}(F_{i,j}) Lt_{i,j} \tag{22}$$

$k \in N \mid Clase_k = GEN, l \in N \mid (Clase_l = CON) \vee (Clase_l = COM)$

$$Fg \leq Fg_{min} \tag{23}$$

donde $Lt_{i,j}$ es la longitud de la tubería que conecta el nodo i con el nodo j , Fg_{min} es la demanda mínima de hidrógeno determinada por el modelo de la sección “Modelo para optimizar la demanda de hidrógeno producido por reformado con vapor” y $sign(x)$ es la función signo de x . Como todos los flujos $F_{i,j}$ son no negativos la función objetivo representa la longitud total de tuberías empleadas por la solución. Lo que se desea es minimizar esta longitud total manteniendo el consumo mínimo conseguido en la primera solución; para ello se agrega la restricción adicional.

Las longitudes $Lt_{i,j}$ se pueden estimar mediante la siguiente expresión (distancia Manhattan):

$$L = |\Delta x| + |\Delta y| + |\Delta z| \tag{24}$$

donde Δx es la distancia en la coordenada x entre el punto final e inicial de la tubería, Δy es la distancia en la coordenada y entre el punto final e inicial de la tubería y Δz es la distancia en la coordenada z entre el punto final e inicial de la tubería. Para ello es necesario contar con las coordenadas de los nodos como datos. Formalmente para ampliar el modelo se realizan las siguientes acciones:

- Se define Lt como atributo adicional de los elementos del conjunto FxS .
- Se define cx (coordenada x del nodo) y cy (coordenada y del nodo) como atributos adicionales del conjunto N . Para simplificar el problema no se considera la coordenada z (altura).

La longitud de cada tramo se calcula luego de la siguiente manera (distancia Manhattan):

$$Lt_{i,j} = |cx_i - cx_j| + |cy_i - cy_j| \quad (i, j) \in FxS \tag{25}$$

Frontera de Pareto Lt vs. Fg

Una vez identificada la solución óptima como se indica en las secciones anteriores, puede resultar de interés explorar otras variantes, para lo cual se plantea utilizar la frontera de Pareto.

Para el caso en estudio la frontera de Pareto es una curva en el plano $Fg-Lt$. Para cualquier punto de esa curva se cumple que Fg es la mínima demanda posible para la red que tiene una longitud total de tuberías Lt y Lt es la mínima longitud de tubería para la red que tiene una demanda Fg .

Para que Fg tenga efecto sobre Lt es necesario relajar la restricción de pureza en los nodos sumideros para que puedan admitir una alimentación de igual o mayor pureza. Ello se logra reemplazando en el modelo de la sección “Modelo para optimizar la demanda de hidrógeno producido por reformado con vapor” la ecuación correspondiente por la siguiente:

$$\sum_{(i,j) \in FxSP|j=l} F_{i,j} y_{i,j} \geq F n_l y n_l \quad l \in CS \quad (26)$$

Cabe destacar que al realizar esta modificación las unidades de proceso pueden recibir una alimentación de mayor pureza que la requerida. El modelo no considera el efecto que esta mayor pureza tiene sobre la producción y las corrientes de salida. Tampoco considera el efecto de esta mayor pureza sobre las capacidades de los compresores.

Para obtener cada punto de la frontera de Pareto se procede de la siguiente forma:

- Se resuelve el problema de optimización planteado en la sección “Modelo para optimizar la demanda de hidrógeno producido por reformado con vapor” para minimizar la demanda de hidrógeno. De esta manera se obtiene el valor Fg_{min} .

- Se propone un valor de demanda Fg_{test} mayor que Fg_{min} .

- Se resuelve el problema de optimización planteado en la sección “Modelo para minimizar el número de conexiones de la red” para conseguir la mínima longitud total de tuberías Lt_{Pareto} con la condición de no superar la demanda Fg_{test} propuesto anteriormente.

- Se resuelve nuevamente el problema de optimización planteado en la sección “Modelo para optimizar la demanda de hidrógeno producido por reformado con vapor” con el agregado de la siguiente restricción. El consumo mínimo obtenido como resultado de resolver este problema es Fg_{Pareto} .

$$\sum_{(i,j) \in FxSP} \text{sign}(F_{i,j}) L_{t,i,j} \leq L_{t_{Pareto}} \quad (27)$$

- Se incorpora a la gráfica de la frontera de Pareto el punto $(Fg_{Pareto}, Lt_{Pareto})$.

El estudio de la frontera de Pareto permite determinar si la disminución de la longitud total de tuberías provocada por un aumento de la demanda justifica un análisis económico. Si fuera así se puede realizar un análisis económico para el punto de interés de la frontera de Pareto.

Incorporación de unidades de purificación

La optimización de una red de hidrógeno puede requerir la incorporación de unidades de purificación que permitan incrementar la pureza de determinadas corrientes permitiendo su aprovechamiento en unidades con mayores requerimientos de pureza que los disponibles en dichas corrientes.

Por eso se incorporó al modelo de optimización el modelado de unidades de este tipo.

Las dos tecnologías más difundidas actualmente para unidades de purificación son la PSA (Pressure Swing Adsorption) y la tecnología de membranas.

En la Tabla 4 se resumen sus principales características.

En función de estas características se seleccionó la tecnología PSA para su modelado ya que presenta un

menor requerimiento de presión en su alimentación y una menor pérdida de carga.

Propiedad	PSA	Membrana
Pureza mínima de carga, %	40	25
Pureza máxima del producto, %	99.9999	98
Pureza típica del producto, %	99.0-99.9	70-98
Máximo recupero de H ₂ , %	90	95
Presión de la alimentación, kgf/cm ²	10-60	14-140
Presión del producto	≈ entrada	<< entrada
Presión del residuo, kgf/cm ²	< 2	-----
Temperatura máxima, °C	-----	90 (polimérica)
Flexibilidad de operación	Muy alta	Alta
Facilidad de expansión	Promedio	Alta
Recupero de subproductos	No	Sí

Tabla 4 - Características principales de membranas y unidades PSA para la purificación de corrientes con hidrógeno

Incorporación de bypass y compresores

El modelo desarrollado permite simular:

- **Compresores con presiones desconocidas:** Si bien el modelo de optimización hasta aquí descrito ya considera compresores, tanto la presión de entrada como la presión de salida deben ser ingresadas como datos. Para incorporar nuevos compresores a la red como parte de la optimización es necesario que el modelo pueda considerar compresores cuyas presiones puedan ser manejadas por el optimizador.

- **Mezcladores:** Un notable ahorro de longitud de tubería puede lograrse cuando es posible mezclar en una misma tubería varias corrientes que tienen el mismo destino. Como no se conoce de antemano cuáles corrientes se mezclarán y el destino de la mezcla la presión de un equipo de este tipo es una variable de decisión.

- **Divisores:** otro ahorro de longitud de tubería puede lograrse cuando es posible enviar por una única tubería una corriente que alimentará a varios destinos. Para ello es necesario contar con un equipo divisor al final de la tubería que distribuya las corrientes a los destinos. Nuevamente, como no se conoce de antemano cuáles destinos se alimentarán y el origen de la alimentación la presión de un equipo de este tipo es una variable de decisión.

- **Bypass en purificadores:** Este bypass mezcla la alimentación de una unidad purificadora con la correspondiente corriente de producto para producir una nueva corriente con pureza igual a la del destino seleccionado. De esta forma el destino seleccionado recibe la pureza requerida sin necesidad de conexiones adicionales.

Para implementar los nuevos aspectos comentados se definió una nueva clase de equipos: COMP. Un equipo de la clase COMP es un compresor cuyas presiones de entrada y salida son variables de decisión. Esta clase de equipos también se emplea para modelar mezcladores y divisores. Un bypass se puede modelar colocando un divisor antes de la unidad purificadora y un mezclador después de la unidad. Por estos motivos sólo fue necesario construir el modelo para equipos de la clase COMP.

Resultados de la optimización

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos mediante el modelo de optimización desarrollado. Se presenta como referencia la red futura sin optimizar (caso base) junto con dos posibles soluciones: con y sin la incorporación de una nueva unidad de purificación tipo PSA. La solución que incorpora una nueva PSA tam-

bién requiere la instalación de un nuevo compresor de dos etapas, una de las cuales sería utilizada para comprimir la alimentación a la unidad PSA, mientras que la otra se emplearía para comprimir la corriente residual de la PSA (posee una presión de 1 kg/cm² abs) y enviarla a la unidad de Aminas para luego ser aprovechada en la red de fuel gas de la refinería.

Para estimar el ahorro económico asociado al ahorro de hidrógeno en cada caso se estimó el costo de producción del hidrógeno en la refinería por reformado con vapor de gas natural. Se tuvo en cuenta que el hidrógeno recuperado de corrientes residuales deja de aportar el correspondiente poder calorífico a la red de fuel gas de la refinería que debe reponerse con gas natural o fuel oil dependiendo de la época del año. Adicionalmente se consideró que, al reducir la generación de hidrógeno por reformado con vapor, también se reduce la exportación de vapor asociada a este proceso y la diferencia debe ser generada en calderas con su correspondiente costo. Como resultado de este análisis se determinó que el valor del hidrógeno recuperado en la refinería es de 0,04445 USD/Nm³H₂.

Se observa que el potencial de ahorro de hidrógeno se incrementa notablemente si se contempla la posibilidad de instalación de una nueva unidad de purificación tipo PSA.

Índices	Caso Base	Min Fg sin PSA	Min Fg con PSA
H ₂ de SMR-HR III (Fg), Nm ³ /h	Base	Base - 299	Base - 2302
Longitud de tuberías en uso, m	3713	6444	7464
Longitud de nuevas tuberías, m	----	3390	3760
Número de conexiones	45	47	50
Número de conexiones nuevas	----	7	13
Prod. de H ₂ de la PSA, Nm ³ /h	----	----	2227
Destinos de la PSA	----	----	Salida HR III
Nº de corrientes purificadas	----	----	8
Ahorro de hidrógeno, Nm ³ /h	----	299	2302
Ahorro de H ₂ , 10 ⁶ USD/año	----	0,12	0,90

Tabla 5 – Resultados de optimización red de hidrógeno Refinería Luján de Cuyo

Resultados de la optimización – frontera de Pareto

En la Tabla 6 se presentan algunos puntos óptimos de la frontera de Pareto según los criterios expresados en el apartado “Frontera de Pareto *Lt* vs. *Fg*”.

La solución Min ΔLt (1) representa un ahorro de hidrógeno prácticamente igual al de la solución con PSA presentada en la Tabla 5 de 2301 Nm³/h pero con una longitud mucho menor de nuevas tuberías requeridas para las nuevas conexiones de la red (2447 m frente a 3760 m). El ahorro asociado se estima en unos USD 900.000/año.

Las soluciones Min ΔLt (2) y Min ΔLt (3) constituyen alternativas de menor ahorro de hidrógeno reduciendo el número de corrientes a purificar en la unidad PSA y también la longitud de nuevas tuberías nece-

sarias. Por último, la solución Min ΔLt (4) sólo purifica dos corrientes con suficiente presión para ingresar a la unidad PSA sin necesidad de un nuevo compresor pero se debe tener en cuenta que aún sería necesario un compresor nuevo para comprimir la corriente de off gas de la PSA.

Índices	PSA	PSA	PSA	PSA
	Min ΔLt (1)	Min ΔLt (2)	Min ΔLt (3)	Min ΔLt (4) (sin nuevo compresor)
H ₂ de SMR-HR III (Fg), Nm ³ /h	Base - 2301	Base - 1932	Base - 1232	Base - 732
Longitud de tuberías en uso, m	6154	5371	4582	4899
Longitud de nuevas tuberías, m	2447	1665	1065	1187
Número de conexiones	51	51	49	49
Número de conexiones nuevas	13	13	7	6
Prod. de H ₂ de la PSA, Nm ³ /h	2133	1389	799	383
Destinos de la PSA	Salida HR III	Etapa I Booster de Isomax	Etapa I Booster de Isomax	Etapa I Booster de Isomax
	Make up HTN II			
Nº de corrientes purificadas	7	6	1	2
Ahorro de hidrógeno, Nm ³ /h	2301	1932	1232	732
Ahorro de H ₂ , 10 ⁶ USD/año	0,90	0,76	0,48	0,29

Tabla 6 – Puntos óptimos frontera de Pareto

Evaluación de viabilidad técnico – económica

Entre las alternativas de optimización identificadas se seleccionó la opción PSA Min ΔLt (1) de la Tabla 6 para realizar una evaluación de factibilidad por ser la alternativa de mayor ahorro asociado.

Se realizó la estimación de la inversión necesaria para su implementación. Por razones de confidencialidad no es posible presentar los resultados de esta estimación.

En cuanto a la viabilidad económica de la implementación de la solución elegida puede decirse que el valor actual del hidrógeno en la refinería no justifica la inversión. Sin embargo se considera posible que en los próximos años la situación se modifique, por ejemplo ante la incorporación de nuevas unidades consumidoras que requieran incrementar la disponibilidad de hidrógeno en el complejo.

CONCLUSIONES

El estudio de optimización realizado mediante la aplicación de programación no lineal permitió la identificación de diferentes alternativas de optimización de la red de hidrógeno de Refinería Luján de Cuyo basadas en la purificación de corrientes residuales.

La alternativa más atractiva involucra la purificación de 7 corrientes en una unidad tipo PSA (Pressure Swing Adsorption) logrando un ahorro asociado de 2.301 Nm³/h de hidrógeno (algo más del 10% de la generación total de la refinería por reformado con vapor) que representa unos USD 900.000/año. Se realizó una estimación de las inversiones necesarias para su implementación asociadas a una nueva unidad tipo PSA, un nuevo compresor y las nuevas conexiones requeridas. En cuanto a la viabilidad económica de la implementación de la solución elegida puede decirse que el valor actual del hidrógeno en la refinería no justifica la inver-

sión. Sin embargo se considera posible que en los próximos años la situación se modifique, por ejemplo ante la incorporación de nuevas unidades consumidoras que requieran incrementar la disponibilidad de hidrógeno en el complejo.

Como pasos previos a la optimización se realizaron los balances de hidrógeno de las unidades integrantes de la red. También se realizó un estudio de sensibilidad utilizando simulación Monte Carlo con el objeto de identificar las mediciones o análisis cuyos errores tienen mayor impacto en el error global de los balances. A partir de estas actividades fue posible detectar y corregir situaciones tales como instrumentos defectuosos, sin datos de calibración o calibrados para condiciones alejadas de las reales. También se realizaron recomendaciones de mejora tendientes a mejorar la precisión de los balances, como por ejemplo incrementar la frecuencia de ciertas mediciones analíticas, implementar mediciones en nuevos puntos o reemplazar instrumentos por otros más adecuados.

Antes de aplicar la metodología de optimización por programación no lineal se realizó un análisis pinch de la red con el fin de obtener un diagnóstico rápido sobre el potencial máximo teórico de mejora y algunas pautas generales sobre los excedentes de la red y sus posibilidades de aprovechamiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente la colaboración del personal de la Refinería Luján de Cuyo que participó activamente en el desarrollo del proyecto. En particular a los integrantes de los grupos de Procesos, Jefes de Planta, Planificación, Gestión Energética, Instrumentación y Control y Laboratorio. También a la Dirección de Ingeniería, Grupos de Procesos y Estimaciones por la realización de las estimaciones de inversiones requeridas para la implementación de las soluciones identificadas.

Por último agradecemos la confianza depositada en el proyecto y el apoyo brindado por la Dirección de Refinería Luján de Cuyo y la Dirección de Planificación y Desarrollo Técnico de Downstream de YPF sin los cuales la realización del proyecto no hubiera sido posible.

REFERENCIAS

- Saltelli, Tarantola, Campolongo, Ratto, "Sensitivity Analysis in Practice a Guide to Assessing Scientific Models", John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England, (2004).*
- Alves and Towler, "Analysis of Refinery Distribution Systems", Ind. Eng. Chem. Res., 41, p. 5759, (2002).*
- Bealins and Hutton, "Hydrogen Pinch Analysis", Chem. Eng., p. 56, (May. 2002).*
- Foo and Manan, "Setting the Minimum Utility Gas Flowrate Targets Using Cascade Analysis Technique", Ind. Eng. Chem. Res., 45, p. 5986, (2006).*
- Zhao, Liu and Feng, "New Graphical Method for the Integration of Hydrogen Distribution Systems", Ind. Eng. Chem. Res., 45, p. 6512, (2006).*
- Zagoria and Huycke, "Refinery Hydrogen Management-The Big Picture", Hydrocarbon Processing, 41, (Feb. 2003).*
- Liu, Lu and Mann, "Up-To-Date Tools for Water System Optimization", Chem. Eng., 111, No. 1, p. 30-41, (Jan. 2004).*
- Liu, Zhang, "Strategy of purifier selection and integration in hydrogen networks, Chemical Engineering Research and Design", Trans IChemE, Part A, 82, p. 1315, (2004).*
- Nelson and Liu, "Hydrogen-Pinch Analysis Made Easy", Chemical Engineering, (June, 2008).*