

Optimización de procesos

R. VIDELA, YPF, Luján de Cuyo, Argentina y
J. VALENTINE, Emerson Automation Solutions,
Reno, Nevada

Caso de estudio del programa de control de pérdidas en refinería de alto desempeño

La mayoría de las refinerías cuentan con programas de balance de masas y control de pérdidas para contabilidad, planificación, programación, y evaluación financiera y operativa. Para el desempeño de una refinería son críticas las mejoras en el balance de masas, junto con una clara comprensión de las pérdidas y de dónde se producen. Los programas de reducción de pérdidas de hidrocarburos pueden ahorrar generalmente entre 2 y 10 millones de dólares anuales en una refinería de tamaño medio. Estos ahorros no son sólo por el valor del material perdido, sino también por la reducción de errores en modelos de rendimiento (como la evaluación de desempeños de catalizadores), que afectan a la optimización general.

La refinería de YPF en Luján de Cuyo, Argentina, lleva más de 20 años sometándose a un proceso de mejora continua en la medición y control de pérdidas. Esta refinería procesa unos 111 000 bpd y ha reducido las pérdidas, incluidas las pérdidas no contabilizadas y en antorchas, desde un 5-6% hasta un 1,5-2%. El promedio de las pérdidas anuales no contabilizadas es inferior al 0,11%, uno de los mejores en términos de control de pérdidas (Figura 1).

Aunque la refinería de Luján de Cuyo (Figura 2) es de tamaño medio en cuanto a producción, su complejidad es bastante elevada. Cuenta con unidades de crudo y de vacío, un coquizador, un craqueador catalítico fluidizado (FCC), un hidrocraqueador, un reformador y unidades de producción de hidrógeno (H₂). Procesa principalmente un crudo dulce proveniente de los campos de producción de YPF.

A continuación, se describirá el proceso de la refinería para lograr un balance de masas preciso, así como el conocimiento adquirido con su programa de mejora continua y sus cambios operativos. También se describirán las prácticas habituales y las oportunidades de mejora.

Reducción de pérdidas en la refinería. El objetivo de reducción de pérdidas en la refinería empezó hace 20 años al medir las pérdidas utilizando esta fórmula:

$$\text{Pérdidas de refinería} = \text{entrada de material} - \text{salida de material} - \text{combustible consumido} + \text{cambios en inventario}$$

En esa época la mayoría de las mediciones de entrada y salida de material se realizaban usando sistemas rudimentarios de medición de tanques. El primer nivel de mejora se obtuvo cambiando el sistema de medición para incorporar sistemas de medición de caudal en muchos de los flujos de entrada y salida, usando principalmente mediciones directas de masa con

caudalímetros Coriolis. La refinería de Luján de Cuyo utiliza unos 40 caudalímetros Coriolis para asegurar mediciones precisas de transferencia de custodia.

A medida que el programa de control de pérdidas avanzaba, la refinería se dio cuenta de que todo cálculo de pérdidas de hidrocarburos debía realizarse a nivel molecular para equilibrar realmente la refinería y calcular las pérdidas. Por ejemplo, se debe contabilizar el agua que entra en la refinería, que reacciona en forma de vapor con gas natural, dado que el H₂ se consume en varios procesos y se emite dióxido de carbono (CO₂) por antorcha.

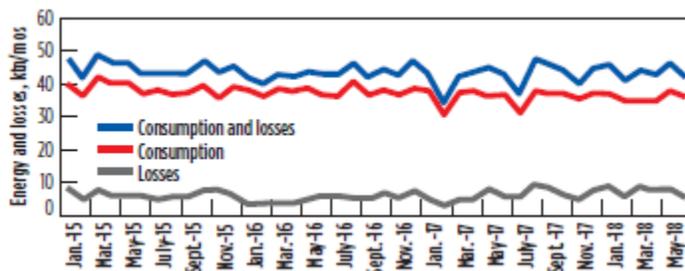


Figura 1. Las pérdidas en la refinería de Luján de Cuyo se han reducido desde un 5-6% hasta un 1,5-2%



Figura 2. Vista de la refinería de YPF en Luján de Cuyo

En la **Tabla 1** se identifican las fuentes y las pérdidas típicas de la refinería de Luján de Cuyo. Esos resultados, con efectos positivos en economía y gestión para YPF, se consiguieron mejorando las mediciones y añadiendo un número significativo de puntos de medición.

Pérdidas y consumo energético. Es importante comprender y analizar la relación entre las pérdidas conocidas y el índice de intensidad energética (EII). El EII depende principalmente de la energía consumida en equipos de combustión y la calidad de las mediciones suele ser deficiente. Si se sobrestima el consumo energético, las pérdidas pueden parecer pequeñas, pero el EII será elevado. Al informar, una referencia compite con la otra.

Estrategias para la reducción de pérdidas no contabilizadas.

Un programa de reducción de pérdidas empieza con una comprensión clara de los objetivos y del alcance del proyecto. Generalmente, el empezar en la frontera de la instalación y moverse hacia dentro es una buena práctica, ya que las mediciones de custodia son una base firme para desarrollar balances de masa y de energía en la planta. Las fuentes más habituales de pérdidas e incertidumbre, mostradas en la **Tabla 1**, proporcionan un excelente punto inicial para el análisis de las incertidumbres de medición, que pueden afectar significativamente al balance de la planta.

Entre las fuentes habituales de pérdidas y las incertidumbres asociadas con las mediciones se cuentan:

- crudo de entrada, especialmente el medido por un buque ;
- agua en el crudo ;
- variabilidad en la gravedad/propiedades del crudo que no concuerdan con el ensayo del crudo ;
- mediciones de densidad insuficientes ;
- importaciones de gas natural ;
- coque ;
- antorchas ;
- gas combustible generado internamente y consumido por equipos de combustión ;
- cambios en el inventario.

Prácticas recomendadas para un programa de control de pérdidas.

Es importante definir claramente el límite de batería, que debe estar donde se realice la medición de transferencia de custodia y en ningún otro sitio. Al considerar la ubicación del límite de batería debe tenerse en cuenta la terminal, si hay una asociada con la refinería.

La redundancia de las mediciones también es importante para fines de reconciliación. No es necesario que las mediciones sean del mismo tipo. Por ejemplo, puede compararse una medición de caudal con el volumen de un tanque, pero para la mayoría de las mediciones primarias es importante un sistema de tarificación y comprobación.

Otra forma de reducir drásticamente la incertidumbre es usar varios puntos de medición independientes en paralelo, en lugar de un punto de medición único de mayor tamaño (**Figura 3**). Con varias mediciones de caudal se puede obtener un efecto de aleatorización significativo y una mejora general en la incertidumbre. El caudal total es igual a la suma de los caudales de los flujos individuales y la incertidumbre se obtiene dividiendo la incertidumbre de las mediciones individuales entre la raíz cuadrada del número de caudalímetros. Si un caudalímetro tiene una incertidumbre del 0,5% y se divide el flujo entre dos caudalímetros con esa misma incertidumbre del 0,5%, la incertidumbre del sistema de medición se reduce a un 0,35%.

El balance de masas se puede calcular diaria, semanal o mensualmente. En la refinería de Luján de Cuyo, el balance de masas se calcula diariamente considerando los cambios en el inventario. Por lo tanto, se deben reconciliar simultáneamente todas las mediciones de la planta. Al realizar un balance diario, se identifican inmediatamente todos los problemas, con lo que es mucho más fácil resolverlos. A partir de los balances diarios se calcula el balance semanal y a partir de los semanales, el mensual.

Medición de crudo. La medición más importante del balance de masas es la medición de crudo porque es la mayor medición del sistema de balance y con la que se comparan todas las demás mediciones. La medición de crudo usando únicamente medición de tanques, especialmente en un buque, por lo general introduce incertidumbres significativas. Para verificar y reconciliar con las mediciones de los tanques de buques, se deben usar mediciones de caudal para la custodia de alta calidad del crudo, en conformidad con las normas del American Petroleum Institute (API) u otras normas internacionales.

La cantidad de agua en el crudo es otra fuente de incertidumbre en la medición de crudo. El contenido de agua se puede medir con la tubería totalmente llena para evitar problemas causados por gotas de agua dispersadas heterogéneamente, o bien bolsas de agua que se pueden presentar esporádicamente en las tuberías de entrada de crudo.

Mediciones de densidad. Si se usan mediciones de volumen, también hay que realizar mediciones de densidad puesto que son críticas para el balance de masas. Si estas mediciones se realizan por muestreo, los métodos y los procedimientos deben observar normas estrictas, y se debe considerar cuidadosamente la frecuencia de muestras. Para realizar la conversión a masa con fines de balance de masas, debe considerarse añadir mediciones de densidad en línea para los fluidos cuya composición varíe más.

Si en el punto de transferencia de custodia se utilizan mediciones de masa con caudalímetros Coriolis, no es necesario convertir a masa. La medición de densidad, que también realizan los caudalímetros Coriolis, puede utilizarse para calcular el caudal volumétrico o bien como parámetro de calidad en salida separada.

TABLE 1. YPF Luján De Cuyo Refinery Annual Losses	
Processed raw material, tpd	16.048
Total losses	1.68%
MPP, tpd	
Subtotal sweet flares	0.94%
Subtotal sour flares	0.08%
CO ₂ vented	0.51%
Subtotal of unidentified losses + others	0.14%
Others	0.10%
Unidentified losses	0.04%

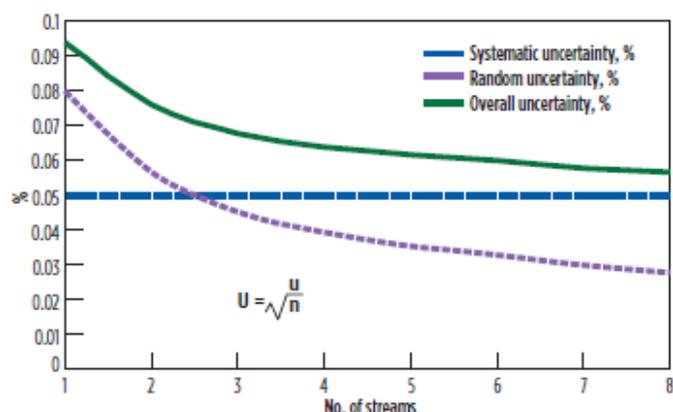


Figura 3. Gráfico de incertidumbres

Mediciones de gas natural. Uno de los problemas de medición más habituales en una refinería lo constituye el gas natural, que la refinería importa para atender las demandas de energía no cubiertas por el gas combustible generado en las unidades de proceso. El aparato de medición utilizado en esta transacción de transferencia de custodia es responsabilidad del suministrador de servicios generales. Las refinerías deben disponer de su propio sistema de medición como respaldo para asegurar que tanto el poder calorífico como el caudal son precisos y confiables. Se recomiendan caudalímetros Coriolis o ultrasónicos junto con un analizador de poder calorífico de algún tipo.

Mediciones de coque. En muchas refinerías la incertidumbre en la medición de coque está en el rango del 5 al 10%, lo que típicamente es una de las mayores incertidumbres de medición en refinerías. Si la configuración de la refinería incluye un coquizador, la pila de coque es una fuente de incertidumbre y el coque quemado en la unidad de FCC es otra fuente. En lo que respecta al coque de FCC, las masas de carbono y de H₂ quemadas se calculan midiendo la entrada de aire y las concentraciones de CO₂, monóxido de carbono, oxígeno y nitrógeno a la salida.

En general, la medición de las pilas de coque es un problema importante para las refinerías. En la refinería de Luján de Cuyo se han probado varios métodos para medir sus pilas de coque, como la radiometría, la medición de nivel o tecnologías infrarrojas. Hoy en día, el método más preciso incluye el pesaje del material cuando se transporta desde la refinería por ferrocarril o camión y el análisis de humedad en laboratorio. Las pilas de coque se segregan diariamente, por lo que esas mediciones se comparan con las producciones diarias estimadas de coque en el colector de coque.

Sistemas de antorchas. Las pérdidas por el sistema de antorchas suelen ser la mayor fuente de pérdidas identificables. El sistema de antorchas es principalmente un sistema de seguridad y debe estar disponible para quemar el exceso de hidrocarburos siempre que se produce una alteración en la planta, así como para quemar los excesos de gas o las fugas de unidades de procesamiento. Una mayor concentración en el control de las antorchas, junto con cualquier mejora en el control, empieza con mediciones.

Aunque la tecnología de medición de caudal ha mejorado con el tiempo, con bajos caudales la incertidumbre suele estar por encima del 10% debido a varios problemas, como requisitos de rangeabilidad muy amplia, composiciones altamente variables y presiones muy bajas de gas que conllevan unos perfiles de flujo muy mal definidos. En la mayoría de las refinerías se utilizan caudalímetros ultrasónicos. Los avances en el modelado de perfiles de flujo y la información de diagnóstico de caudalímetros han mejorado significativamente esas mediciones. Los análisis de composición de gas, bien por muestreo y análisis en laboratorio, bien por cromatografía de gas (CG) en línea o espectrometría de masas, también son necesarias tanto para fines de informes ambientales como de balance de masas.

Gas combustible. Los equipos de combustión de la refinería consumen gas combustible. Suele ascender a entre un 5% y un 7% de la cifra de importación de crudo. Los caudalímetros que se utilizan para controlar la combustión suelen ser medidores de presión diferencial (PD) con placa de orificio estándar, muy afectados por cambios en la gravedad específica. Puesto que la gravedad específica del gas cambia significativamente en la mayoría de las refinerías, la precisión de los medidores no suele bajar de entre un 5% y un 10%. La contribución general a la incertidumbre en el balance de masas es del 0,25%-0,7%, lo que es significativo.



Figura 4. Caudalímetros Coriolis situados en la entrada de un tanque de crudo

El consumo de gas combustible, que es la cifra utilizada para calcular el EII, es un parámetro crítico con el que se evalúa la refinería, así como un indicador clave de desempeño (KPI) importante para la gestión de la refinería. Una práctica recomendada es utilizar caudalímetros Coriolis con el gas combustible de calentadores y calderas, lo que no sólo mejora el control de la combustión, sino que también mejora la precisión del valor de consumo de combustible.

Cambios en el inventario. Los valores precisos y fiables de inventario son otro reto significativo en muchas refinerías. En los cálculos de volúmenes en un tanque y conversión a masas, para balance de masas, existen muchas fuentes de error. Las mediciones de nivel de tanques han pasado a ser muy precisas, pero las irregularidades de los tanques, la estratificación de productos en el tanque y los cambios tanto de densidad como de temperatura dentro del tanque son problemas para una medición precisa. Se recomienda invertir en instrumentación para los tanques de materia prima y de producto más importantes a fin de reducir la incertidumbre.

Otro reto al que se enfrentan muchas refinerías es que algunos tanques son tanques vivos que simultáneamente se están llenando y vaciando. La refinería de Luján de Cuyo ha resuelto este problema invirtiendo en caudalímetros Coriolis tanto a la entrada como a la salida del tanque para monitorizar eficazmente los cambios en el inventario (**Figura 4**).

Los cambios en el inventario deben registrarse diariamente para minimizar las posibilidades de pasar por alto un error de medición y así posibilitar la realización de correcciones rápidas.

Balance de masas de unidades de proceso. Una vez establecida la frontera de la instalación, el siguiente paso es balancear las unidades de proceso. El balance de masas de las unidades de proceso sirve para validar los datos del proceso que se utilizan para monitorizar el desempeño de la unidad. La monitorización precisa proporciona la información necesaria para aumentar la calidad de producto y reducir los costos operativos. Para calcular los rendimientos de conversión y de producto, así como la selectividad de catalizadores y la eficiencia energética, la unidad debe estar balanceada. Entonces se pueden utilizar los datos para optimizar la unidad de proceso, lo que incluye la evaluación de desempeño de catalizadores y los rendimientos esperados.

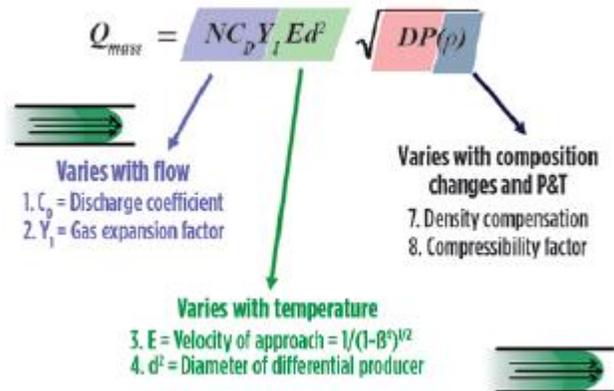


Figura 5. Ecuación de medición de caudal según condiciones de proceso variables

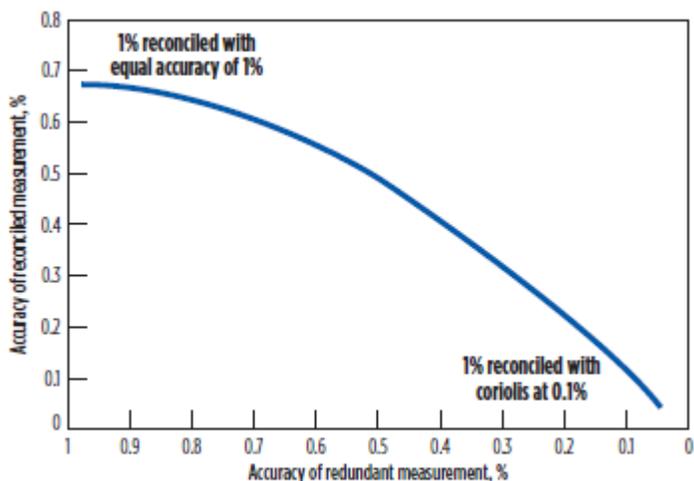


Figura 6. Precisión de mediciones redundantes

La meta para muchas refinerías es realizar el balance de masas de las unidades de proceso hasta el 100 +/- 2%. Con algunas unidades de proceso, alcanzar esta meta puede ser un reto. Las mejores refinerías se esfuerzan para balancear sus unidades críticas de proceso a +/- 1%. Se necesita un gran esfuerzo para llegar a esa meta, puesto que en las mediciones se suele utilizar la tecnología PD con placa de orificio sin compensar y de calidad del proceso. La densidad del fluido medido afecta particularmente a esa tecnología y, en las refinerías, las densidades están en constante cambio. En la **Figura 5** se muestra el impacto de las condiciones de proceso variables en la medición de caudal.

Debido a estos problemas, la refinería de Luján de Cuyo invirtió en caudalímetros Coriolis en todos los puntos de balance de masas de las unidades de proceso críticas. Los caudalímetros Coriolis miden la masa directamente y no se ven afectados por condiciones variables de proceso, cambios de densidad incluidos. Además, los caudalímetros miden la densidad, que se utiliza para seguir cambios en la composición y calcular caudales volumétricos.

En la refinería de Luján de Cuyo, se utilizan caudalímetros Coriolis en los flujos de balance de masas de estas unidades:

- destilación de crudo y al vacío ;
- coquizador ;
- FCC ;
- hidrodesulfuración de destilado ;
- hidrocraqueo ;
- reformador ;
- conversión de gas.

La mayoría de las unidades de proceso pueden lograr un balance de masas del 1% durante una prueba. Esto permite que los ingenieros de proceso evalúen eficazmente y optimicen sus unidades con confianza. Existen estudios que muestran que las mediciones deficientes pueden llevar a decisiones inadecuadas que afectan tanto a la rentabilidad como a la seguridad de la unidad operativa. Las mejoras en la precisión de los datos pueden implicar mejoras en la rentabilidad de varios millones de dólares.

Contabilidad de rendimiento y reconciliación de datos. Como en la mayoría de las refinerías, se utilizan sistemas de software de contabilidad de rendimiento y reconciliación de datos en la refinería de Luján de Cuyo. La calidad de la reconciliación depende de las incertidumbres de los puntos de medida, o nodos, usados en el sistema de balance de masas. En la **Figura 6** se muestra la importancia de la precisión en la capacidad de reconciliar datos. En el software se debe introducir la incertidumbre de cada punto de medición, incertidumbre que se utilizará para reconciliar los datos. Por ejemplo, si un aparato de medida con incertidumbre del 1% se reconcilia con otro aparato de medida de la misma incertidumbre, la precisión de la medición reconciliada es sólo del 0,7%. No obstante, si un aparato con una incertidumbre del 0,1% se reconcilia con el aparato con una precisión del 1%, la precisión de la medición reconciliada mejora hasta 0,07% (**Figura 6**).

Con una reconciliación de datos más precisa se obtiene un sistema de contabilidad de rendimiento más preciso y fiable, para poder evaluar eficazmente el desempeño general de la refinería comparado con los KPI críticos de la refinería.

Conclusiones. No se puede subestimar la importancia de los balances de masas tanto en el nivel de unidad de proceso como en la refinería en general. En el nivel de unidad de proceso, los datos del balance de masas forman la base sobre la que se toman decisiones operativas y se alcanza la optimización. En la instalación general, el balance de masas verifica que las mediciones de transferencia de custodia y de calidad son precisas, y que el operador paga, y cobra, los materiales que se transfieren hacia dentro y hacia fuera de la refinería. Las causas de las pérdidas se hacen visibles, con lo que se reducen las pérdidas y se mejora la rentabilidad. **HP**



Raul Videla es el supervisor de KPIs, masa y energía, y contabilidad de rendimiento en la refinería de YPF de Luján de Cuyo en Argentina. Durante su tiempo como supervisor, la refinería de Luján de Cuyo ha visto mejoras significativas en reducción de pérdidas y mejora de KPIs con los programas de mejora de procesos implementados por su equipo. Videla tiene más de 30 años de experiencia en refinación y ha ocupado varios cargos en YPF relacionados con la gestión de proyectos, principalmente en balance de masas, mezcla de gasolina y contabilidad de rendimiento. Está diplomado en ingeniería química por la Universidad de San Juan en Argentina y cuenta con un grado de ingeniería especialista en refinación por la Universidad de Buenos Aires.



Julie Valentine es la directora de Refining Flow Solutions de Emerson Automation Solutions. Antes de desempeñar este cargo trabajó durante 14 años para Micro Motion como directora de marketing de la industria de refinación. Volvió a unirse a Emerson Flow Group en 2015. Antes de unirse a Emerson, también trabajó para Honeywell UOP durante 8 años, principalmente en el grupo de servicios técnicos, donde colaboró en el comisionamiento, arranque y resolución de problemas de unidades de proceso Honeywell UOP en todo el mundo. Valentine es la autora de numerosos artículos técnicos sobre diversas aplicaciones de tecnología de caudal en la industria de refinación y consta como inventora conjunta en dos patentes de EE. UU. para Micro Motion. Es miembro activo de API y de American Fuel and Petrochemical Manufacturers (AFPM). Valentine se licenció en ingeniería química y de refinación de petróleo por la Colorado School of Mines de Golden, Colorado.