

Herramienta basada en una metodología para Diseño Integrado

Gil, A.[†], Vega, P.[†], Francisco, M.[†], Cembellín, A.[†]

[†]Dpto. de Informática y Automática
Av. F.Pedro Ballesteros 2, 37700.
E.T.S.I.I., Universidad de Salamanca
Béjar (Salamanca).
Tfno: +34-923 40 80 80 Fax: +34-923-40 81 27

{abg, pvega, mfs, cembe}@usal.es

Resumen

El objetivo de este trabajo es plantear y aplicar una metodología en diseño integrado basada en la teoría de optimización, que permita realizar en procesos fundamentalmente de reacciones bio-químicas, la síntesis, diseño y el estudio del componente dinámico de los procesos simultáneamente, empleando modelos matemáticos dinámicos de los procesos y sistemas de control clásicos. Para la consecución de dicho objetivo ha sido necesario desarrollar una herramienta de software, lo más general posible, que resuelva los problemas de optimización dinámica no lineal con restricciones que resultan.

El artículo comienza con una breve descripción de las bases del diseño integrado y plantea después una metodología de trabajo. Posteriormente presenta una herramienta software basada en dicha metodología y se realizan distintas aplicaciones en un sistema sencillo de nivel.

Palabras Clave: Diseño integrado, optimización con restricciones no lineales, simulación, optimización dinámica.

1 INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los países industrializados, la legislación actual impone estrictos límites en la calidad de los productos resultantes de los procesos industriales. Distintos factores, incluidos salud pública y medioambiental así como económicos son tenidos en cuenta. Consecuentemente, los sistemas de control deben de ser diseñados e implementados para ajustarse con las especificaciones totales del proceso, como un elemento más en el diseño de procesos.

El modo tradicional de diseño de procesos, se ha venido realizando mediante el uso de modelos estacionarios y conocimiento heurístico del proceso. El resultado han sido plantas difíciles de controlar y consecuentemente poco flexibles. Adicionalmente, los procesos químicos constituyen problemas complejos en cuanto al control, debido a diferentes factores: acción de perturbaciones, complejidad de los procesos en sí mismos bajo el punto de vista microbiológico, etc. En ocasiones, la corrección a posteriori de estos fallos en el diseño suponen el añadir nuevos elementos (reactores). Estas soluciones no solo incrementan drásticamente el coste (gastos de operación y construcción) sino que además el comportamiento de la planta resultante no está garantizado.

El principal objetivo del Diseño Integrado es obtener un coste mínimo en el diseño unido a una máxima productividad a la vez que asegurar un comportamiento en la planta donde las restricciones de seguridad y funcionamiento se satisfagan (máxima eficacia energética, buena operatividad respecto a : flexibilidad, controlabilidad, seguridad y regulación medioambientales).

La investigación en el campo del diseño integrado ha de proporcionar metodologías de trabajo a la vez que herramientas que faciliten y permitan su aplicación y la consecución práctica de objetivos de una manera coordinada generando buenos diseños que trabajen de manera eficiente.

2 FORMULACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA DISEÑO INTEGRADO

El sistema de trabajo se establece principalmente en tres etapas. En la primera se plantean distintas configuraciones válidas de las plantas a diseñar,

obteniéndose además los modelos de optimización de cada una de ellas. En la segunda etapa, se resuelve el problema de diseño clásico o tradicional donde se obtienen los parámetros de diseño de las plantas en un punto estacionario de trabajo, minimizando costes de construcción y operación satisfaciendo los requisitos de funcionamiento del proceso. En la tercera de las etapas se aborda el problema de diseño, fijando además alguna característica relacionada con la controlabilidad en lazo abierto, como es la estabilidad.

Para la resolución del problema multiobjetivo planteado se minimiza una suma ponderada de subobjetivos que convierte el problema en uno de optimización no lineal con restricciones, donde ciertos factores de peso, ponderan la importancia de los distintos objetivos en el problema. Los pesos son normalizados para la asignación de un criterio en las prioridades en el diseño de la planta.

El problema de optimización multiobjetivo no lineal con restricciones que pueden ser lineales y no lineales, es formulado matemáticamente del modo siguiente:

$$\begin{aligned} \min_x \quad & U[f_1(x), f_2(x), \dots] \\ \text{sujeto a} \quad & h(x) = 0 \\ & g(x) \leq 0 \\ & x \in X \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

U : función objetivo a optimizar

x : vector que representa los parámetros de diseño, generalmente relacionados con dimensiones y variables físicas del proceso y planta.

$f_1(x), f_2(x), \dots$: representan los diferentes objetivos de control, económicos, estabilidad...

$h(x)$: representa condiciones de igualdad que generalmente se corresponden con balances y equilibrios en el proceso, el modelo del proceso.

$g(x)$: representa restricciones de proceso que generalmente se corresponden con condiciones físicas y restricciones de operación.

El escalado es muy importante en las aplicaciones prácticas ya que permite un análisis del modelo y el diseño (mediante selección ponderada) más sencillo. Requiere por ello un juicio inicial del diseño del proceso acerca de los requerimientos del sistema. Para su realización, las decisiones se toman basándose en el rango de magnitudes deseado y las

desviaciones permitidas de cada salida a los cambios debidos a las perturbaciones. Un método de escalado útil consiste en hacer los pesos de las variables menores que uno en magnitud. Esto se realiza dividiendo cada variable por su máximo valor esperado o cambio permitido.

Las plantas obtenidas en cada etapa son validadas y estudiadas mediante simulación, haciendo uso de los modelos dinámicos de las mismas y partiendo de los puntos de trabajo estacionarios obtenidos en la optimización. En dichas simulaciones los diseños son sometidos además a diferentes pruebas mediante la inclusión de perturbaciones en aquellas variables de entrada donde pueden producirse en situaciones reales y variaciones en las variables de control para la obtención de diferentes parámetros.

Finalmente, se realiza un estudio comparativo entre los distintos resultados obtenido de los modelos.

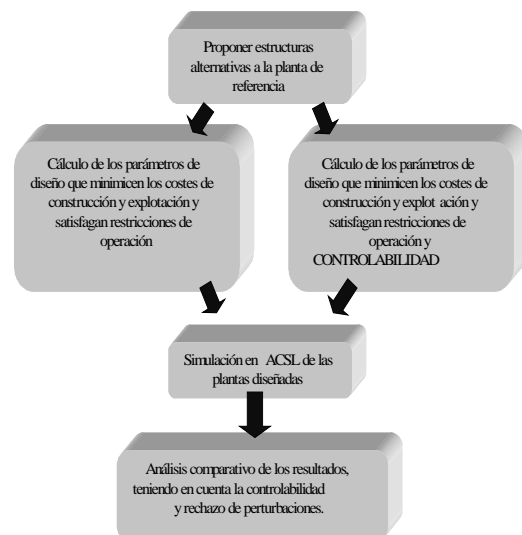


Figura 1: Metodología básica de trabajo

Un esquema de la metodología básica de trabajo puede verse en la figura 1.

3 GENERACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE

3.1. PROGRAMAS UTILIZADOS

Los programas utilizados en el desarrollo de este trabajo han sido el paquete MATLAB (*MATrix LABORatory*), programa para el cálculo numérico computacional junto con el programa de simulación ACSL (*Advanced Continuous Simulation Language*) conectados mediante el intercambio dinámico de datos (DDE, *Dynamic Data Exchange*).

El procedimiento de optimización programado en MATLAB necesita llamar a ACSL en distintos momentos de los desarrollos. Por tanto, hay que ejecutar el procedimiento de optimización y ejecutar a simulación al mismo tiempo, e intercambiar datos entre los dos a través del protocolo DDE.

3.2. CONEXIÓN DE PROGRAMAS

Tanto MATLAB como ACSL disponen de funciones que permiten el uso del protocolo DDE. En los programas desarrollados utilizamos MATLAB como aplicación cliente, de manera que se hace uso de las funciones DDE para establecer y mantener la conversación con ACSL que actúa como aplicación servidor, según apreciamos en la Figura 2.

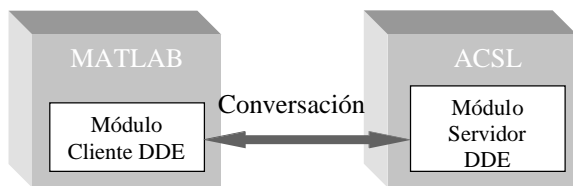


Figura 2: Conexión de *MATLAB* y *ACSL* a través de *DDE*

El intercambio de datos se produce en tres estadios del trabajo, que ilustraremos a través de la aplicación a un sistema de nivel, que estudiaremos en el siguiente apartado:

- a. *Cálculo del modelo en el espacio de estados*: en cada iteración la optimización genera un valor de x (posible solución con los parámetros de diseño) que es pasado a ACSL donde se calcula el modelo en el espacio de estados, para lo cual necesita linealizar en torno al punto transferido.

$$\dot{x} = Ax \quad (2)$$

Una vez obtenida la matriz de estados A , es devuelta a MATLAB. El flujo de información compartida entre los programas aparece resumido en la

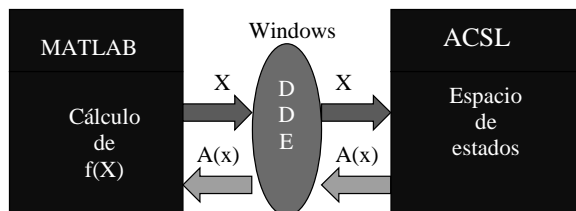


Figura 3: Cálculo del modelo de estados

- b. La necesidad de trabajar con *optimización dinámica* llevó a implementar la

herramienta de manera que permite la inclusión de simulación en cada iteración. Permitiendo la inclusión de restricciones dinámicas, así como en todo momento validar a través de la simulación los distintos parámetros que se están calculando. El resultado de cada simulación puede además ser incluido en otros parámetros para el cálculo del óptimo en MATLAB, según se ve en la Figura 4.

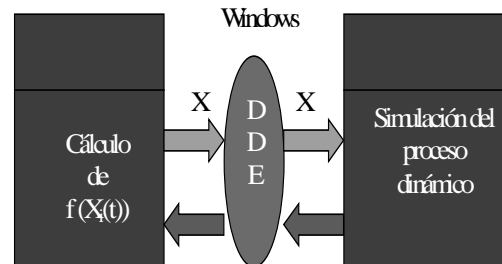


Figura 4: Mecanismo de optimización dinámica

- c. *Trasferencia del resultado de la optimización para su simulación*: una vez se obtiene la solución de diseño (con la convergencia del problema planteado), contamos con un punto de trabajo estacionario y las magnitudes de la planta, pasamos a la etapa de validación del diseño obtenido. Esta validación se realiza totalmente en ACSL que mediante la conexión a través de DDE con MATLAB, tiene integrados los valores finales, de modo que en este punto se puede realizar mediante simulación en ACSL las pruebas necesarias en el diseño final de planta generado.

4 APLICACIÓN A UN SISTEMA DE NIVEL

El estudio comienza aplicándose a un sistema de nivel, proceso con un modelo sencillo que permite generar y depurar de manera más sencilla las técnicas y metodología que en un futuro se podrán aplicar sobre cualquier proceso industrial real.

En este trabajo se utilizará el cálculo de los autovalores de la matriz de estado como una restricción en el cálculo del diseño de cada planta, para validar la validez de la herramienta, pudiéndose utilizar cualquier otro. De manera que se impone la estabilidad en el diseño de planta, obligando a que los autovalores sean negativos.

Este estudio se amplia para incluir parámetros dinámicos en el proceso de diseño de planta en lazo abierto. Completándose con la inclusión del sistema de control junto con parámetros dinámicos en la operación, para así realizar un diseño de planta en lazo cerrado.

4.1 FORMULACIÓN

Consideramos primeramente el sistema de nivel de líquido que aparece en la figura. En este sistema el líquido entra a un tanque mediante un flujo q llenándolo hasta una altura h . La salida del líquido del tanque se produce a través de una válvula de carga, con una cierta apertura a , en la parte inferior del tanque.

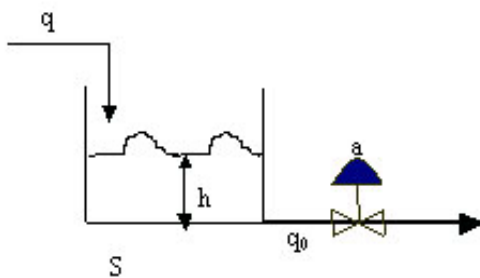


Figura 5: Sistema de nivel, primera configuración

Ajustado su comportamiento al siguiente modelo:

$$S \frac{dh}{dt} = q - ka\sqrt{h} \quad (3)$$

donde:

- S: área del depósito(dm²)
- q: caudal de entrada al depósito (l/hora)
- h: nivel del líquido(dm)
- q₀: caudal de salida del depósito
- a: apertura de la válvula
- k: Constante relacionada con la planta

A continuación proponemos dos estructuras alternativas del proceso, presentando los modelos dinámicos correspondientes. Plantearemos después el cálculo de los parámetros de diseño en cada configuración primeramente para resolver el problema de diseño clásico y añadiendo medidas de la estabilidad posteriormente.

a. Primera configuración

El modelo matemático correspondiente a la primera de las configuraciones se corresponde con el modelo descrito en el apartado anterior.

El planteamiento para el cálculo de los parámetros de diseño de la primera configuración es el siguiente: dado un punto de operación determinado por el caudal de entrada, queremos obtener los parámetros de diseño que optimicen los costes de construcción del sistema relacionados con las dimensiones del depósito, sujeto a un conjunto de restricciones que permiten que se cumplan las relaciones físicas que sitúan las variables en un rango razonable mediante unos límites superiores e inferiores de acotación y de operación del proceso. Estos parámetros son el tamaño de las unidades del mismo minimizando los valores de las variables, reflejado en la Figura 6, que definen un punto de operación estacionario.

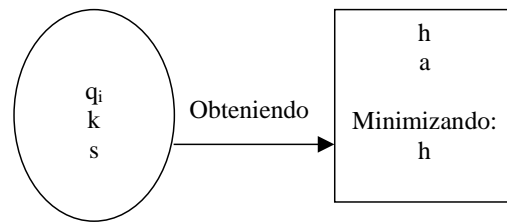


Figura 6: Esquema de optimización de la 1ª configuración

Matemáticamente este problema se puede expresar como un problema de Optimización No Lineal con restricciones. El índice que se minimiza o función de coste, incluye dos objetivos uno corresponde al coste de construcción y el segundo a los residuos del sistema de ecuaciones.

Elegimos una función de coste f :

$$f = r^2 * \alpha + h^2 * \beta \quad (4)$$

de manera que el problema consiste matemáticamente en:

$$\min_{h,a} f = \min_{h,a} [(\alpha \cdot h)^2 + (\beta \cdot r)^2] \quad (5)$$

Donde:

- r: residuos de la solución del sistema de ecuaciones del modelo.
- h: altura del líquido en el depósito
- α, β : pesos asociados

El sistema resultante a minimizar, está sujeto a una serie de *restricciones*:

Restricciones sobre el ajuste de las *ecuaciones del modelo* en estado estacionario, indicadas por el vector de residuos incluido en la función objetivo. Imponer que $r=0$ es una condición excesivamente fuerte para la optimización del problema, luego lo que se plantea es hacer los residuos, r , lo menor posible, estamos hablando así del cumplimiento del modelo en estado estacionario:

$$r = q - ka\sqrt{h} \quad (6)$$

Restricciones *de proceso*:

Tiempo de residencia en el depósito: El depósito verifica que los tiempos de residencia tienen que ser superiores o iguales a una hora: $\frac{V}{q_0} \geq 1$ (hora) (7)

Apertura de la válvula en tanto por uno $0 < a < 1$ (8)

Restricciones físicas que sitúan las variables en un rango razonable mediante unos límites superiores e inferiores de acotación:

Se hace el cálculo del nivel de líquido en la planta, de manera que se fija la altura del depósito en una proporción superior, en torno al 30%, para que se adapte a contener dicho nivel. De modo que la altura del depósito queda fijada con la relación matemática siguiente: $h_{depo} = 1.3 h$

En la segunda fase del estudio se añaden a las restricciones citadas la imposición de estabilidad del sistema. De modo que el modelo del sistema se formula en el espacio de estados. La planta tiene como estado el nivel, la variable de entrada considerada es el caudal de entrada. Las perturbaciones más importantes de este tipo de proceso se producen en el caudal de entrada a la planta. La variable principal de salida es el nivel en el líquido y la apertura de la válvula constituye la variable de control.

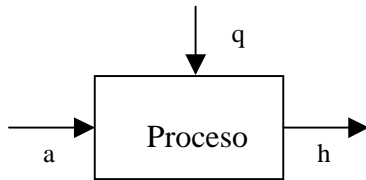


Figura 6: Diagrama del primer proceso

El modelo lineal en espacio de estados que se obtiene, tiene una matriz de estados A de orden 1x1 correspondiente al estado h. La restricción que añadimos en esta fase consiste en obligar a que los autovalores de la matriz de estados, sean negativos, luego:

Restricciones en la estabilidad: $\lambda_1 < 0$

b. Segunda configuración

Consideramos como la segunda estructura alternativa para el diseño de un sistema de nivel el que aparece en la Figura 7. En este sistema interactúan dos tanques colocados en serie. Teniendo en cuenta el modelo correspondiente a un sistema de nivel constituido por un depósito, ya descrito, estudiaremos dos depósitos con sus correspondientes válvulas unidos en serie, en lazo abierto.

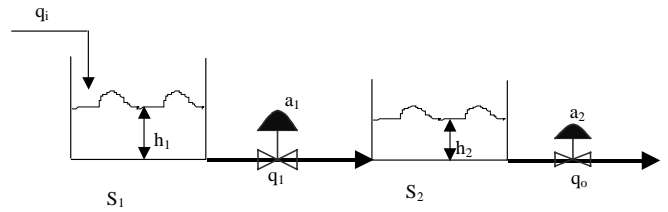


Figura 7: Segunda configuración propuesta

El modelo matemático correspondiente a la estructura planteada es el siguiente:

$$S_1 \frac{dh_1}{dt} = q_i - k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2} = q_i - q_1 \quad (9)$$

$$S_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - k_2 a_2 \sqrt{h_2} = q_1 - q_o$$

donde:

S_1, S_2 : áreas de los depósitos (dm^2)

q_i : caudal de entrada al depósito 1 (l/hora)

q_1 : caudal de entrada al 2º depósito (l/hora)

q_o : caudal de salida del 2º depósito (l/hora)

h_1, h_2 : nivel del líquido en cada depósito (dm)

a_1, a_2 : aperturas de la válvulas en tanto por uno

k_1, k_2 : constantes relacionadas con la estructura de la planta

El planteamiento del problema de diseño para esta segunda estructura consiste en que fijado un punto de trabajo definido por el caudal de entrada, las superficies de las secciones de los tanques y las constantes (k_1, k_2) relacionada con características de la planta obtenemos los parámetros de diseño que optimicen la estructura y funcionamiento del sistema descrito. Minimizamos así el coste de construcción generando un punto de operación estacionario, sujeto a un conjunto de restricciones que permitan se cumplan todas las condiciones físicas y de proceso. El esquema del planteamiento del problema de optimización para el diseño de la segunda configuración se ilustra en la siguiente figura:

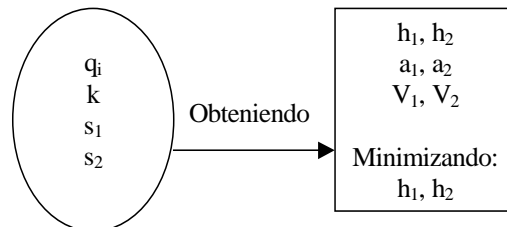


Figura 8: esquema del planteamiento para la 2ª configuración

Fijamos una función de coste f ahora en función de los dos tanques :

$$f = [\alpha * h_1]^2 + [\beta * h_2]^2 + [\phi * r]^2 = [\alpha * h_1]^2 + [\beta * h_2]^2 + [\phi_1 * r_1]^2 + [\phi_2 * r_2]^2 \quad (10)$$

Donde:

r_1, r_2 : residuos de la solución del sistema de ecuaciones del modelo.

h_1, h_2 : altura del líquido en el depósito

$\alpha, \beta, \phi_1, \phi_2$: pesos asociados

El problema de optimización puede expresarse de la manera siguiente:

$$\min_{h_1, h_2, a_1, a_2} f \quad (11)$$

Con las restricciones, ya explicadas con más detalle en la primera configuración:

Restricciones sobre la verificación de las *ecuaciones del modelo*

$$r_1 = q_i - k_1 a_1 \sqrt{h_1 - h_2} = q_i - q_1 \quad (12)$$

$$r_2 = q_1 - k_2 a_2 \sqrt{h_2} = q_1 - q_o$$

Restricciones *de proceso*:

Tiempo de residencia en los depósitos:

$$\frac{V_1}{q_1} \geq 1, \quad \frac{V_2}{q_0} \geq 1 \quad (\text{hora}) \quad (13)$$

Restricciones físicas

Aperturas de las válvulas en tanto por uno

$$0 \geq a_1, a_2 \geq 1 \quad (14)$$

Volúmenes positivos y con la condición de que el primer depósito sea mayor que el segundo:

$$V_1 \geq V_2 \geq 0 \quad (15)$$

Hemos fijado las superficies de los depósitos, de modo que la condición anterior queda como

$$h_1 \geq h_2 \geq 0 \quad (16)$$

Las alturas de los depósitos quedan fijadas con la relación matemática que las liga en un tanto por ciento superior al nivel que han de contener :

$$h_{\text{depo1}} = 1.3 h_1 \quad h_{\text{depo2}} = 1.3 h_2 \quad (17)$$

En la segunda fase del estudio se añaden nuevamente a las restricciones citadas la *imposición de*

estabilidad del sistema. De modo que el modelo del sistema se formula en el espacio de estados. La planta tiene como estados los niveles de los depósitos, la variable de entrada considerada es el caudal de entrada. Las perturbaciones más importantes de este tipo de proceso se producen en el caudal de entrada a la planta. La variable principal de salida es el nivel en el líquido y las variables de control son las aperturas de las válvulas.

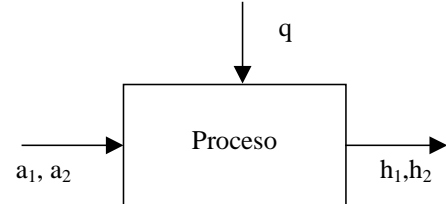


Figura 9: Diagrama del segundo proceso

El modelo lineal en espacio de estados que se obtiene, tiene una matriz de estados A de orden 2×2 correspondiente a los estados h_1 y h_2 , niveles de los depósitos. La restricción que añadimos en esta fase consiste en obligar a que los autovalores de la matriz de estados, sean negativos, luego:

$$\text{Restricciones en la estabilidad: } \lambda_1 < 0 \quad \lambda_2 < 0 \quad (18)$$

Para evitar la posibilidad de que los autovalores tomen el valor cero, se hace más severa la restricción en el desarrollo obligando a que éstos sean menores que un cierto número negativo aunque próximo a cero.

4.2 RESULTADO NUMÉRICO

Un conjunto de resultados del problema se muestran en la, algunos han sido obtenidos sin restricciones en la estabilidad y otros con estas restricciones, en las estructuras alternativas propuestas.

Parámetros de diseño	1ª Estructura	1ª Estructura (restricciones estabilidad)	2ª Estructura	2ª Estructura (restricciones estabilidad)
Altura [h](x10 ⁻¹ m.)	16.14	21.525	16.13	39.439
			9	9
Apertura (tanto por uno)[a]	0.74	0.645	0.56	0.27
			1	1
Función de coste final	0.03	0.05	0.03	0.16

Tabla 1: Resultados del problema de diseño

Adicionalmente las soluciones obtenidas son validadas a través de simulación en ACSL donde son además sometidas a perturbaciones para el estudio del comportamiento de la planta diseñada.

4.3 DISEÑO INCLUYENDO OPTIMIZACIÓN DINÁMICA

Para verificar la posibilidad de trabajo en optimización dinámica, se han incluido parámetros dinámicos en el problema de optimización.

Tomando como partida el problema de diseño de un sistema de nivel, descrito en el apartado 4.1. y manteniendo las restricciones en la estabilidad, se implementa para adaptarlo a esta nueva perspectiva dinámica, donde el parámetro dinámico que se incluye es la integral del error al cuadrado, conocido como ISE. Cuantifica la desviación del nivel con respecto al nivel medio del diseño (obtenido en el estudio estacionario) cuando sometemos a perturbaciones el caudal de entrada la planta.

$$ISE = \int_0^t (h - h_m)^2 dt \quad (19)$$

El problema de optimización calculado incluye ahora un nuevo objetivo, esta vez dinámico.

En cada iteración en el algoritmo de optimización implementado en MATLAB, además de calcular el espacio de estados linealizando el modelo en torno al punto de trabajo obtenido, la nueva condición dinámica impuesta genera una simulación en ACSL en el tiempo requerido para el cálculo de la variable dinámica, de manera el algoritmo busca el mínimo de la función en la dirección que haga mínimo este parámetro dinámico y cumpla el resto de restricciones ya estudiadas en anteriores apartados.

Durante la simulación que se ejecuta en cada iteración se realiza una perturbación sobre la planta, para la que se quiere construir, de modo que el diseño sea capaz de minimizar la ISE ante esta perturbación tipo.

4.3.1. Diseño de proceso incluyendo comportamiento dinámico en lazo abierto

Matemáticamente el problema consiste ahora en :

$$\min_{h,a} f = \min_{h,a} [\alpha \cdot h^2 + \beta \cdot r^2 + \delta \cdot ISE^2] \quad (20)$$

Asignamos unos valores a los pesos, relacionados con los objetivos:
 $\alpha = 0.05$ $\beta = 1$ $\delta = 0.22$

Los valores obtenidos en esta ocasión corresponden a una planta cuyo nivel es de 21.4370 dm. La apertura de la válvula queda fijada en $a = 0.87$.

Los residuos alcanzan un valor a considerar $r = -1.0253$. Los valores nos dan un valor de la función de coste de valor $f_{val} = 1.1150e+006$.

Estamos construyendo una planta para trabajar en estado estacionario y sin embargo que sea capaz de asumir ciertos comportamientos dinámicos, como el rechazo a cierto tipo de perturbaciones. Por este motivo tanto los residuos como la función de coste toman valores altos. La función de coste debe su valor tan elevado principalmente al valor de la del ISE que es de $2.2513e+003$.

Sometiendo a perturbación en el caudal de entrada en las horas iniciales de la simulación la evolución del nivel en el depósito se visualiza en la Figura 10 y corresponde con la última de las iteraciones realizada en el cálculo del óptimo.

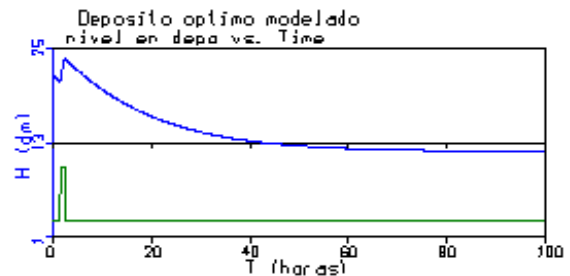


Figura 10: Relación entre perturbación en el caudal a la entrada y nivel

Llega tras casi 60 horas de simulación a un estacionario para el nivel cercano a los 12 metros.

4.3.2. Diseño de proceso incluyendo comportamiento dinámico en lazo cerrado

Realizamos ahora el diseño de una planta de nivel incluyendo un índice dinámico en la función de coste pero en esta ocasión cerramos el lazo de control con un controlador de tipo PI. Mantenemos la estabilidad en el diseño. La función de coste a minimizar es la misma que la utilizada para el proceso en lazo abierto que se estudio en el apartado anterior:

$$\min_x f = \min_x [\alpha \cdot h^2 + \beta \cdot r^2 + \delta \cdot ISE^2] \quad (21)$$

Donde en esta ocasión el vector de diseño incluye además los parámetros relativos al controlador

$$x = [h \quad a \quad Kp \quad Ti]$$

Asignando unos valores numéricos a los pesos, ejecutamos un ejemplo del problema planteado obteniendo los resultados numéricos siguientes:

altura óptima $h=20$ dm, apertura de la válvula inicial $a = 0.5$, con un controlador de tipo KI cuyos parámetros son ganancia proporcional $K_p = 15$, tiempo integral $T_i = 10$.

La función toma en este punto el valor $f_{val} = 3.2205e+005$

Cuya matriz de estado $A=[-0.1678]$, que coincide con su autovalor.

Sometiendo a estudios mediante simulación el diseño obtenido, en la Figura 11, vemos como produciendo una perturbación en el caudal de entrada (verde) el nivel consigue mediante el controlador volver al nivel requerido (azul).

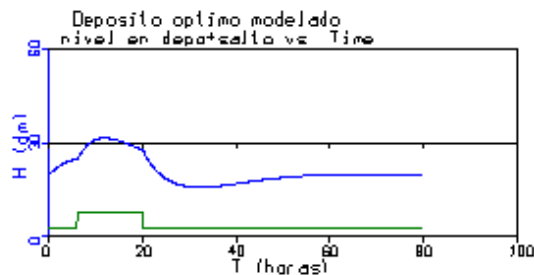


Figura 11: Estudio dinámico mediante simulación

Tras aproximadamente 50 horas consigue recuperar la altura de consigna con un error que podríamos considerar prácticamente nulo (el valor numérico es -0.054)

Para el diseño efectuado se calcula el controlador de manera que la ISE sea la menor con las perturbaciones para las que diseñamos, en este caso la ISE que resulta para los valores obtenidos es de 1209.87. Si realizamos una pequeña variación en el controlador de manera que en la parte proporcional modificamos la ganancia desde el valor 15 a uno ligeramente inferior de valor 11. La ISE generada alcanza en esta ocasión un valor de 1773, mayor que la obtenida por optimización. Verificando el objetivo dinámico impuesto ante cierto tipo de perturbaciones.

Eliminando la parte integral y actuando sólo con la parte proporcional podemos ver que sometiendo el sistema a las mismas perturbaciones obtenemos errores estacionarios. Sometiendo al sistema de nuevo a la misma perturbación, observamos en la Figura 12 la actuación del controlador de tipo proporcional. Corrige el nivel tras la perturbación, llevándolo a un valor de 27.2 dm, pero generando un error estacionario de -7.2 , que es bastante alto.

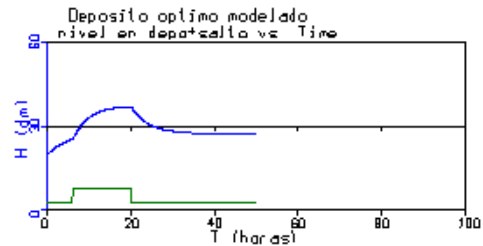


Figura 12: Dinámica ante perturbaciones para el sistema con control P

Con estas pruebas, comprobamos como los objetivos de la optimización se verifican numéricamente y los comportamientos en simulación verifican igualmente lo esperado.

Cualquier otro tipo de estudio y pruebas se hace entonces posible a través de la herramienta construida.

5 CONCLUSIONES

Se ha propuesto una metodología en la que se ha basado una herramienta para la integración de las propiedades dinámicas en las fases de diseño de procesos en el marco de Diseño Integrado incluyendo el rechazo a perturbaciones.

Se han propuesto soluciones matemáticas, planteando modelos de optimización a diferentes problemas para la realización del diseño integrado del proceso y su sistema de control aplicado a un modelo sencillo de nivel.

Se ha trabajado con una herramienta informática mediante conexión de paquetes comerciales mediante el protocolo DDE.

6 TRABAJO FUTURO

Incorporar otras características dinámicas en las etapas de diseño integrado de plantas, así como condiciones en la controlabilidad del proceso.

Abordar otras técnicas de diseño de procesos que incluyan la síntesis en el transcurso del proyecto con el diseño de planta junto a su sistema de control.

Aplicar la metodología a otros casos reales de la industria.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por la CICYT a través del proyecto de investigación DPI2000-066-C02-02 y de la Junta de Castilla y León a través de proyectos de investigación.

Referencias

- [1] Adjiman, C. A., Schweiger, C. A., Floudas, C. A., (1998) "Mixed-Integer Nonlinear Optimization in Process Synthesis", Handbook of Combinatorial Optimization, Kluwer Academic Publishers.
- [2] Floudas, C. A., (1995) "Nonlinear and Mixed-Integer Optimization", Princeton University.
- [3] Gil, A.B., Vega, P., Francisco, M. (2000) ,"Integrated Design Of a Ph Proceses", MIC 2001, pp. 226-229, Febrero de 2001, Innsbruck, Austria.
- [4] Gutiérrez Rodríguez, (2000) "Diseño Integrado y Síntesis de Procesos aplicados al Proceso de Fangos Activos", Tesis doctoral, Universidad de Valladolid.
- [5] Luyben M. L., (1993) "Analyzing the Interaction Between Process Design and Process Control", Tesis doctoral, Princeton University.
- [6] Luyben M. L., (1993) "Analyzing the Interaction Between Process Design and Process Control", Tesis doctoral, Princeton University.