



La refinería inteligente del futuro

Este trabajo expone los cambios provocados por los avances tecnológicos de la comunicación y de la informática, en las aplicaciones de automatización de las plantas.

Por **Ing. Marcelo Carugo**

¿Qué es una “refinería inteligente”? Todos nosotros somos testigos de los extraordinarios desarrollos que están ocurriendo en las tecnologías de computación y de comunicación. Parece que casi todos los días surge un nuevo informe que habla de la continua disminución del costo y del tamaño de los elementos de computación, y del permanente crecimiento en la disponibilidad de ancho de banda de comunicación.

Con base en estos desarrollos, se han logrado avances en *software* y análisis matemático, que apuntan a aumentar considerablemente nuestra capacidad de modelar y optimizar las actividades de una refinería.



También han aparecido muchos nuevos desarrollos en sensores y dispositivos de medición de procesos. Estos desarrollos han llevado a nuevos métodos y procedimientos en la operación de las unidades productivas.

Estos nuevos procedimientos utilizan mediciones más frecuentes y exhaustivas del estado presente de la refinería, más un uso creciente de modelos y otras técnicas analíticas para comparar lo que produce actualmente la refinería contra lo esperado y comprender las diferencias, una detección más temprana de condiciones anómalas y herramientas para planificar una futura operación con mayor confianza.

Si bien podríamos considerar estos desarrollos como avances individuales, sus aspectos acumulativos y combinatorios quizás sean menos reconocidos. Este artículo analiza de qué manera la combinación de estas tecnologías ha llevado a un cambio evolutivo en la forma en que pueden operar las refinerías. Este cambio tiene que ver con las decisiones y acciones basadas fundamentalmente en la mejor predicción disponible de las condiciones

futuras esperadas en lugar de reacciones principalmente disparadas por lo que acaba de ocurrir.

La segunda parte de este trabajo se ocupa de los beneficios económicos esperados a partir de inversiones en esta área. La conexión entre los desarrollos tecnológicos y los mejores resultados económicos, que incluyen una mayor productividad, no siempre es evidente. Ha habido muchas afirmaciones sin mayor justificación acerca de potenciales beneficios. En consecuencia, hay muchos desarrollos tecnológicos que se cree que son beneficiosos, pero no está claro cómo trasladar esta creencia a valores monetarios reales.

Incentivos para el cambio

¿Por qué es necesario considerar usar estas nuevas tecnologías en refinerías? ¿Qué problemas de una refinería resuelven que no puedan ser solucionados de una manera más económica a través de otros medios? Para responder a estas preguntas, se repasan a continuación tres áreas principales de incentivos: aspectos financieros, de seguridad y medioambientales, y también demográficos de la mano de obra.

Aspectos financieros

Observando la performance económica, el retorno promedio del capital invertido en las industrias de refino de Estados Unidos durante el período 1990 al 2002 fue de 5%, y para el período 2003 al 2008 fue del 16%. Las compañías de refino individualmente han tenido amplias variaciones en sus promedios de retorno sobre la inversión, que van desde negativos al 14%. Obviamente que estas diferencias individuales en la performance financiera y las presiones competitivas fuerzan a la industria a buscar todos los caminos para mejorar.

La excelencia operacional es la meta de la mayoría de las refinerías, y esta excelencia tiene numerosos componentes. Entre estos componentes, hay algunos objetivos clave que tienen un impacto directo y considerable sobre la performance financiera del sitio.

Estos objetivos incluyen:

- Producir la mezcla de producto de mayor valor posible;
- Maximizar la producción de los equipos existentes;
- Maximizar el factor de operación (servicio) en corriente de los equipos;
- Reducir continuamente costos y apuntar a eficiencias operacionales;
- Mantener los inventarios tan bajos como sea posible;
- Minimizar incidentes de salud, seguridad y medioambientales (*HSE* según sus siglas en inglés).

El último objetivo reconoce implícitamente la realidad de que muchas veces predominan los aspectos de *HSE*.

Ahora bien, ¿cuáles son las oportunidades de una mejora operacional?

- Energía – Los costes de energía siguen siendo el mayor componente del costo en las refinerías después de las compras de crudo. Históricamente, para la industria de refino en EE.UU, dichos costos promediaron de un 30% al 50% de todos los costos operativos de la Refinería.



Hay muchas oportunidades de ahorrar energía en la refinería promedio que siguen sin concretarse.

- **Confiabilidad** – La pérdida de producción debido a paradas no programadas o disminuciones de producción no programadas de las unidades de una refinería y unidades de proceso siguen siendo un problema constante, con pérdidas promedio en capacidad potencial de 3 a 7%.
- **Mantenimiento** – Los costos de mantenimiento son el tercer componente más importante del costo después del crudo y energía, siendo de un 10% a 20% de los costos operativos, pero muchas veces la acción de mantenimiento se produce demasiado temprano cuando no se la requiere y, algunas veces, (lamentablemente) demasiado tarde.
- **Inventario** – Los grandes inventarios de crudo, productos intermedios y productos finales, son característicos de muchas refinerías. Un inventario excesivo aumenta el capital de trabajo y reduce el retorno del capital invertido.

Los componentes de una “Refinería Inteligente”, representan algunas de las inversiones más redituables de que se dispone actualmente para alcanzar los objetivos de excelencia operacional mencionados anteriormente.

Aspectos de seguridad y medioambientales

La performance de seguridad y medioambiental de la industria de refino es vista ampliamente por el público como poco satisfactoria. Encontramos en la literatura que

el análisis de la causa de recientes accidentes e incidentes en el mundo indica que son muchos los factores, incluyendo diseño, control de cambios y aspectos operacionales, que contribuyeron en los incidentes. Sin embargo, estos incidentes y la potencial mejora sugieren que mejores mediciones y un análisis/detección en tiempo real podría haber prevenido o al menos reducido sustancialmente el daño aproximadamente de 25% a 50% de estos accidentes.

Las emisiones medioambientales de las refinerías continúan siendo un problema importante. Si bien las industrias de procesos químicos redujeron sus emisiones importantemente, todavía siguen siendo la mayor fuente de emisiones indeseables a nivel industrial. Conseguir su reducción requiere muchos cambios en el diseño y la operación de una refinería. Mejores mediciones, modelado, análisis y control son alternativas críticas para reducir las emisiones.

Aspectos demográficos

La demografía de los operadores de refinerías de proceso está cambiando. Junto a la disminución de la cantidad de empleos, se estima que más del 75% de los operadores en la industria de procesos químicos se habrán jubilado en los próximos 10 años. Y es evidente que bajará el nivel de experiencia del operador promedio. Además, irá creciendo la demanda de mayores aptitudes analíticas en la tarea de los operadores.

De nuevo, una solución parcial a este problema es usar mediciones en la refinería, modelado y técnicas analíticas para automatizar los procesos de decisión de rutina o, al menos, aportar la información que permita que el proceso de decisión sea más eficiente.

La conclusión general de los comentarios anteriores es que hay una marcada necesidad de mejorar la operación en la industria de refino, y que una tecnología de automatización “inteligente” puede contribuir significativamente a lograr la mejora de la operación.

Predicción versus reacción

¿Qué significa tomar decisiones basadas en una predicción inteligente en lugar de una reacción? El concepto quizás se pueda entender mejor en el contexto del proceso normal de decisión en una refinería que se muestra en la Figura 1. Medimos una condición en la refinería o detectamos un cambio de estado; analizamos los datos para capturar potencialmente una anomalía; predecimos el efecto de escenarios de acción alternativos; decidimos qué escenario implementar y, luego, implementamos los escenarios. Después de esto, el ciclo se repite.

Como ejemplos de decisiones tomadas en este marco se pueden mencionar qué productos producir y cuándo producirlos; decisiones acerca de los recursos que son necesarios para la producción, incluyendo materia prima y mano de obra; y decisiones acerca de cuándo realizar el mantenimiento de un ítem, en particular de los equipos.

¿Cuáles son las características de los pasos a realizar en este proceso?

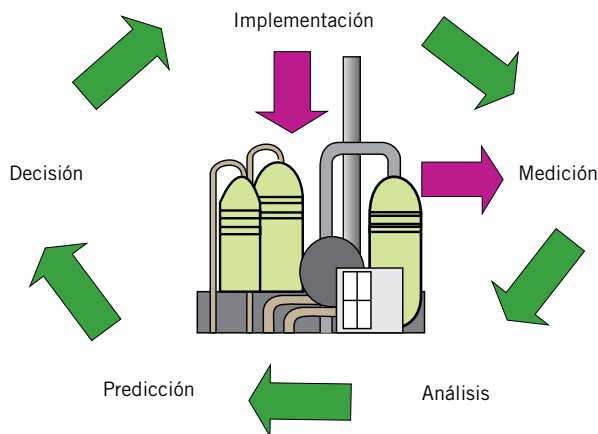


Figura 1. Ciclo de decisión en una refinería.

Medir

Las refinerías modernas producen una buena cantidad de datos. No es raro que una gran refinería tenga 100.000 diferentes mediciones. Si estas mediciones son escaneadas una vez por minuto, se producirán diez *gigabytes* de datos por semana. Sin embargo, los datos son nativamente de baja calidad. La deriva de las lecturas de los instrumentos y el ruido corrompen las mediciones. Incluso cuando las mediciones reales son buenas, las propiedades estadísticas no lo son, ya que los datos son correlacionados en forma cruzada y auto-correlacionados en serie. Muchas veces resulta difícil detectar cambios o tendencias.

Analizar

Analizar en este contexto es obtener el mejor estimado posible de la performance actual del sistema (refinería) y su historia. Por lo general, esto significa procesar los datos en bruto por medio de alguna clase de modelo para obtener un indicador de performance, posiblemente de un componente individual de los equipos o de toda la refinería.

Este indicador de performance es comparado luego contra un patrón. El patrón podría ser la performance, normal, nueva o limpia de los equipos, el presupuesto financiero para la refinería, los límites medioambientales o de diseño. El modelo podría ser simplemente nuestra memoria de cómo se comportaron las cosas anteriormente, o podría ser una fórmula matemática formal. Los objetivos clave del análisis están en detectar una sub (o sobre) performance y los precursores de eventos anormales.

Predecir

El siguiente paso en el proceso de decisión es proyectar en el futuro el comportamiento esperado del sistema en base a la información disponible. En algunos casos, esto se hace simplemente extrapolando que el comportamiento futuro será el mismo que el actual, o esperar que el comportamiento futuro siga el mismo patrón que el sistema ha exhibido en el pasado en condiciones similares.

En situaciones más complicadas, se puede usar un estimado del estado actual, un modelo del sistema y suposiciones acerca de las perturbaciones o efectos que el sistema va a experimentar. Repitiendo lo señalado en el párrafo anterior, el análisis se refiere a obtener el mejor estimado posible del estado actual y pasado del sistema, mientras la predicción se refiere a obtener la mejor proyección posible del comportamiento futuro.

Decidir

Por último, es necesario tomar una decisión acerca de la acción a alcanzar en el futuro, incluyendo ninguna acción o ningún cambio en la condición. Normalmente, esto se consigue evaluando un conjunto de secuencias de decisión alternativas flexibles, y luego eligiendo aquella que maximiza o minimiza un conjunto combinado de objetivos dentro de un conjunto impuesto de restricciones, donde esta evaluación y elección se lleva a cabo en el tiempo disponible.

Implementar

La implementación es la ejecución real del escenario elegido. Implica todas las actividades que se requieren para lograr que ocurra algún cambio, incluyendo la mayoría de las personas influyentes en la refinería para realizar o no realizar una acción. Sin implementación, las funciones de medición, análisis y predicción solo son un ejercicio.

Los pasos en la toma de decisiones mencionados anteriormente evidentemente no son nuevos y, de hecho, se han seguido en refinerías durante muchos años antes de que las computadoras y las redes tuvieran alguna incidencia importante. Los encargados de las decisiones hacían lo mejor que podían para obtener información sobre el estado de la refinería, estimar su performance actual y predecir lo que ocurriría en distintos escenarios de decisiones. Sin embargo, los niveles de incertidumbre eran muy elevados y la mayoría de las decisiones no tenían un sustento analítico.

¿Cómo avanzar hacia una operación “inteligente”? Es posible mejorar el proceso global de toma de decisiones por medio de:



- Conocer mejor lo que está ocurriendo en la refinería en este momento, lo que implica mediciones más exactas con menos demora y mediciones más frecuentes de condiciones anteriormente difíciles de medir.
- Comparar mejor lo que está ocurriendo en la refinería contra lo que se espera que haga y comprender las diferencias, lo que lleva a un análisis basado en modelo y técnicas que promueven la comprensión de la información.
- Predecir mejor el efecto de decisiones alternativas en el futuro.

Algunos ejemplos en distintas áreas de operación quizás sirvan para aclarar aun más los conceptos.

Ejemplo de control predictivo

El primer ejemplo viene del campo de control. Considere la evolución desde el controlador PID a controladores avanzados, utilizando algoritmos de control predictivo de restricciones multivariable (MPCC según sus siglas en inglés). En la Figura 2 se muestra un lazo PID estándar.

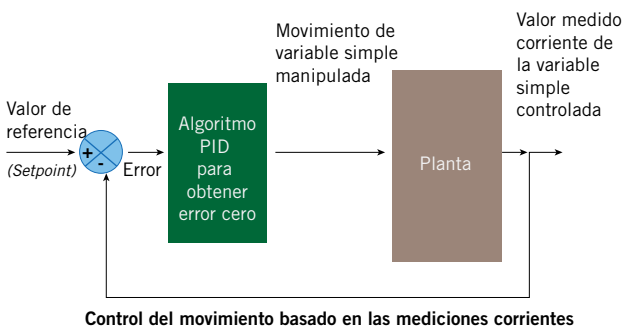


Figura 2. Lazo PID estándar.

El controlador censa la medición real de la variable controlada, la compara con el *setpoint* deseado para calcular un error, y luego toma una acción correctiva en base a los ajustes de los parámetros del controlador. O sea que reacciona a la medición real.

Compare esta acción con la de un algoritmo MPCC que se muestra en la Figura 3.

Para el MPCC, hay un modelo matemático formal relacionado con la respuesta de la variable controlada a cambios en la variable manipulada. Este le permite luego

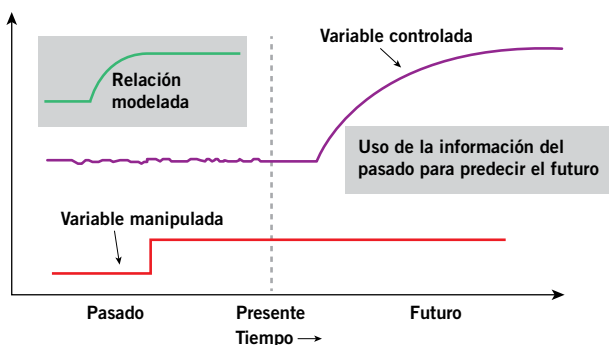


Figura 3. Modelado de control predictivo.

al algoritmo de control usar los valores históricos y reales de las variables manipuladas y controladas para predecir el comportamiento de la planta en el futuro y tomar una acción en base a esta predicción.

El controlador predice si hay alguna probabilidad de que una variable controlada, en el período de tiempo del horizonte de predicción, se desvíe de su especificación o viole un límite de la planta. Se puede tomar entonces una acción de control para corregir la condición antes de que se detecte una desviación o violación real.

La parte de implementación del proceso de decisión se hace automáticamente a través del control de lazo cerrado. Más aún, se pueden combinar los modelos para múltiples variables controladas y manipuladas en un solo controlador que explícitamente reconozca la interacción entre ellas, según se muestra en la Figura 4.

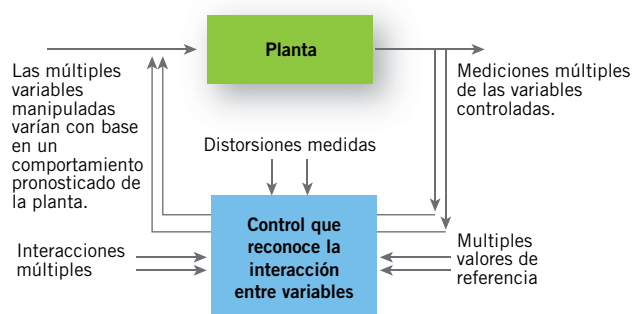


Figura 4. Control que reconoce la interacción entre las variables.

El resultado es una performance de control notablemente mejorada. Se han informado reducciones de 30 a 70% en la desviación estándar respecto del control PID estándar utilizando una implementación de MPCC y un retorno de la inversión de unos pocos meses para inversiones en esta tecnología.

Ejemplo de mantenimiento predictivo

El segundo ejemplo tiene que ver con el mantenimiento de planta. Hay varias metodologías para el mantenimiento de una planta. Una es esperar hasta que los equipos se rompan y luego reaccionar para repararlos si son realmente importantes.

Muchas plantas operan todavía de este modo. La segunda metodología, conocida como mantenimiento preventivo, utiliza tiempos promedios de fallas para los equipos y programa el mantenimiento antes del tiempo de falla esperado. Sin embargo, los equipos pueden variar ampliamente en cuanto a su performance real.

El mantenimiento predictivo busca encontrar técnicas para determinar de manera más precisa si los equipos tienen una performance inferior o están por fallar. Gracias a las continuas mejoras en las capacidades de computación y comunicación, el mantenimiento predictivo se puede basar en los datos reales de performance de los dispositivos, obtenidos y analizados en tiempo casi real. El objetivo global es capturar tempranamente problemas potenciales en los equipos, que lleva a reparaciones menos costosas y menores paradas.

Decisiones de mantenimiento basadas en predicciones de comportamiento futuro

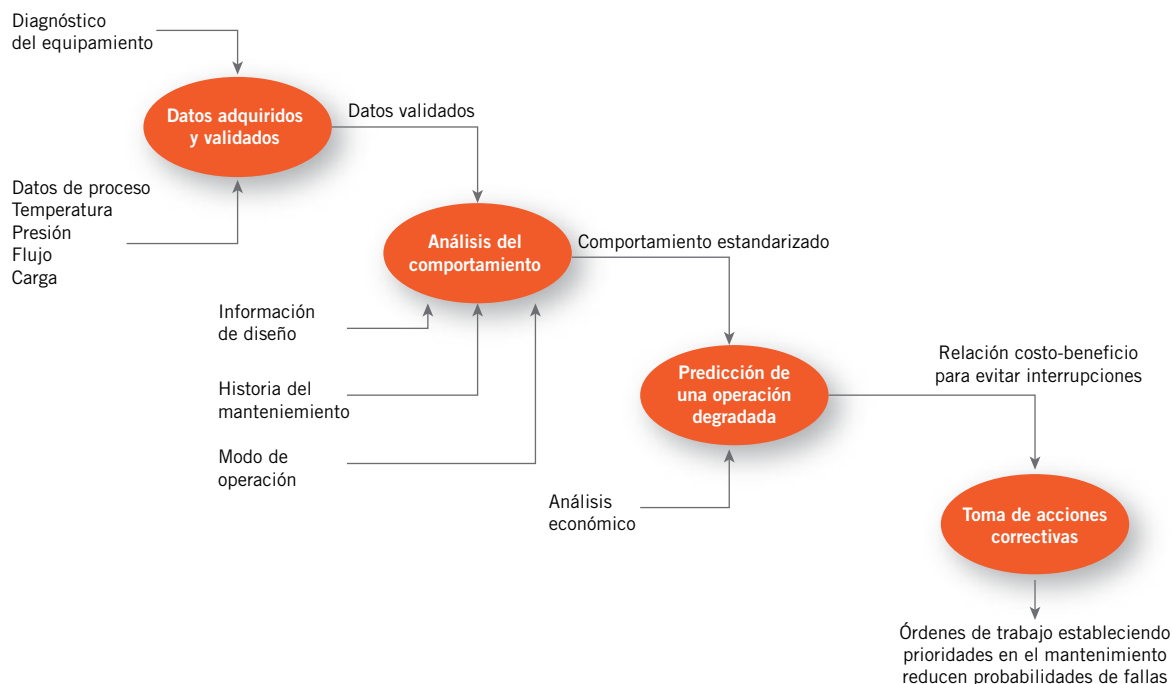


Figura 5. **Mantenimiento predictivo.**

Por el contrario, lo que se quiere es evitar la parada innecesaria de equipos costosos. En la Figura 5 se muestra este concepto. La meta está en detectar anomalías de forma temprana y decidir qué implican con respecto a los equipos. Por ejemplo, los patrones de vibración de equipos rotativos varían con el deterioro de los equipos y pueden ser utilizados como precursores de falla. En operación, los datos provenientes del proceso y de los equipos son validados y llevados a modelos de performance, que calculan esta performance y la corrigen a condiciones estándar.

Con información económica, también se calcula el costo de una pobre performance. Esto puede ser utilizado para predicciones de una remoción no programada (o reemplazo) de una o varias partes, interrupción de servicio o demoras de capacidad. El mantenimiento basado en esta metodología ha mostrado que permite reducir los costos de un mantenimiento no programado en hasta un 20 a 30%, mejorando simultáneamente la confiabilidad de los equipos.

Ejemplo de pronóstico predictivo de demanda de productos

El personal de todas las refinerías necesita tomar decisiones acerca de la cantidad de cada producto a producir en el siguiente período de producción, y esta decisión se basa parcialmente en un pronóstico de la demanda del mercado.

También se reconoce que el pronóstico siempre tendrá un cierto grado de incertidumbre debido a fluctuaciones de mercado, interrupciones de la producción y problemas de transporte. La respuesta a esta incertidumbre es tener inventarios sustanciales de productos que garanticen el cumplimiento de las demandas reales.

De hecho, muchas refinerías establecen sus programas en gran medida para producir inventario, o sea, un inventario objetivo de cada producto y cuando la cantidad real baja de esta cantidad, reaccionan y producen más para llenar nuevamente los tanques a los niveles deseados.



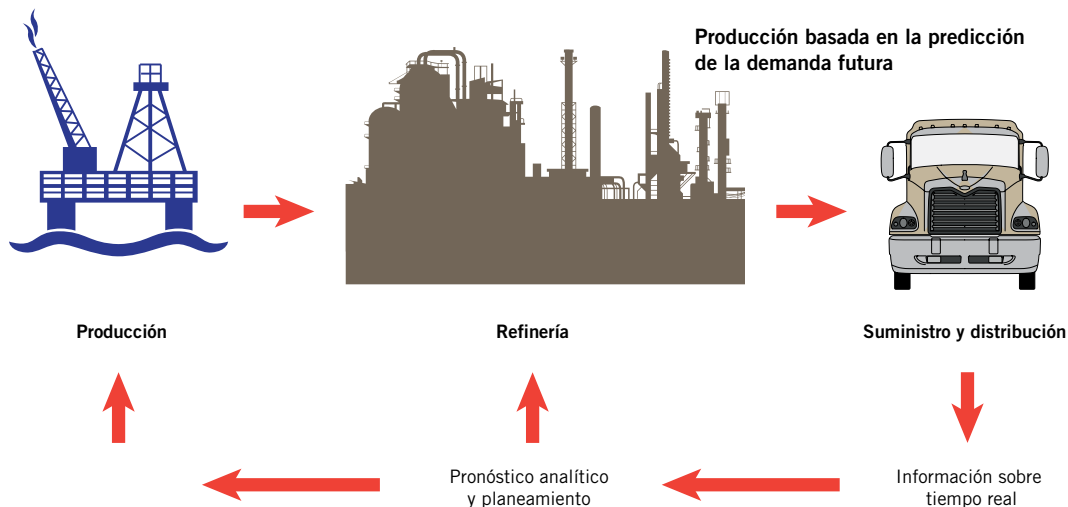


Figura 6. Pronóstico predictivo de la demanda de producto.

Otros elementos de la cadena de suministros, es decir las unidades de producción, las terminales de despacho y los puntos de venta, contienen también inventarios ya sea de materia prima o de productos. Estos inventarios tienden a ser controlados localmente y ajustados en base a evitar problemas en el sitio individual. El resultado es un inventario excesivo en la cadena de suministros que consume capital de trabajo innecesario.

Los sistemas modernos de pronóstico de la demanda de productos utilizan un modelado sofisticado de la demanda esperada en base a un análisis extenso de registros históricos y correlaciones con disparadores de demanda; por ejemplo, condiciones climáticas pronosticadas. Estos son combinados con información en tiempo real acerca del estado total real de inventarios a través de la cadena de suministros, tal como se muestra en la Figura 6, para predecir la demanda y ajustar los objetivos de producción.

Luego, se procede al análisis del riesgo proyectado de

no cumplir con la demanda comparado con el costo del inventario. Una compañía petrolera informó haber logrado un considerable aumento de la rentabilidad, atribuido en gran parte a la implementación de esta tecnología.

Las tecnologías que lo hacen posible

¿Cuáles son las tecnologías que hacen posible que las refinerías pasen de la reacción a la predicción? Ciertamente, hay docenas e, incluso, cientos de desarrollos tecnológicos que podrían ser discutidos.

En las siguientes secciones veremos las que a nuestro juicio presentan el mayor impacto en las operaciones, y se hace referencia a su posición específica del ciclo de decisión, como se muestra en la Figura 7. Dado los límites de espacio, se verán algunos ejemplos de tecnologías que hacen posible la predicción. El énfasis está en el efecto acumulado y combinado de estos avances tecnológicos para apoyar a la operación «inteligente» de la refinería.

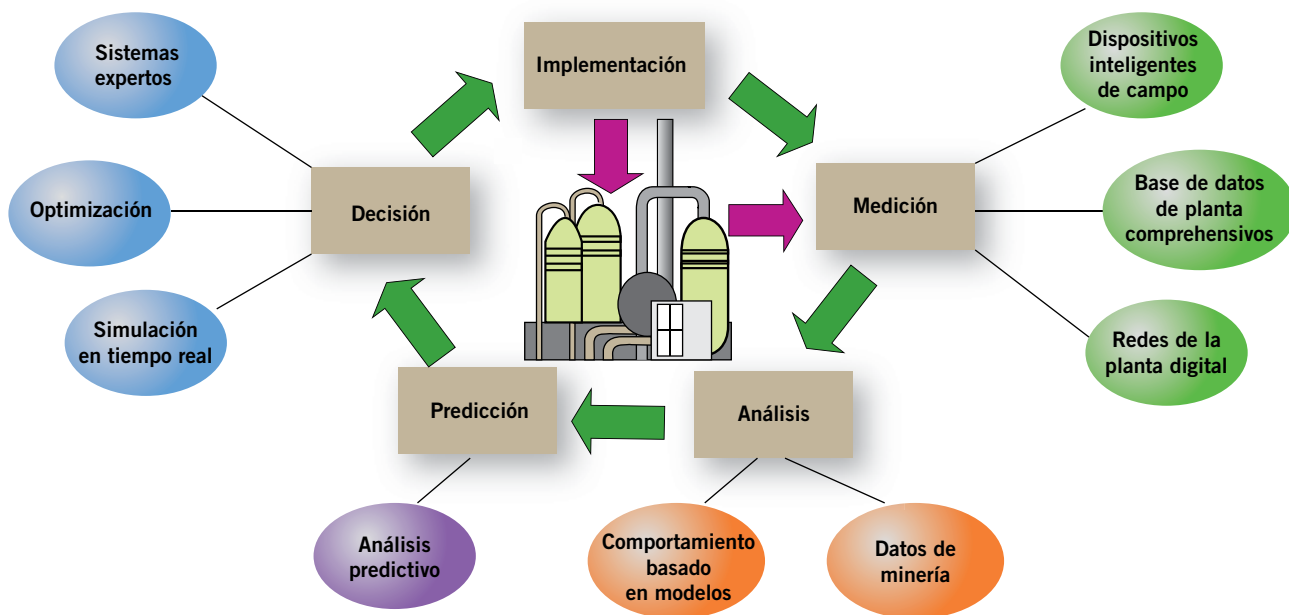


Figura 7. Tecnologías disponibles.

Medición

Dispositivos inteligentes de campo

Uno de los desarrollos tecnológicos más dramático ha sido en el área de los dispositivos de campo inteligentes. Como los microprocesadores se han reducido en tamaño, se han incorporado directamente en el equipamiento básico de la refinería.

En el área de instrumentación, esto ha incluido elementos de medición primaria, transmisores, válvulas y analizadores de procesos. Estos dispositivos se han convertido en pequeños servidores de datos. Un transmisor básico hace unos años enviaba una señal de 4-20 mA de nuevo al sistema de control como una indicación del valor medido.

Hoy en día, un transmisor moderno envía múltiples lecturas, y por lo menos seis distintas condiciones de alarma. Un motor eléctrico que en el pasado no tenía medición alguna en tiempo real, ahora tiene hasta quince sensores que proveen temperaturas, el flujo, los tiempos de ejecución, etcétera, que están disponibles para su registro y diagnóstico.



Figura 8. Dispositivo inteligente típico.

Las válvulas modernas pueden calcular y retener en su historia local la firma de la misma (cambios de presión frente al recorrido del vástago), compararlo con la firma cuando la válvula se instaló, y proporcionar información de diagnóstico o alarmas sobre las diferencias. Un ejemplo se muestra en la Figura 8 de la válvula que está claramente funcionando mal y reporta este mal funcionamiento en tiempo real. Además de las mediciones tradicionales, sensores económicos que permiten monitorear termografías y audiometrías de los principales equipos de planta son utilizados habitualmente. La transferencia de datos no es solo de los dispositivos a la base de datos central. Información de la configuración y la calibración de los dispositivos se introduce de forma remota y se ejecuta sin necesidad de acción local.

Procedimientos analíticos que solo podrían llevarse a cabo en los laboratorios hace unos años, hoy están migrando a los dispositivos de campo. Los ejemplos incluyen NIR (infrarrojo cercano) y RMN (Resonancia Magnética Nuclear).

Redes Digitales Planta

En línea con los incrementos de puntos de medición y la capacidad analítica, ha habido un cambio de la comu-

nicación analógica en el campo a comunicaciones de “buses” digitales. Esto conlleva un aumento correspondiente en el ancho de banda de comunicación de varios órdenes de magnitud, y permite llevar mucha más información de diagnósticos. Los estándares abiertos de estos buses digitales han fomentado la interoperabilidad entre dispositivos de múltiples fabricantes.

La conectividad entre la red de instrumentación de planta, la red de control, y la de TI de planta también evolucionaron hasta convertirse en una red troncal segura de los sistemas de la planta. Esta infraestructura es necesaria para las aplicaciones que analizan y utilizan los datos. La continua evolución en el acceso remoto a través de desarrollos en Internet es bien conocida. Lo que quizás es menos conocido es la penetración de la comunicación inalámbrica en el entorno de la refinería.

Sensores remotos están siendo instalados sin necesidad de cables en los equipamientos de las refinerías, donde no hay necesidad de comunicación de doble vía y una confiabilidad absoluta no es tan importante.

Bases de datos integral Planta

A pesar de que las bases de datos de plantas existen desde hace muchos años, la evolución continua en su funcionalidad ha sostenido su importancia como infraestructura básica, o como soporte para otras aplicaciones. Anteriormente, estas bases de datos estaban destinadas principalmente al almacenamiento de datos de proceso en tiempo real y los cálculos relacionados para guardar los registros históricos y sus tendencias. Hoy en día existe un conjunto mucho mayor de información que se debe mantener para su acceso en tiempo real.

Esto incluye la compra de equipos, de repuestos y la información de sus costos, planos mecánicos, eléctricos, P&IDs, y diagramas de procesos, información de configuración inicial y actual, junto con un registro auditable de los cambios, registros de mantenimiento, procedimientos de seguridad, etcétera. Toda la información de diagnóstico aportada por los dispositivos inteligentes debe ser capturada. Análisis de laboratorio de los productos, las recetas de mezclado, y otras especificaciones de producción, también son guardadas. Los objetos almacenados en la base de datos no son solo números y texto, sino también imágenes, análisis espectrales, enlaces a otras fuentes de datos, etcétera.

Una vez que la información está en la base de datos, las técnicas que nos permitan recuperar eficientemente esta información son clave para determinar el estado de la refinería. Cuando algo va mal en la planta, el objetivo principal es solucionar el problema lo más pronto posible. Por lo general, es necesario recopilar información sobre el problema: planos, hojas de especificaciones, condiciones del proceso, el historial de mantenimiento, etcétera. Sin una base de datos exhaustiva, esta recopilación de información a menudo toma más tiempo que la solución de los problemas después de que todos los datos se han reunido. El desarrollo de una interfase de usuario común y adecuado para estos sistemas es un desafío. En general, las interfases son basadas en íconos con vistas gráficas del proceso, que permiten recuperar toda la información moviendo el puntero sobre el equipo deseado.



Analizar

Reiterando, las técnicas de análisis tienen por objeto determinar la mejor estimación posible de la situación actual e histórica de la planta. Los nuevos desarrollos en el área de medición, más el aumento general de las capacidades de procesamiento, significan que muchos más datos están disponibles, más que lo que se puede procesar en forma manual. Parte de la respuesta a este incremento en los datos es un aumento en el análisis automatizado que toma varias formas.

Data Mining

Los datos en tiempo real disponible en las refinerías presentan desafíos específicos. Como se mencionó anteriormente, por lo general están contaminados por el ruido y no son independientes, es decir, tienen tanto auto-correlación como correlación cruzada. Además, hay una gran cantidad de datos; nuestra capacidad de recopilar datos ha superado con creces nuestra capacidad de analizar. Este problema no es único en las industrias de proceso. Un dato estadístico quizá menos conocido es que la capacidad de almacenamiento digital en todo el mundo se ha duplicado cada nueve meses por lo menos en la última década, lo cual es una tasa doble que la de la ley de Moore sobre los semiconductores.

Sin embargo, si las correlaciones de los datos relativos a las variables de producción se encuentran, o si precursores de falla pueden ser identificados, los beneficios potenciales son enormes. La minería de datos es derivada de análisis estadísticos tradicionales, pero se centra en el procesamiento de grandes bases de datos para encontrar patrones y asociaciones no detectadas. Las herramientas

de primer nivel incluyen un número de técnicas especiales de estadística lineal como PCA y PLS.

Estas herramientas deben ser siempre las primeras en ser utilizadas para el análisis, ya que tienen buenas propiedades estadísticas que otros enfoques no tienen. Cuando están no son suficientes; un gran número de herramientas más generales han sido desarrolladas para proporcionar el reconocimiento de patrones en general, incluidas las relaciones entre los acontecimientos, y determinar cómo los atributos están vinculados. Una vez más, el principal problema es la pobre calidad estadística de los datos del proceso, que hace que las técnicas útiles en otros campos sean menos útiles en el análisis de los datos del proceso.

Asociado a la minería de datos, está el tema de la visualización de grandes bases de datos. El reconocimiento de patrones ha mejorado considerablemente si los datos pueden ser visualmente en una forma que acentúe patrones y correlaciones que puedan existir.

Modelo de supervisión basado en el desempeño

Para gestionar algo, generalmente se debe medirlo. Para la operación de la planta esto implica normalmente la utilización de los datos en algún modelo para calcular las mediciones del desempeño, a menudo llamados Indicadores clave de rendimiento (*KPI* en inglés). Estas mediciones de rendimiento se utilizan para comparar el rendimiento actual contra el plan o a su condición de diseño. Un ejemplo es el cálculo del consumo de energía unitario, es decir, la energía consumida por unidad de carga o producto.

Para evaluar con precisión el funcionamiento de la unidad, este valor calculado debe ser corregido para la

alimentación actual y tipos de producto y su distribución, para la tasa de producción actual, y para el tiempo de funcionamiento desde el último mantenimiento de la unidad. Esta corrección solo puede hacerse a través de un modelo del proceso. Procedimientos de validación de datos y su reconciliación deben ser utilizados para llevar los datos levantados al estándar requerido para el análisis de rendimiento. Con los indicadores clave de rendimiento corregidos, se puede comparar el funcionamiento actual contra el plan, ser evaluado con exactitud y tomar nota de las desviaciones.

Algunas preguntas importantes que pueden ser contestadas son:

- ¿Cuál es la capacidad máxima real de nuestro equipo? ¿Hoy? ¿Si se limpia? ¿Si fuera nuevo?
- ¿Qué nos impidió realmente alcanzar nuestros objetivos de producción el mes pasado?
- ¿Cómo comparamos en forma precisa y consistente los resultados operativos de todas nuestras plantas?
- ¿Cómo podemos asegurarnos de que todas las personas vean el mismo conjunto de números?

Analizadores virtuales o sensores por *software* son un caso especial del monitoreo basado en modelos, e implican el uso de mediciones comunes de los procesos (temperatura, presiones, caudales, etcétera) para inferir una propiedad difícil de medir con un modelo empírico o semi-empírico.

Esto es, por desgracia, una de las áreas de desarrollo en que las alegaciones han superado a la realidad por una gran medida. Sin embargo, el progreso ha continuado y hay una serie de instalaciones reales, donde se obtiene valor.

Tres limitaciones claves que no siempre se reconocen son:

- La estimación solo es válida en la región de datos utilizados para entrenar el modelo.
- Condiciones inestables del proceso con un modelo de estado estacionario por lo general no darán resultados aceptables, pues las constantes de tiempo en el proceso normalmente difieren para las distintas mediciones.
- Modelos no-causales pueden estimar las condiciones actuales, pero no se pueden utilizar para predecir el comportamiento futuro.

Predecir

El análisis predictivo

El análisis predictivo es el nombre general para el desarrollo de la mejor estimación posible del comportamiento futuro del sistema de interés, basada en un modelo y una estimación del estado actual. Incluye una variedad de técnicas. En el ejemplo de control predictivo anterior, es el modelo entre las variables manipuladas y controladas.

En el ejemplo de mantenimiento, es el modelo que relaciona el deterioro en el rendimiento al potencial de falla. En el ejemplo de la cadena de suministro, es el modelo de previsión de la demanda. Hay que tener en cuenta que el modelo de control es determinista, es decir, hay un conjunto específico de resultados calculados para cada conjunto de entradas; el modelo de la cadena de suministro será estadístico y el modelo de mantenimiento está impulsado por eventos. Estos son los tipos generales de modelos

de predicción de interés para las industrias de proceso. La construcción de los modelos de predicción son en su mayoría definidos por las aplicaciones.

Una cuestión clave en el desarrollo del modelo es la necesidad del uso de variables independientes como la base para la predicción.

Decidir

Como se mencionó anteriormente, la clave para tomar buenas decisiones es la evaluación eficiente de todas las posibles soluciones. Claramente, la mejora en las capacidades de modelización y las capacidades computacionales se ha traducido en una mejora significativa en la capacidad del personal de la refinería para evaluar alternativas. Por ejemplo, si había un problema de producción en una de las unidades de proceso, la reacción normal en el pasado fue para corregir el problema siguiendo el patrón de respuesta de los anteriores cortes similares.

Esto se hizo necesariamente no porque el personal creía que era la respuesta óptima, sino más bien por el tiempo disponible para responder y porque la información disponible no admitía ninguna otra respuesta.

Hoy en día, normalmente es posible analizar varias respuestas viables y elegir una que refleje la demanda actual y las disponibilidades.

Optimización

La optimización es la técnica para determinar el mejor conjunto de acciones dentro de las limitaciones impuestas para maximizar o minimizar el resultado deseado. La mayoría de los desarrollos en la planificación de la logística de la refinería, la programación de las operaciones, y los algoritmos de control avanzado son, en realidad, la evolución de aplicar optimización con restricciones. Como los algoritmos de optimización se han vuelto más eficientes computacionalmente, y como las velocidades de procesamiento de las computadoras han aumentado, somos capaces de modelar sistemas con mayor detalle con más variables independientes, y todavía completar los cálculos de optimización necesarios lo suficientemente rápido como para que las respuestas sean de utilidad.

Para el control avanzado, el tiempo de ejecución requerido puede ser de segundos o incluso de mili-se-



gundos. En la programación de operaciones, tiempos de ejecución de unos minutos son aceptables, mientras que para la planificación tiempos de ejecución de hasta una hora pueden ser satisfactorios.

Naturalmente, los modelos y números de las variables serán diferentes. Problemas de programación lineal, que utilizan los algoritmos más eficientes, son ahora rutinariamente capaces de resolver problemas con tanto como siete millones de ecuaciones de restricción. Los algoritmos de optimización con números enteros, que tienen su aplicación en la programación de operaciones y otros problemas, también han aumentado sus capacidades. La historia reciente de todas estas aplicaciones es el uso de modelos más complejos y más realistas que explotan el rápido avance de la potencia computacional que permita la solución en un plazo razonable.

Simulación en Tiempo Real

El mayor uso de la simulación en tiempo real como una herramienta para aprendizaje de sistemas complejos, tales como una refinería, es uno de los más significativos desarrollos en curso. Esto es lo más valioso en situaciones con muy poca tolerancia al error o con sucesos muy poco frecuentes.

Ejemplos corrientes en una refinería son los de formación de operadores para hacer frente a situaciones de emergencia o de arranque y parada de las unidades de la refinería. La mejora clave obtenida es una respuesta más rápida y segura a este tipo de situaciones. Un hecho interesante es la adopción de representaciones en 3D de la refinería de esta capacitación en seguridad. Sin embargo, el uso de la simulación no se limita a la capacitación de los operadores. De hecho, una de las mayores áreas de mayor uso de esta tecnología es en la simulación de negocios en general, particularmente en el área de logística.

Sistemas Expertos

Otra de las tecnologías que en la publicidad ha superado de manera significativa la realidad ha sido en el uso de la tecnología de sistemas expertos para ayudar en la toma de decisiones, muy especialmente como sistemas de guía del operador. Mucho se ha propuesto, pero pocos son los sistemas reales que se han llevado a cabo, y mucho menos aún han permanecido en funcionamiento y uso por múltiples años. El modelado de las decisiones reales ha demostrado ser más difícil en la práctica que lo previsto. Sin embargo, tal vez de mayor importancia ha sido la dificultad en mantener estos sistemas expertos corrientes con los cambios de situaciones de la refinería. De todos modos, existe una necesidad real de tales sistemas, particularmente en el área general de detección, diagnóstico y prevención de eventos anormales.

Beneficios económicos

Hay muchas fuentes de beneficios para las tecnologías mencionadas más arriba. Los dispositivos inteligentes de campo y las redes digitales de planta se justifican a menudo sobre la base de la reducción de costos de capital frente a otras alternativas, inversiones necesarias y/o de reducción de mantenimiento. Estos se pueden cuantificar

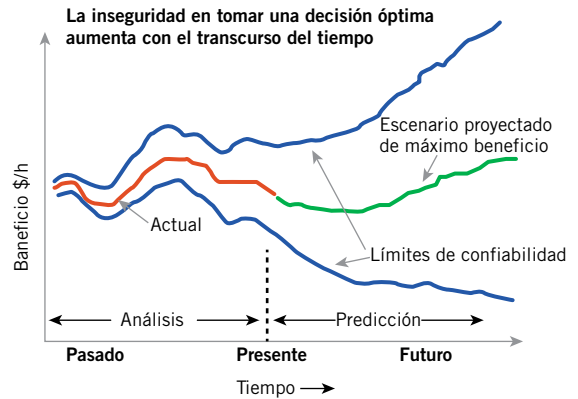


Figura 9. Predicción versus análisis/estimación.

a partir de la experiencia con instalaciones similares y pueden ser sustanciales.

Los controles avanzados y la optimización en tiempo real también tienen metodologías desarrolladas para el análisis de beneficio. De todos modos, muchos de los avances en la refinería inteligente involucran a más, mejor y más rápidas mediciones de proceso y de las condiciones de equipamiento y el uso de modelos para analizar los datos.

¿Cómo calculamos el valor de estos desarrollos o de una base de datos? A veces, estos beneficios económicos se calculan multiplicando un pequeño porcentaje de mejora potencial sobre los tiempos de rendimiento de producción, tales como el valor del producto y afirmar que el resultado es plausiblemente el beneficio esperado.

El mapa de causalidad entre la aplicación de la tecnología y la mejora en el rendimiento de la producción no está realmente especificado. Un examen detallado muestra, sin embargo, que muchos desarrollos afirman lograr la misma mejora. El concepto de rendimientos decrecientes parece estar ausente. Una fuente de confusión en la evaluación de los beneficios es que solo la implementación, en realidad, crea la ganancia o pérdida de rentabilidad del negocio. ¿Cómo podemos, entonces, estimar el valor de una mejor información que permita mejores decisiones y la implementación de una estrategia superior?

Supongamos que hemos determinado la «óptima» política de operación de la refinería y que esto genera un beneficio económico como se muestra en la siguiente figura (Figura 9). Cualquier estimación que hagamos de la política de operación tiene una incertidumbre que se ha

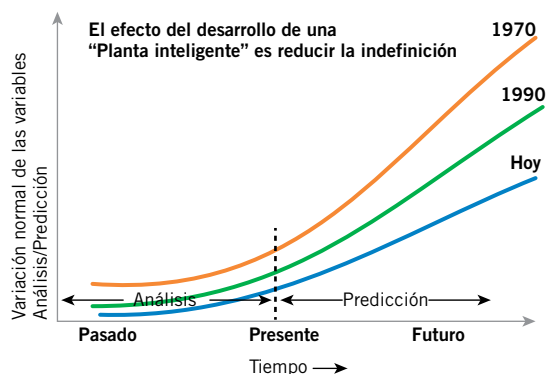


Figura 10. Evolución de la variación.

representado por los límites de confianza alrededor de la línea de operación.

Además, cuando proyectamos la política óptima de funcionamiento al futuro, los límites de confianza aumentan y este aumento es proporcional a la distancia en el futuro que pretendemos proyectar la política óptima. Esta incertidumbre se refleja en el presente y genera saber cuál es la mejor política actual. En otras palabras, ahora tenemos la mayor parte de la información que nos dice cómo debemos haber operado la semana pasada, pero no sabemos con precisión cómo operar el día de hoy, ya que depende de los acontecimientos que sucederán en el futuro.

¿Cómo podemos mejorar la exactitud de la predicción del futuro que nos permita decidir mejor cómo operar en el día de hoy? En general, se verá mejorada al tener modelos más precisos, con una mejor estimación de la situación actual, y tener más información sobre las perturbaciones futuras. La decisión se mejora al aumentar el conjunto de las secuencias consideradas viables, mediante una mejor proyección de la implicancia de las decisiones en el futuro, incluyendo los factores de riesgo, y por los factores mencionados anteriormente de un mejor conocimiento de la situación actual y evaluaciones más frecuentes. En términos simples, cuanto antes se detecta un problema, más fácil es de resolver.

Además, muchos de los avances tecnológicos se pueden clasificar por su reducción en los límites de error esperado en las estimaciones de rendimiento actual y las predicciones del comportamiento del sistema futuro que se mostró en la Figura 9. El efecto acumulativo de estos avances en los últimos treinta años ha sido una constante reducción de la incertidumbre en las proyecciones de la planificación, como se ilustra en la Figura 10. En términos simples, somos capaces de predecir mejor y, por lo tanto, de tomar mejores decisiones. En términos matemáticos, esto se corresponde con los límites de confianza más ajustados alrededor de la proyección futura.

Ejemplo: Una de las unidades de proceso más importante en una refinería es la unidad de craqueo o desintegración catalítica. Opera poniendo en contacto con una corriente fluidizada de catalizador caliente con una alimentación de hidrocarburos vaporizados que produce una reacción para convertir la carga en una variedad de productos de menor peso molecular, de mayor valor económico. El catalizador es separado de los hidrocarburos y se envía a un regenerador de catalizador, donde los subproductos «pesados» de la reacción, «coque», se queman para que el catalizador pueda ser reutilizado.

La operación del proceso se apoya en un circuito hidráulico de catalizador, que pasa a través del reactor y del regenerador. Este circuito hidráulico, en general, funciona con un gradiente de presión relativamente baja, con algunas válvulas principales, llamadas válvulas de compuerta, que controlan el flujo. Para asegurarse de que los hidrocarburos calientes no entren en el regenerador, se monitorea y controla la caída de presión en la válvula de catalizador regenerado.

Una perturbación, donde los hidrocarburos entran en el regenerador, se llama una «inversión», y es tanto peligrosa como costosa de corregir. Como resultado de ello, si una pequeña caída de presión se detecta a través de la válvula, lo que indica que los hidrocarburos podrían estar a punto de fluir en la dirección incorrecta, la unidad se

Ejemplo de uso de la inteligencia de un dispositivo para predecir fallas

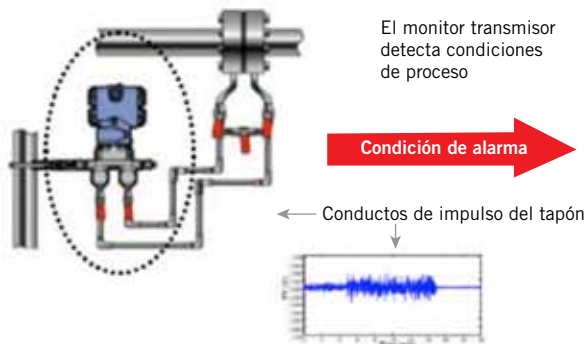


Figura 11. Detección de conductos taponados.

apaga automáticamente.

Reiniciar la unidad después de una parada es costoso y la pérdida de la producción por la parada no planificada es también una pérdida económica. Evitar paradas innecesarias, manteniendo un funcionamiento seguro, es un desafío. Con la circulación del catalizador granular, se generan pequeñas partículas de catalizador o «polvos». En ocasiones, estos polvos pueden taponar los conductos al transmisor de presión diferencial, simulando una baja en el diferencial de presión y provocando un paro innecesario de la unidad.

La Figura 11 muestra cómo un transmisor moderno y elegante, con detección automática de la línea de transferencia, se puede utilizar para corregir este problema.

Se calcula el desvío estándar de la medición actual y se compara con los valores cuando se instaló por primera vez. Si hay una reducción significativa del desvío estándar, es una indicación de la posibilidad de taponamiento. Una alerta se envía al operador, que puede investigar y evitar un paro innecesario de la unidad sin ninguna pérdida de seguridad. Uno de los mayores grupos de refinación estima que la instalación de esta tecnología en sus FCCU ahorraría por lo menos \$ 1 millón de dólares por año en costos de paro y arranque y \$ 3 millones de dólares por año en pérdida de margen bruto de producción.



Asuntos pendientes

Es evidente que ha habido muchos desarrollos en el área de la «Refinería Inteligente», y muchas adopciones de tecnología con éxito. Sin embargo, hay numerosas cuestiones prácticas que han retrasado la implementación en mayores proporciones.

Si bien la tecnología es parte de la ecuación, es claro que la cuestión principal se refiere al personal y a las organizaciones. La experiencia del autor es que la tecnología en general funciona, si no totalmente, al menos parcialmente. Sin embargo, muchas implementaciones de nuevas tecnologías fallan en las cuestiones humanas implicadas. Las personas y organizaciones son muy resistentes al cambio.

Si se introducen nuevas tecnologías, pero no se modifican los procesos del negocio para tomar ventaja de ellos, obviamente, los beneficios del negocio se reducirán. Cómo hacer que las personas se sientan cómodas con las nuevas tecnologías y cómo ajustar los modelos de decisión en una organización existente y en su estructura de poder, son las principales preguntas abiertas. Si bien estas preguntas pueden parecer fuera del ámbito normal de la investigación técnica, sus respuestas pueden seguir limitando el ritmo de avance tecnológico.

También es importante mantener un sentido adecuado con respecto a la tecnología. La meta es mejorar la productividad y la eficiencia de la refinería, no el desarrollo tecnológico.

Rápidas respuestas aproximadas a la pregunta correcta son más importantes que elegantes respuestas a la pregunta equivocada, o respuestas precisas a la pregunta correcta mucho tiempo después de que el problema ha pasado.

Conclusiones

Cambios dramáticos se están produciendo en las capacidades informáticas y de comunicación y continuarán teniendo un impacto muy grande en la producción de las refinerías. Las tendencias de los incentivos financieros, de salud, de seguridad y medio ambiente, y la demografía de las refinerías impulsan muchos de los desarrollos y sus usos potenciales. Beneficios significativos se pueden obtener tomando ventaja de estas oportunidades. Las empresas que sean las más rápidas para tomar ventaja de estas oportunidades, serán las más beneficiadas.

En otras industrias, los avances están en curso y tal vez iluminan el camino hacia adelante. La división de electrodomésticos de un importante fabricante ya ha anunciado la venta de refrigeradores, lavadoras y otros electrodomésticos, de los que se podrán recibir instrucciones e información en la web.

No pasará mucho tiempo hasta que el timbre de su casa suene y un mecánico le diga: «Yo recibí un pedido de su heladera para venir a sustituir la correa de transmisión».

¿Pueden los equipos de proceso estar muy lejos? ■

El Ing. **Marcelo Carugo** es director de Refinación y Terminales para América latina de Emerson.

Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente basado en presentaciones del Dr. Doug White.

Bibliografía

1. Belke, James C. "Recurring Causes of Recent Chemical Accidents", <https://www.denix.osd.mil/denix/Public/Intl/MAPP/Dec99/Belke/belke.html>; (1999).
2. Duguid, Ian, "Take this Safety Database to Heart," Chemical Engineering, julio 2001; pp. 80 – 84.
3. Energy Information Agency, "Performance Profiles of Major Energy Producers, 2011," ver: www.eia.doe.gov
4. Fayyad, U. y R. Uthurusamy (ed); "Evolving Data Mining into Solutions for Insights" y siguientes artículos; *Communications of the ACM*; Vol 45 (8); agosto, 2002, pp. 28 ff.
5. Franz, Neil, "TRI Data Shows Emissions Declines for Most Category: Right to Know", *Chemical Week*, abril 25, 2002.
6. Franz, Neil; "Report Tracks Nafta Region Emissions," *Chemical Week*, junio 5, 2002.
7. Hairston, Deborah, et al (1999) "CPI Refineries Go Data Mining;" *Chemical Engineering*, mayo de 1999.
8. Harold, D. (2001) Merging Mom's Perceptive Power with Technology Creates Startling Results; *Control Engineering*, abril, 2001.
9. Hawkins, Chris; Kooijmans, Rob; Lane, Steven (1999); *Opportunities and Operation of a Multivariate Statistical Process Control System; Presented Interkama*; Hanover, Alemania, 1999.
10. Lustig, I; "Progress in Linear and Integer Programming and Emergence of Constraint Programming", *Proceedings FOCAPO 2003*; pp. 133 ff.
11. Shanel, Agnes. "Who will operate your plant? *Chemical Engineering*, Vol. 106 (2), pp. 30 ff.
12. Siemens; *Press Release; Express Computer*; octubre 8, 2001.
13. Sissell, Kara; "Texas Relaxes Nox Mandate", *Chemical Week*, junio 12, 2002.
14. Shobrys, D. y D.C. White; "Planning, Scheduling, and Control Systems: Why can't they work together?" NPRA 2000 Annual Meeting; Paper AM-00-44.
15. "The Forbes Platinum List", *Forbes*, enero de 2003, p. 120.
16. Venkatasubramanian, V.; "Abnormal Event Management in Complex Process Plants: Challenges and Opportunities in Intelligent Supervisory Control", *Proceedings FOCAPO 2003*, pp. 117 ff.
17. White, D.C., "Online Optimization: what, where and estimating ROI;" *Hydrocarbon Processing*; Vol. 76(6); junio de 1997; pp. 43 –51.
18. White, D.C. "Increased Refinery Productivity through Online Performance Monitoring;" *Hydrocarbon Processing*, junio de 2002.
19. White, D.C.: "The "Smart" Plant: Economics and Technology;" *Proceedings 2003 FOCAPO*; Ft. Lauderdale, FL (2003).
20. Wortham, B., "Drilling for Every Drop of Value", *CIO Magazine*, junio de 2002.