

## EL FUTURO DEL CONTROL DE PROCESOS

Cesar de Prada

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid.  
c/ Real de Burgos s/n, Facultad de Ciencias, 47011, Valladolid [prada@autom.uva.es](mailto:prada@autom.uva.es)*

Resumen: En este artículo se recogen algunas de las tendencias que previsiblemente enmarcarán el futuro del control de procesos. Estas son tanto de carácter socioeconómico como científico-tecnológicas y están basadas en estudios y workshops propiciados por diversos organismos de la UE y de USA. Reflejan además una opinión personal derivada de la experiencia del autor en su vida académica y profesional en estrecho contacto con la industria de procesos.. *Copyright © 2004 CEA-IFAC*

Palabras Clave: Process Control, advanced control, predictive control, simulation, optimization.

### 1. INTRODUCCION

La Humanidad siempre ha querido conocer el futuro y ha usado profecías, augures y oráculos para adivinarlo. Siempre es difícil jugar a adivinos, pero en nuestros días tenemos la ventaja de disponer de una enorme cantidad de información fiable sobre el momento actual para hacer nuestras predicciones. También tenemos el inconveniente de vivir en un mundo mas complejo, donde todo cambia rápidamente y donde hay mas interrelaciones a escala planetaria que pueden alterar fácilmente el curso de las cosas. No obstante, es un buen ejercicio reflexionar sobre el presente y el pasado inmediato para tratar de vislumbrar el camino por el que orientar nuestros pasos.

Al hablar de la industria de procesos, aunque tiene unos límites difusos, nos referiremos al conjunto de industrias que, como la petroquímica, cemento, alimentación, farmacia, etc. fabrican productos de naturaleza mas o menos continua (*continuous manufacturing*), en oposición a la que fabrica unidades diferenciadas de productos, tales como zapatos, automóviles o televisores (*discrete parts manufacturing*). Los métodos y técnicas del control de procesos se refieren a la aplicación de la teoría y la práctica del control a este campo. Aunque guardan, lógicamente, muchos aspectos comunes con otras áreas de aplicación, tienen también muchos enfoques específicos y prioridades diferentes.

La industria de procesos ocupa un lugar destacado en la economía. Solo la industria química, significaba el

19% de la producción industrial de la UE en 1999, siendo la UE en el 2001 el primer productor mundial con el 32% del valor total del mercado. España es un productor significativo dentro de la UE, ocupando el primer lugar en relación a su PIB.

Pocas cosas evolucionan aisladas y entre ellas la ciencia y la tecnología. Es cierto que, en particular el conocimiento científico, ha hecho contribuciones teóricas fundamentales de forma autónoma de las que solo se ha apreciado su valor muchos años después. No obstante, en un mundo como el actual donde la ciencia y la tecnología juegan un papel directo en la producción, no enfocáramos el tema adecuadamente si no consideramos el contexto socioeconómico y tecnológico en que se desenvuelve el control de procesos, así como las tendencias de la propia industria, a la hora de hablar de su futuro. Por ello, en la sección 2, nos referiremos a dicho contexto y nos centraremos después, en la sección 3, en los rasgos de evolución que se aprecian en la industria de procesos para dar entrada, en la sección 4, a las tecnologías mas directamente relacionadas con nuestra especialidad y los temas que previsiblemente serán relevantes en los próximos años. La sección 5 discutirá finalmente la situación de nuestro país y hará unas reflexiones sobre el futuro del control de procesos.

Si miramos al pasado reciente, una tecnología tarda unos 10 años en madurar y pasar a la práctica industrial, por ello parece prudente cuando hablamos de futuro, marcarnos un horizonte de alrededor del 2010-15 para nuestras previsiones.

## 2. EL CONTEXTO SOCIO-ECONOMICO

Vivimos en un mundo donde la internacionalización de los mercados, la competencia y el beneficio económico comparten cartel con las preocupaciones por el medio ambiente, el desarrollo sostenible y los esfuerzos de muchos países por incorporarse al desarrollo.

La competencia y la internacionalización empujan a fabricar de forma más eficiente y flexible y a reducir los tiempos de puesta en el mercado de nuevos productos. Globalmente, la incorporación al comercio mundial de países con bajos costos salariales y/o acceso directo a fuentes de materias primas como el petróleo, de las carece Europa, afecta especialmente a sustancias/productos de producción masiva tipo cementos o productos petroquímicos básicos, cuya fabricación en la UE está amenazada de moverse a estos países. En todo caso, esta situación empuja a las economías de la UE, USA o Japón a poner el acento en la calidad y nuevas tecnologías y en el desarrollo rápido de nuevos productos para tener ventajas competitivas, a la vez que se requiere reducir costes, en particular energéticos, y aumentar la eficacia y flexibilidad de los sistemas de producción. Dentro de las simplificación que impone cualquier generalización, podemos decir que en aquellas ramas de productos de alto valor añadido, tipo farmacia, química fina, etc. el acento se pone en la calidad y la rápida puesta en el mercado de productos nuevos, mientras que los de producción masiva el acento cae del lado de la eficacia en la gestión de la producción y su integración vertical.



**Figura 1.** Globalización, competencia y flujos económicos mundiales

Por otro lado, las exigencias medioambientales, junto a mayores costos, suponen también una presión en la dirección de mejora tecnológica, mientras que la perspectiva de un desarrollo sostenible apunta al ahorro energético y a la sustitución de materias primas tradicionales basadas en el petróleo por biomateriales obtenidos de la agricultura.

Esto no es solo una reflexión teórica, sino una tendencia que viene desarrollándose en los años pasados y que continuará previsiblemente en los venideros. En la década 90-01, la industria de

procesos, sometida a las demandas antes mencionadas, ha crecido mas y más rápido que el conjunto de la industria y el PIB de la UE, con algunos sectores como la industria farmacéutica o la química básica aumentando en porcentajes superiores al doble del conjunto de la industria. Al mismo tiempo, el incremento del consumo de energía ha sido tres veces menor que el de la producción, mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> prácticamente se han mantenido constantes. Todo ello refleja un esfuerzo importante de mejora.

Por otro lado, fijándonos en el contexto científico y la evolución previsible de otras disciplinas en una década, los desarrollos en la ciencia de materiales y en especial la nanotecnología cabe esperar que aporten la capacidad de diseñar la estructura de las moléculas de tal modo que los materiales tengan las propiedades macroscópicas deseadas. Con independencia de las posibilidades de fabricación a escala nano por auto-ensamblaje, esto permitirá el desarrollo de productos mas avanzados que den la base competitiva a muchos sectores de la industria de procesos así como la base para otros desarrollos tecnológicos (sustitución del silicio por polímeros en la electrónica, nuevos catalizadores, nanotubos de carbono para células de combustible y almacenamiento de H<sub>2</sub>, nuevas membranas para procesos de separación, nuevos recubrimientos de materiales, desarrollo de nuevos sensores, ...). Desde el punto de vista de la fabricación, estos sectores industriales requieren un tiempo corto de puesta en el mercado de los nuevos productos (es decir del diseño y puesta en operación de las plantas necesarias para ello) y operarlas con flexibilidad, permitiendo la rápida adaptación a las demandas de los clientes y alto nivel de calidad de productos especializados.

Por su parte, la industria de procesos básica, es previsible que continúe un camino con una evolución mas suave en cuanto a productos, teniendo en cuenta los condicionantes de infraestructura y patrones de consumo actuales, pero sometida a las mismas demandas de optimización de la producción y la gestión. Si bien en la medida en que las fuentes de materias primas (petróleo) estén comprometidas, cabe esperar un desarrollo de la producción de dichas materias a partir de fermentaciones de productos agrícolas (*biofeedstocks*).

Finalmente, y ante el estado de la opinión pública y los compromisos adquiridos en recientes Tratados Internacionales, cabe suponer que los factores medioambientales y de seguridad continuarán siendo elementos de referencia en estas industrias.

## 3. LA INDUSTRIA DE PROCESOS

Llegados a este punto podemos hacer mención a una serie de tecnologías, incipientes pero en claro desarrollo en la industria de procesos, en las cuales previsiblemente se apoyarán las exigencias antes mencionadas.

Desde el punto de vista de los procesos de fabricación, buena parte del desarrollo futuro se centrará en nuevas tecnologías, en particular las ya mencionadas de nuevos catalizadores, bioprocesos, membranas para separación de productos, micro-reactores, etc. que sin duda alterarán la forma de fabricación de muchos compuestos. No obstante, teniendo en cuenta el objeto de este artículo, nos centraremos en otros aspectos cuyas palabras clave son integración, flexibilidad y optimización.

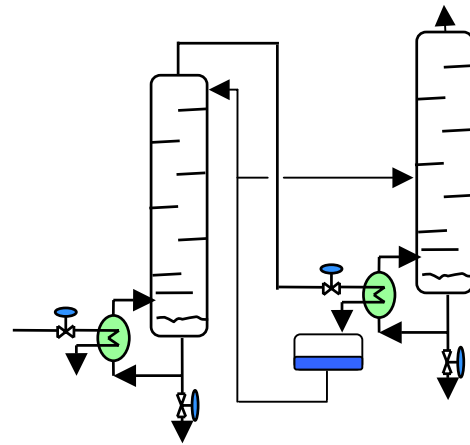
**Integración** es un término siempre ambiguo cuyo significado depende del usuario que lo utilice. Podemos considerarlo en primer lugar desde el punto de vista de integración de diferentes procesos en uno solo que simplifique la planta y mejore su rendimiento, por ejemplo integración de reacción y separación en lo que se conoce como destilación reactiva, o bien reacción con catalizador y regeneración del mismo como en un FCC, etc. En general los nuevos procesos son más complejos, con dinámicas difíciles y requieren operar en condiciones bastantes estrictas, tanto de seguridad como de calidad.

Otro aspecto es la integración energética y el reciclaje de productos, lo que en el argot de la ingeniería química se conoce como diseño integrado de procesos. Corrientes calientes de un proceso pueden usarse para calentar otras corrientes frías de otro proceso que lo necesite con un considerable ahorro energético, tal como las dos columnas de destilación de la Figura 2. Del mismo modo, los productos de salida de un proceso que suelen estar formados por los deseados más materias primas que no han reaccionado, tras su separación en una columna o flash, estos pueden reciclarse al reactor primario con el consiguiente ahorro y posible disminución de contaminantes. Todo ello lleva a nuevos diseños donde las unidades están muy interconectadas con múltiples caminos de realimentación de masa y energía. El resultado de todo ello es que los procesos involucrados dejan de ser independientes y se vuelven acoplados, creando dinámicas mucho más complejas y lentas que los de los procesos individuales que afectan al conjunto de la planta.

También podemos considerar la integración del diseño y otros aspectos como el control, las emisiones medioambientales, seguridad, etc. Nos referiremos a ello posteriormente ligando la síntesis de procesos al control desde lo que se conoce en Automática como diseño integrado.

Finalmente podemos hablar de integración vertical de funciones de producción a distintos niveles (medida y control, supervisión, mantenimiento, planificación, negocio,...). Comprende tanto la circulación y elaboración de la información entre los mismos como la toma de decisiones integrada. Se apoya en la existencia de redes de comunicaciones para fabricación, gestión, etc. en los diversos niveles y busca mejorar y coordinar las decisiones, sin que estas se realicen de forma aislada sino teniendo en

cuenta el resto de los factores de la empresa. Otra dimensión muy importante es la integración horizontal con proveedores y clientes, para mejorar la gestión de la cadena de suministro, la distribución de productos, etc. Es claro que la logística juega aquí un papel clave.



**Figura 2.** Dos columnas de destilación integradas energéticamente

La **flexibilidad** la consideraremos desde el punto de vista de la facilidad de adaptación a cambios en los productos que se fabrican, sus características, demandas, etc.

Este es un factor decisivo en la competitividad de las empresas y obliga a cambiar la operación del proceso en un tiempo breve, tanto su nivel de producción como las características del producto. Por ello es previsible que en un futuro veamos aumentar los diseños de plantas multipropósito, lo que implica unas enormes demandas sobre los sistemas de control y gestión de la operación. También cobran especial interés la operación de plantas y procesos batch en forma multiproducto.

Los procesos por lotes, batch o semi-batch, tienen características muy específicas en relación a los procesos continuos, por supuesto la forma de trabajo secuencial de cada unidad, pero sobretodo su variabilidad e incertidumbre, de ahí que la calidad se mida más en términos de reducción de la variabilidad entre lotes que en los de pureza. Por otra parte el hecho de que la calidad no se especifique como un seguimiento de trayectorias sino que solo se mida al final del lote y en términos no muy convencionales marca diferencias con el control clásico. Otros objetivos clave son la seguridad, dado que muchas reacciones son exotérmicas, y el escalado rápido del laboratorio a producción evitando plantas piloto.

Pero quizás lo más característico desde el punto de vista de la operación de una planta batch es la importancia de la planificación y secuenciamiento del conjunto de sus unidades más que la gestión de una unidad individual, teniendo en cuenta además que es probable que el proceso no sea puramente por

lotes, sino que incorpore también partes continuas dando lugar a un proceso híbrido.

**Optimización** de procesos es también un término de múltiples significados. Para muchas personas de la industria su traducción inmediata será modificar el proceso, sus dimensiones o estructura, o buscar un nuevo catalizador, tecnología de fabricación etc. Va unida a la síntesis y a las tecnologías de procesos. Desde otro punto de vista, una persona con formación en control quizás utilice el término optimización en el sentido de cambios en la forma de operar un proceso que conduzca a una mejora expresada en términos de calidad, economía, seguridad, medio ambiente, etc.



**Figura 3.** Procesos complejos que deben ser operados en forma integrada, flexible, segura y óptima.

En todo caso es claro que ambos aspectos son relevantes y que están detrás de las dos líneas de mejora que podemos observar: una se apoya en un mejor conocimiento intrínseco del proceso para modificarle, otra se apoya en descripciones externas de su comportamiento para hacerle funcionar más de acuerdo a nuestros objetivos, a ser posible de forma realmente óptima de acuerdo a algún criterio ponderado de costo, calidad, seguridad, etc. respetando a la vez una serie de limitaciones impuestas por el proceso, el mercado o la legislación. Los actuales sistemas RTO apuntan en esta dirección, si bien queda un largo camino que recorrer hasta la optimización dinámica de planta completa, estando los principales obstáculos ligados al modelado, en la actualidad restringido en su mayor parte al caso estacionario, y a las técnicas de optimización.

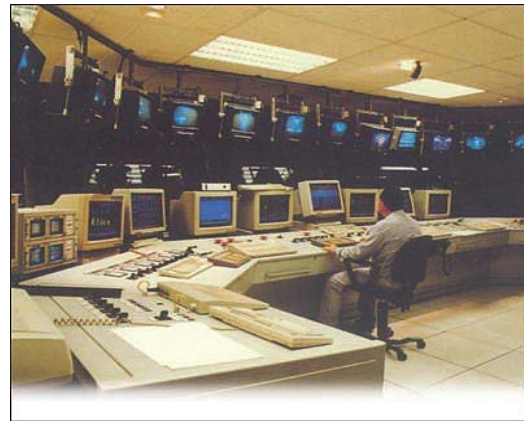
Las industrias de procesos realizan y continuarán realizando, grandes esfuerzos orientados a la optimización del proceso. Las de alto valor añadido, centrándose quizás en el aspecto calidad, mientras que las de producción masiva en el aspecto costos, y ambas con el denominador común de la seguridad. Una perspectiva que no debe perderse de vista es que, desde el punto de vista de la empresa, estos aspectos son globales y unidos al beneficio de la misma y no van separados, lo que refuerza la importancia de las decisiones integradas en la empresa.

Vale la pena mencionar que el aspecto calidad, en particular en muchos nuevos productos, tiene cada vez más unas características especiales en relación al que se usa en el control convencional de una variable tipo temperatura o presión. En concreto, en procesos de polimerización o cristalización, en productos de alto valor añadido, la calidad se expresa por la distribución de la población de tamaños, pesos moleculares, etc. más que por la varianza de su valor medio.

Por su parte, las empresas suministradoras de equipos e ingenierías están sufriendo un proceso de concentración acelerado que ha reducido a unas pocas marcas la oferta de sistemas globales.

#### 4. EL PAPEL DEL CONTROL DE PROCESOS

La automatización de la industria ha sido uno de los pilares que han marcado su evolución y la han permitido aumentar producciones, mejorar la calidad, reducir costes y personal, cumplir con los requisitos medioambientales, etc. y no cabe duda de que es un requisito básico para llevar a cabo todos los cambios antes mencionados.



**Figura 4.** Una sala de control típica

La industria de procesos tiene ya un alto grado de lo que podemos llamar automatización básica: salas de control con sistemas de control distribuido (DCS), PLCs para sistemas de seguridad o secuenciamiento, etc. están hoy día presentes en todas las factorías e incluso elementos de lo que se conoce como control avanzado, p.e. MPC, se ofertan como un producto comercial. Del mismo modo se extienden y afianzan los buses de campo a la vez que los sistemas basados en ordenador y la relativa normalización de las comunicaciones (OPC) permiten disponer de cantidades ingentes de datos de proceso y de potencia de cálculo a precios asequibles.

Por otro lado los avances previsibles en el campo de los materiales, la analítica y la electrónica es muy probable que nos traigan nuevas generaciones de sensores y aparatos de medida que nos permitirán mejorar la información hoy disponible sobre el proceso e implementar lazos de control de variables clave para su operación.



Desde este contexto tenemos que contemplar el control de procesos, el cual no cabe duda que jugará un papel esencial en la producción. Pero cabe preguntarse, ¿cómo una tecnología madura que se usa como un elemento más en un proceso de mejora incremental con una evolución mas o menos lenta? , ¿ó como un factor de cambio a sistemas de fabricación totalmente nuevos posibilitando los mismos? Ello dependerá de diversos factores, entre ellos de nuestros esfuerzos y contribución para aportar soluciones y teoría que sean útiles a los problemas y tendencias antes mencionados.

Por ello parece útil identificar aquellos temas y tecnologías donde es importante centrar la investigación para posibilitar dichos cambios, los cuales además:

- De acuerdo con la idea de integración vertical, deben cubrir los diversos niveles de la jerarquía de decisiones.
- Deben combinar la generalidad del control con la especificidad de su campo de aplicación.
- Deben considerarse en sus relaciones con otras disciplinas con las que guardan mucho en común, extendiendo el ámbito del control y la colaboración a dominios no tradicionales.

Siempre es difícil hacer una propuesta de este tipo que no deja de ser subjetiva. No obstante, sin pretender ser exhaustivos y siendo conscientes de que también es importante trabajar en otros tipos de problemas que quizás den su fruto en el futuro, podríamos citar las siguientes áreas:

- Modelado y simulación
- Control avanzado no-lineal basado en modelos
- Sistemas de medida y elaboración de la información
- Supervisión, detección de fallos, estimación de estado del proceso
- Optimización en línea de planta completa
- Planificación y secuenciamiento en tiempo real
- Diseño Integrado de procesos
- Control de sistemas complejos: redes, logística, fabricación distribuida,..
- Informática industrial

Haremos a continuación unos breves comentarios sobre los mismos.

#### 4.1 Modelado y simulación

En todos los aspectos mencionados, el análisis y toma de decisiones asociados a los mismos se basan en el uso de modelos a diversos niveles y de técnicas de simulación. Un modelo es una forma de sintetizar conocimiento de un proceso y la base de una toma de decisiones racional. El uso de la simulación permite además reducir los tiempos de desarrollo y puesta a punto. El modelado es, por tanto, una tecnología clave que mencionan todos los estudios de prospectiva.

De hecho buena parte de las dificultades en la introducción de métodos de control o gestión avanzados provienen de la falta de modelos adecuados y herramientas que permitan obtenerlos fácilmente. Hoy día las herramientas que suelen utilizarse son muy limitadas tanto en la tecnología que utilizan como en el alcance y la integración de funciones. No obstante, frente a los sistemas de causalidad computacional fija, tipo Simulink, los sistemas de causalidad computacional no predeterminada (tipo gProms, Modelica o EcosimPro), o basados en el conocimiento, ofrecen hoy día la posibilidad real de usar librerías reutilizables y deberían ser la base de los futuros entornos de desarrollo que integren, junto a librerías de modelos de distintos ámbitos, herramientas de validación, reducción de modelos, bases de datos de propiedades fisico-químicas de productos y ligazón de propiedades microscópicas y macroscópicas, análisis dinámico, optimización, realidad virtual, simulación estocástica, simulación distribuida, etc. Todo ello para dar soporte a las funciones de diseño integrado, control y optimización, entrenamiento de personal, planificación, simulación predictiva para sistemas de ayuda a la decisión en línea, etc., todas las cuales necesitan tipos de modelos con características especiales.

Es obvio que esta tarea requiere un esfuerzo conjunto de muchos equipos de investigación y de fabricantes de equipos, y de estandarización, pero de la disponibilidad de estas herramientas dependerá en buena medida la implantación de sistemas avanzados en la industria.

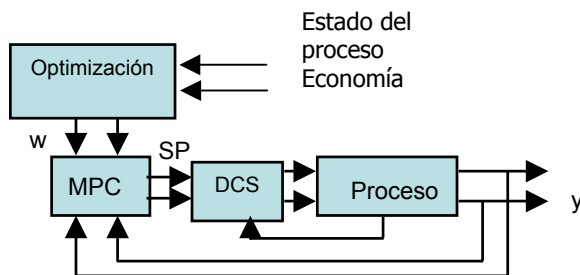
#### 4.2 Control avanzado

Hemos visto como la integración de procesos genera una dinámica mas compleja en los mismos y desplaza las necesidades de regulación hacia la planta completa. Hemos hablado también de la necesaria flexibilidad y cambios de productos, regímenes de trabajo etc. Del mismo modo hemos mencionado los requisitos específicos de control de poblaciones, procesos batch, sistemas distribuidos, redes, etc.

Un control adecuado de estos sistemas requiere del uso de modelos mas allá de los lineales al uso. El MPC ha probado ser una técnica capaz de dar respuesta a la interacción, las dinámicas complejas y la presencia de restricciones y cuenta con un alto grado de aceptación en la industria, pero los retos anteriores hacen necesario el uso del MPC no-lineal y su implementación en ciertos procesos exige una garantía de estabilidad y robustez.

Ello se aplica tanto a procesos continuos mas o menos convencionales, incorporando modelos fisico-químicos o similares capaces de operar en rangos amplios, como a otros tipos de sistemas igualmente importantes pero que no han recibido la misma atención en la literatura de control, entre los que podemos citar:

- procesos híbridos en los que parte de las variables de decisión son continuas y parte discretas (enteras), o de estructura variable,
- procesos batch en los que el objetivo se define no como seguimiento de trayectorias sino en términos de producto al final del batch o de tiempo de operación,
- procesos de partículas con un objetivo de control de poblaciones,
- problemas de control distribuido, donde se requiere el control no solo a lo largo del tiempo sino también en alguna dirección espacial,
- problemas de arranques y paradas donde se trata de optimizar los tiempos y costos de la operación.



**Figura 5.** Los modelos son la base del control avanzado en todos sus niveles

Esto plantea además problemas asociados de estimación de estados y adaptación de modelos en línea, métodos de optimización dinámica eficaces en tiempo y precisión y, particularmente, profundizar la teoría sobre estabilidad y robustez que nos permita un uso seguro. Quizás sea importante resaltar en este punto que la optimización ha de verse cada vez más no como una herramienta sino como una parte esencial del problema que condiciona enfoques y soluciones. En este sentido vale la pena mencionar las posibilidades que las recientes técnicas de optimización multiparamétrica abren para la implementación en tiempo real en procesos rápidos de técnicas casi exclusivamente consideradas para procesos lentos.

#### 4.3 Monitorización y supervisión

Buena parte de las posibilidades de implementación de sistemas de control avanzado y optimización, y su extensión a nuevos campos, se basan en la disponibilidad de una mejor información del proceso. En parte, los nuevos sensores basados en espectroscopia, infrarrojos, etc. y sistemas de instrumentación proporcionarán nuevas medidas, pero para traducir éstas en información útil para control y otros niveles de decisión se necesitará un proceso de señal más sofisticado y avanzar en temas como estimación de variables no medidas usando sensores software, elaboración de índices de rendimiento económico y comportamiento dinámico de la planta en línea, sistemas de agregación de información para otros niveles, reconciliación de datos, etc.

Por otra parte, el funcionamiento correcto de la automatización depende en gran medida de la habilidad para conocer el estado real de funcionamiento del proceso, bien en su operación normal, o en funcionamiento degradado debido a la aparición de fallos o cambios de estado interno. Los modernos sistemas basados en buses de campo facilitan esa tarea al ofrecer diagnósticos automáticos de la instrumentación, pero eso es solo una parte del diagnóstico: los puntos fuertes son el propio proceso y el sistema de control. Es claro que en este sentido los sistemas de DDF deben ser más específicos de procesos concretos y que el modelado y las técnicas estadísticas jugarán un papel determinante en los mismos. Los sistemas de supervisión que combinen la detección y el diagnóstico de fallos con la reconfiguración y robustez frente a fallos, particularmente en sistemas complejos serán una pieza clave en la industria de procesos del futuro donde la seguridad es un factor primordial, así como el modelado del funcionamiento conjunto de las funciones de sus elementos y el aprendizaje automático de reglas de funcionamiento.

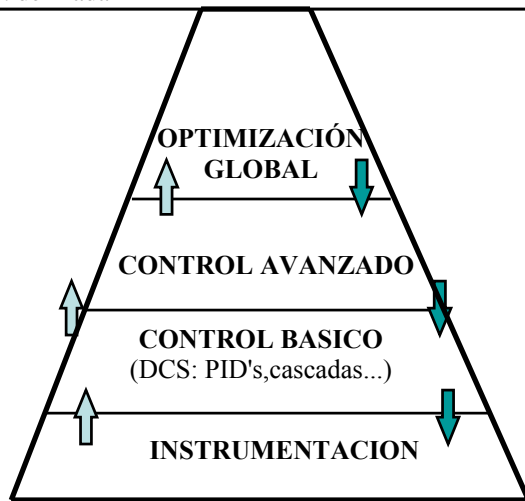
Conviene no perder de vista aquí los propios sistemas de seguridad de la planta y su chequeo y validación, dada la importancia de la seguridad en estas aplicaciones.

#### 4.4 Optimización de planta completa

El control de procesos se ha centrado tradicionalmente en los niveles inferiores de la jerarquía de control: instrumentación, PIDs, estructuras de control, detección y diagnóstico de fallos, etc. ligados a uno o unos pocos lazos de control, siendo su objetivo el mantener las variables controladas próximas a unos valores de consigna fijados de acuerdo al criterio de los responsables de planta.

Sin embargo, ya hemos visto que cada vez más el interés se centra en problemas de control de planta completa, en los que interviene la dinámica combinada de muchas unidades de proceso que interaccionan. Por otro lado, si el nivel de control de planta es capaz de mantenerla en los puntos de operación deseados, lo lógico es escoger estos de acuerdo a algún criterio de optimización que tenga en cuenta los costes y respete las calidades u otros factores de la producción, utilizando un modelo coherente con el control y el proceso.

De hecho hoy día hay sistemas comerciales que realizan esta función: muchos controladores MPC llevan incorporada una capa de optimización de consignas con criterios económicos y otros ofrecen sistemas RTO (*Real Time Optimisation*) para ajustar dichas consignas. No obstante, los primeros se basan en los modelos lineales del controlador y están orientados a una o unas pocas unidades de proceso, y los segundos suelen considerar solo el caso de optimización estacionaria.

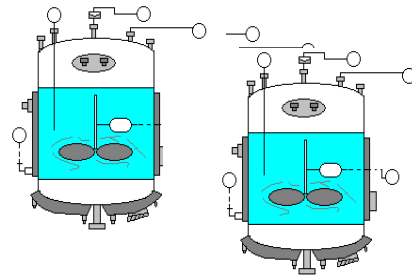


**Figura 6.** Los problemas de control y optimización deben abordar todos los niveles de la empresa.

Lo que se requiere, es generalizar y extender estas técnicas, combinando sistemas de control avanzado de planta completa con sistemas de optimización de consignas. Estos deberían de usar modelos agregados que sean capaces de representar las dinámicas globales de una factoría y sus magnitudes macroeconómicas relevantes, junto a métodos numéricos de optimización global para fijar los valores de compromiso mas adecuados, traducidos a valores de consigna, entre las distintas alternativas en función del estado del proceso y otros factores externos de precios, demandas, disponibilidades, etc. En definitiva, mover el control a niveles altos de la jerarquía, hacia los sistemas MES uniendo los sistemas de negocio, de gestión de la información y de automatización de planta en sistemas de ayuda a la decisión integrados.

#### 4.5 Planificación y secuenciamiento

El control de procesos convencional está formulado con la vista puesta en los procesos continuos en cuyo dominio ha hecho contribuciones significativas. Pero en la industria, los procesos batch o semi-batch también tienen una presencia significativa y el control de procesos no debería dejarlos de lado. Ya hemos mencionado las especificidades del control de una unidad que funciona por lotes al hablar del control avanzado no-lineal, pero quizás el elemento mas importante es la gestión del comportamiento global de un conjunto de unidades de planta a través de su planificación y secuenciamiento. Estas son técnicas conocidas, pero lo novedoso es la necesidad de aplicarlas en tiempo real teniendo en cuenta la dinámica de los procesos y las múltiples incidencias que ocurren en la producción, así como la capacidad de adaptación a los pedidos o necesidades del mercado. En un cierto sentido pueden considerarse en el contexto del control híbrido y la optimización de planta con lo que guardan estrecha relación. Aquí también el uso de tecnologías de optimización está en la base de todos los planteamientos.



**Figura 7.** Los procesos batch plantean nuevos retos de control, optimización, secuenciación,...

#### 4.6 Diseño integrado de proceso y control

Lo habitual es que un grupo de ingenieros diseñe un proceso y su estructura (*síntesis*) de acuerdo a una serie de requisitos en base a modelos de balances estacionarios, sin tener en cuenta por tanto su dinámica. Después, cuando la nueva instalación ya está terminada, el ingeniero de control e instrumentación ha de añadirle el sistema de control que permita su correcta operación. Sin embargo, ocurre con cierta frecuencia que el proceso no siempre es fácilmente controlable, sino que su operabilidad se ve limitada por diversos factores tales como los otros aspectos de la integración a los que nos hemos referido (dinámicas extra debidas a integración energética y másica) o a requisitos de calidad estrictos, restricciones, etc. todo lo cual alarga la puesta en marcha de las instalaciones y crea problemas en su operación. Un enfoque mas racional es considerar la dinámica del proceso y su control conjuntamente desde la fase misma de diseño, garantizando que el sistema será después operable, lo que acorta la puesta en marcha y permite una mejor operación en producción. Este diseño integrado introduce aspectos dinámicos y de control en la síntesis de procesos y permite obtener procesos mas operables, o introducir diseños mas rentables que no se hubieran hecho por el miedo a obtener plantas teóricamente no operables (por ejemplo, inestables en lazo abierto).

El análisis del comportamiento obtenible de un modelo (no-lineal), el diseño de controladores y las técnicas de optimización mixta –entera son los campos que soportan este enfoque, que extiende los problemas clásicos de síntesis de redes de intercambio de calor, de redes de reactores, de procesos de reacción-separación, etc. al campo dinámico.

En esta línea no está lejos el día en que muchas unidades de proceso se suministren por los fabricantes con sus sistemas de control incorporado como resultado de una optimización conjunta de la unidad y dicho sistema de control, tendencia que comienza a apuntarse en el caso de unidades de proceso complejas.

#### 4.7 Sistemas complejos, redes, logística,...

Ya hemos señalado la importancia de extender el control a los niveles altos de la jerarquía de decisión. En una dirección similar, si el control quiere jugar un papel relevante entre las tecnologías del futuro, debe abordar nuevos campos caracterizados por su complejidad, donde la dinámica juega un papel importante y donde un esquema de toma de decisiones en tiempo real en un entorno cambiante, para ser eficaz, necesita utilizar modelos dinámicos y, probablemente, algún criterio de optimización.

Ejemplos de tales sistemas son las redes de distribución de agua, gas, ..., las cadenas de suministro de las empresas, sistemas de distribución de productos, los sistemas biológicos de crecimiento de poblaciones, etc. que son sistemas un poco atípicos respecto a las aplicaciones en el campo del control de procesos, pero de enorme importancia. Todos ellos involucran nodos autónomos que toman sus propias decisiones a la vez que influyen y son influidos por los demás, dando como resultado un comportamiento global que se requiere controlar.

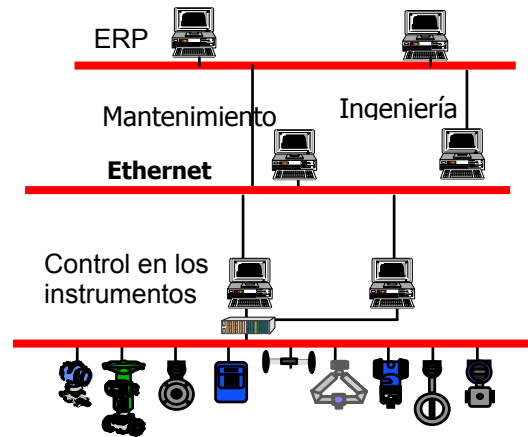
Este tipo de sistemas requieren de una estructura de control jerárquica, que combine el control local en los nodos con una visión de conjunto que tenga en cuenta en sus modelos y objetivos el comportamiento global del sistema y pueda gestionar las interacciones en forma de ordenes a los nodos locales. Temas de trabajo abiertos en el control de redes, junto al modelado y optimización, son los relativos al análisis dinámico de estas estructuras, de naturaleza híbrida, cara a su uso en diseño.

#### 4.8 Informática industrial

Cualquier visión del futuro del control de procesos no puede apartarse de la forma en que los algoritmos pueden ser implementados para realizar el control físico del proceso. Uno de los rasgos de la sociedad actual es, sin duda, la disponibilidad a bajo precio de sistemas de cómputo y comunicaciones, lo cual previsiblemente continuará en el futuro, así como el papel que estas juegan en todos los ámbitos y la facilidad de interconexión debida a la extensión de los sistemas abiertos o los estándares "de facto". Ello facilita la utilización de enfoques y la implementación de soluciones impensables hace algún tiempo.

Por otro lado, parcialmente superados algunos escollos de normalización, cabe esperar que progresivamente se potencie el papel de las redes de instrumentación y se vaya a la implementación de un verdadero control distribuido, sin necesidad de los armarios de controladores actuales, aunque estos subsistan durante un periodo dilatado de tiempo. De hecho esta arquitectura es posible con los actuales buses de campo, donde los controladores pueden residir en los propios instrumentos y las señales de medida o actuación se transmiten por el bus en forma digital. Si bien hoy día el control se limita a reguladores PID o funciones lógicas, el aumento de

potencia de los microprocesadores localizados en los instrumentos hará posible la implementación de sistemas más complejos en red. Esto presenta importantes desafíos, no solo desde el punto de vista de software de tiempo real, sino en particular de teoría de lo que podemos llamar control en red, en la que los periodos de muestreo pueden no estar garantizados y que es uno de los retos que deberá abordar el control.



**Figura 8.** Un sistema de control moderno basado en bus de campo.

Desde el otro extremo, la implementación de sistemas de control de planta completa, control de redes, integración vertical de funciones en la empresa, etc. apunta a la operación en redes heterogéneas, donde la operación distribuida y a distancia, la integración de sistemas y comunicaciones, el cálculo distribuido, las bases de datos distribuidas, etc. serán los pilares de cualquier realización práctica. Por ello, probablemente, una visión que considere a la informática industrial como parte del control y no como una herramienta auxiliar estará más próxima a las exigencias de la realidad.

Otro campo de especial interés estará en el software de diseño, CACSD, que deberá integrar aspectos de modelado y simulación, análisis y diseño, optimización, interfaces, etc. con la generación de código de implementación.

### 5. ALGUNAS REFLEXIONES

Hemos dibujado algunos rasgos de las líneas que podría, y a nuestro juicio debería seguir, el control de procesos en los próximos 10 ó 15 años para implementar la "fábrica del futuro" y dar respuesta a los retos socioeconómicos que tiene planteada la industria de procesos.

Por supuesto muchos desarrollos y avances del control de procesos pueden hacerse en otros campos y sin tener para nada en cuenta el marco que hemos considerado ni las necesidades de esa "fábrica del futuro" y es positivo que así sea. De hecho muchos avances científicos se han producido sin ninguna conexión directa con un problema práctico. Pero si la mayor parte de los desarrollos se hacen sin esta perspectiva, estaremos conduciendo el control de



procesos a una vía muerta, bien de solo desarrollo e innovación incremental, o bien de una investigación mas o menos teórica apartada de las necesidades de la industria comprometiendo el futuro de esta y el del propio control de procesos. La perspectiva con la que debemos trabajar es hacer en la industria de procesos el cambio que otras industrias, automóvil, aeroespacial, etc. han realizado en los últimos 10-15 años y que ha hecho de las mismas puntos de referencia del desarrollo tecnológico garantizando el futuro de los respectivos sectores.

Pero vale también la pena mirar al presente, y en particular a la situación de nuestro país, para saber de donde partimos y hacer una reflexión sobre el camino y nuestras principales carencias.

En España hay un número relativamente reducidos de grupos trabajando en control de procesos, la mayoría en el área de Ingeniería de Sistemas y Automática, y menor proporción en Electrónica, Ingeniería Química o Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. Bastantes de ellos mantienen contacto con la industria y actividad a nivel internacional pero no hay un reflejo adecuado de ello en la enseñanza donde hay bastantes titulaciones técnicas en las que el control y la informática industrial tienen escasa presencia.

La industria, por su parte, con honrosas excepciones, si bien tiene un alto grado de automatización, es muy poco receptiva a innovaciones posteriores. De hecho temas como MPC, sintonía automática de controladores, buses de campo, simulación, etc. que son temas maduros disponibles comercialmente, encuentran escaso eco. Varios factores contribuyen a ello, desde la falta de formación propia y de referencias de aplicaciones previas, hasta la escasa oferta de soluciones de control avanzado de los propios suministradores, (quizás por la misma razón). Adicionalmente, su visión de la Universidad o el CSIC es de un ámbito muy “teórico” y desconectado de sus necesidades reales, incluso de formación. Curiosamente, la falta de personal formado en las tecnologías mencionadas anteriormente es uno de los principales motivos de preocupación entre directivos de la UE que aparece en muchas encuestas.

Ante este panorama muchos de los planteamientos de las secciones anteriores pueden sonar a música celestial, pero, esta es la realidad que tenemos. En todo caso, conviene hacer dos reflexiones: una que todo en la vida es diverso y se desarrolla con partes mas avanzadas y otras que van detrás y la única forma de avanzar es continuar el camino y vincularse a las corrientes y sectores mas dinámicos esperando que estos tengan un efecto movilizador en el resto. De hecho la implantación de nuevas técnicas, sistemas, etc. en la industria de procesos es raro que se produzcan si no vienen precedida de referencias previas de uso. La segunda es que todo es mejorable, y si queremos contribuir al cambio de la situación actual debemos también empezar por reflexionar sobre nuestra propia actividad docente e

investigadora considerando el contexto en que nos movemos y realizar una labor de extensión al menos en tres ámbitos:

- El control debe estar presente con mas fuerza en la formación de los titulados relacionados con el control de procesos: Ingenieros químicos, organización, industriales, informáticos, etc. y debemos hacer un esfuerzo para atraer a las personas de otras áreas que trabajan en el tema hacia IFAC y otros foros. También, sin dejar de lado la teoría, que es la base de toda formación seria, hay que ser sensibles a las críticas que nos llegan y repensar lo que enseñamos, mejorando las carencias obvias en instrumentación, informática industrial, etc. Hoy día nuestra área se basa no solo en la teoría y el proceso, sino también en la implementación (comunicaciones, informática, optimización, proceso de señal..).
- Hay que vincularse mas a las tareas de difusión en cooperación con la industria, usuarios y suministradores, para dar a conocer las ventajas, perspectivas y posibilidades del control, quizás plasmada en demos sobre temas como sintonía de PID, simulación, MPC, buses de campo, etc. que están disponibles comercialmente, lo cual al mismo tiempo ayudará a generar confianza y a acercarnos a problemas reales que preocupan en la industria. Necesitamos dar mas visibilidad al tema del control también desde un punto de vista social e institucional si queremos encontrar apoyo para el mismo.
- Hay también que realizar un trabajo mas coordinado de investigación, por un lado con la propia industria, y por otro con otros profesionales, formando equipos competentes multidisciplinares (matemáticos, informáticos, especialistas de diversas ramas de ingeniería,...), todo ello dirigido con objetivos ambiciosos siguiendo un camino, no de especialización y de visión de la realidad desde la óptica de una sola disciplina, sino de integración de diversas ramas para dar una respuesta seria a un objetivo común marcado quizás por la perspectiva de esa “industria del futuro”.

Hay que abordar los problemas que están delante y para los cuales el control tiene una metodología y un enfoque sistémico. Muchos de esos problemas no son “clásicos” y pertenecen a lo que podemos llamar niveles superiores de la jerarquía, como algunos de los que hemos mencionado, pero son interesantes y socialmente importantes, y además estamos en buena posición para abordarlos, quizás mejor que comienzan a hacerlo desde otras disciplinas quizás con herramientas o métodos no tan adecuados. El control de procesos debe usar sus sólidos

fundamentos para mirar hacia arriba y confiar en poder resolver los nuevos problemas como ha resuelto muchos otros de instrumentación y control en el pasado y como los están resolviendo en otros campos de aplicación.

## 6. REFERENCIAS

- Milestones reports of TC, *IFAC World Congress*, Barcelona, 2002
- Murray R. M., (2002) Control in an information rich world, Caltech, USA,  
<http://www.cds.caltech.edu/~murray/cdspanel>
- Murray R. M (2003) Future directions in control, dynamics and systems., *EJC*, vol.9, n 2, pp.144-158
- The Future for Manufacturing in Europe 2015-2020, *FuTMaN report*, EC 2003 <http://futures.jrc.es/>
- Workshop on future and emerging control systems, IST, EC 2000,  
[www.cordis.lu/ist/ka4/ipcn/events.htm](http://www.cordis.lu/ist/ka4/ipcn/events.htm)