

2.- CONTROL PREDICTIVO DE PROCESOS

2.1.- Aparición del control predictivo

Hasta hace relativamente unos pocos años el principal y podríamos decir único objetivo del control consistía en conseguir un funcionamiento estable del proceso a controlar. Sin embargo cuestiones como la competencia entre empresas para lograr procesos más eficientes, cambios en las tecnologías y otras preocupaciones como los problemas medioambientales han originado un cambio en las técnicas de control que se aplican actualmente en los procesos industriales. Por ello los sistemas de control de hoy en día deben ser capaces de satisfacer criterios económicos, minimizando ciertas funciones de costes, criterios de seguridad y criterios de calidad, sin olvidar nunca el mantenimiento de una operación estable en el proceso. Así pues estos sistemas de control tendrán como objetivo la actuación sobre las variables manipulables con el fin de satisfacer los múltiples criterios citados anteriormente.

Actualmente existen variadas metodologías de control para la consecución del objetivo planteado, diferenciándose principalmente en los compromisos alcanzados al realizar las formulaciones matemáticas de los criterios de funcionamiento, en forma de funciones objetivo dinámicas acompañadas de restricciones, y en la forma de abstraer el proceso, representado como un modelo dinámico al que se le añaden incertidumbres.

Es entonces cuando aparecen los métodos de Control Predictivo basado en Modelo (MPC en sus siglas en inglés), que en su estructura más general acepta cualquier tipo de modelos, funciones objetivo y/o restricciones.

2.2.- Desarrollo histórico

El Control Predictivo se desarrolló siguiendo dos líneas principalmente. En primer lugar aparecieron diversos algoritmos en los cuales se hacía un uso explícito de un modelo dinámico del proceso para predecir el futuro de las salidas del sistema una vez que eran aplicadas las acciones de control, siendo estas últimas calculadas de forma que se minimizara el error predicho sujeto a las restricciones de operación. Ésta optimización se repetía en cada instante de muestreo. El modelo dinámico de la planta se obtenía mediante el modelo de respuesta impulsional o en escalón, que es mucho más sencillo que el espacio de estados o el de la función de transferencia. Sobre este tipo de algoritmos se desarrollaron el IDCOM (Identification-Command) y el DMC (Dynamic Matrix Control).

La otra línea de desarrollo surgió a partir del control adaptativo, desarrollándose técnicas especialmente en procesos monovariantes. Algunas de estas técnicas son el Controlador de Mínima Varianza y el GPC (Generalized Predictive Control).

2.3.- Aplicación actual

Actualmente el uso de las técnicas de Control Predictivo está muy extendido en la industria, principalmente en el sector petroquímico y en procesos multivariantes. Este éxito se debe a varias razones como:

- La incorporación de un modelo explícito del proceso en los cálculos, por lo tanto se tienen en cuenta todas las características dinámicas del proceso.
- Al contemplar el comportamiento del proceso a lo largo de un tiempo futuro da la posibilidad de saber el efecto de las perturbaciones.
- La consideración de restricciones al diseñar el controlador implica la imposibilidad de que dichas restricciones sean violadas.
- Existe una variada rama comercial de este tipo de productos llave en mano además de la posibilidad de utilizar productos genéricos.

2.3.1.- Procesos multivariantes

En los procesos reales sobre los que se aplica algún tipo de control existen siempre gran cantidad de variables involucradas. Básicamente, podemos decir que un proceso debe tomar una serie de materiales y recursos para producir uno o más productos, como se muestra de forma gráfica en la figura 2.1.

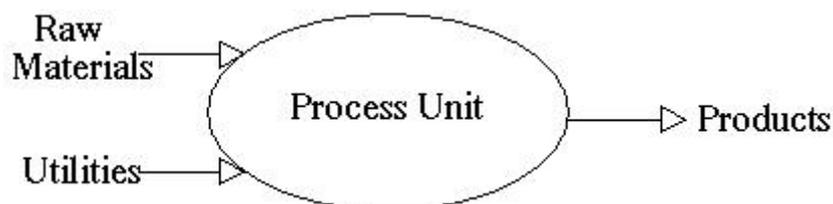


Figura 2.1.- Flujo de materiales y recursos en un proceso

El propósito de las unidades de procesos es, cómo no, producir una serie de productos de forma que se maximicen los beneficios. En muchos casos, esta maximización viene dictada bien por la máxima capacidad de producción o bien por las condiciones del mercado en el que han de introducir los productos obtenidos.

Sin embargo, y como se ha dicho anteriormente, en el proceso intervienen normalmente gran cantidad de variables, no ya sólo las propias de los flujos de materiales, sino otras como las limitaciones de los equipos, actuadores, la propia operación de la planta también introduce unas capacidades, calidad del producto elaborado, etcétera.

Todas estas variables hacen que nuestro sistema de control del proceso deba tenerlas en cuenta a la hora de realizar el control de la planta, ya que además es altamente probable que todas o la gran mayoría de las variables que intervienen en el proceso tengan influencia unas sobre otras.

Por todo lo anterior es normal utilizar en los procesos de control aquellos controladores que permitan realizar un control multivariable, es decir, sistemas de control que sean capaces de asimilar todas las variables presentes en el proceso, obtener un punto de operación aceptable para todas ellas, y ser capaz de hacer que dichas variables alcancen el punto de operación especificado.

2.4.- Conceptos básicos

En este apartado se darán ciertas ideas sobre el control predictivo, así como una serie de expresiones matemáticas sobre diversos temas. Al no ser éste el objetivo del proyecto no se aborda el asunto con demasiada profundidad, suponiéndose además que el lector tiene conocimientos suficientes sobre el control predictivo.

A continuación se indican las ideas comunes a todos los controladores que se engloban en el control predictivo:

- Utilización de manera explícita de un modelo para predecir la salida del proceso en instantes de tiempo futuros, llamado horizonte temporal.
- Cálculo de las acciones de control minimizando una cierta función objetivo.
- Uso de una estrategia deslizante de tal modo que en cada instante el horizonte es desplazado hacia delante en el tiempo.

Las diferencias más reseñables entre los controles predictivos radican en el modelo utilizado para el proceso, las perturbaciones y la función objetivo a minimizar. Estos contrastes, aunque pequeños, pueden causar grandes diferencias en el funcionamiento en bucle cerrado.

Entre las ventajas del MPC frente a otros tipos de control caben destacar:

- Conceptos intuitivos, por lo tanto no es necesario personal muy cualificado en

control.

- Es aplicable a multitud de procesos, incluyendo aquellos con grandes retardos (posee compensación implícita del retardo), fase no mínima o inestables.
- Fácilmente aplicable a procesos multivariables.
- Muy útil en procesos en los que son conocidas las referencias futuras.

Asimismo el MPC presenta algunos inconvenientes como son el aumento de carga de cálculo, resuelta con los potentes ordenadores de hoy en día, y la necesidad de disponer del modelo apropiado del proceso, el cual es crítico para las prestaciones del controlador.

Como último concepto básico se expone a continuación la estrategia que siguen todos los controladores de la familia MPC:

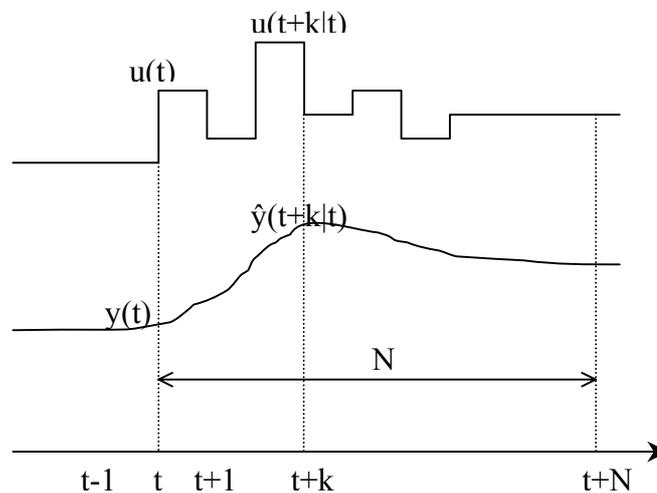


Figura 2.2.- Estrategia del Control Predictivo

- 1.- En cada instante t utilizamos el modelo del proceso para predecir las futuras salidas para un determinado horizonte temporal u horizonte de predicción N . Se obtienen así las salidas predichas $\hat{y}(t+k|t)$ durante todo el horizonte, las cuales dependen de los valores en el instante t y de las futuras acciones de control que se vayan a aplicar $u(t+k|t)$ y que hay que calcular.
- 2.- Las señales de control futuras se calculan de manera que se optimice un criterio determinado para mantener el proceso lo más próximo posible a la trayectoria de referencia $w(t+k)$, que será o bien el set point o una aproximación suave.
- 3.- Se envía al proceso la señal de control $u(t|t)$, desechándose el resto de las calculadas, puesto que en el siguiente instante de muestreo ya se conoce $y(t+1)$.
- 4.- Se repite el proceso desde el punto 1, con los valores de las señales actualizados.

La estrategia mostrada anteriormente se realiza con una estructura como la que se muestra en la figura 2.3.

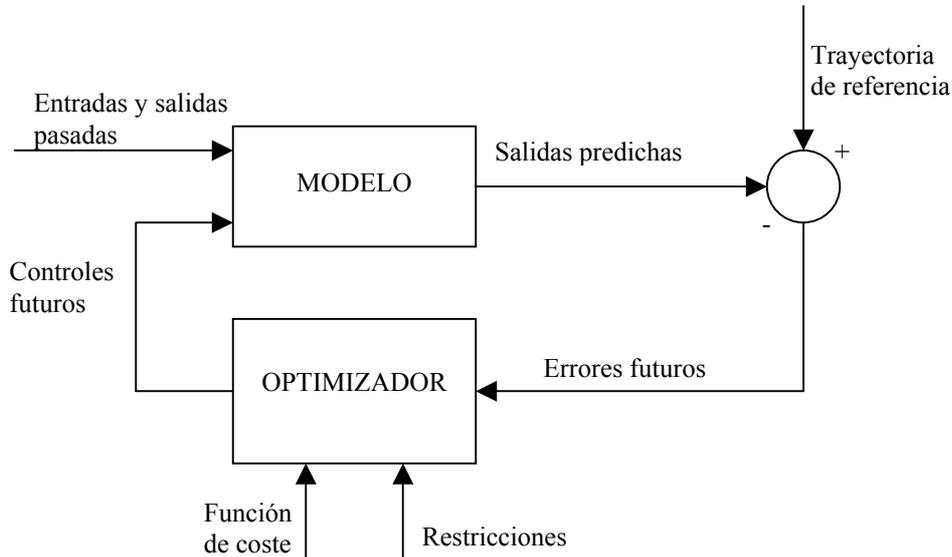


Figura 2.3.- Estructura básica del MPC

2.4.1.- Algoritmos de identificación de los modelos

Existen varios algoritmos de identificación de los modelos que se utilizan para realizar las predicciones necesarias. Sin embargo sólo se explicarán a continuación aquellos que se utilizan en DMC y DMCplus.

- Finite Impulse Response (FIR):

Son modelos que tienen la forma $y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i \cdot \Delta u(t-i)$, en donde los coeficiente h se obtienen tras aplicar un impulso como entrada al proceso. Sin embargo estos modelos suelen truncarse de forma que nos quedamos con un modelo de la forma

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i \cdot \Delta u(t-i)$$

Este algoritmo de identificación es muy simple y no necesita ningún conocimiento previo del proceso sobre el que estemos trabajando, y además no le afectan los retardos. Sin embargo no es posible su aplicación sobre procesos inestables y presenta el inconveniente de la complejidad de generar señales de tipo impulsional.

- Modelo de respuesta ante escalón:

Es parecido al anterior, presentando las mismas ventajas e inconvenientes, solo que en vez de utilizar señales de tipo impulsional utilizamos señales en escalón. Entonces

tenemos un modelo del tipo

$$y(t) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot \Delta u(t-i)$$

• Subspace Identification:

Se trata de una nueva tecnología de identificación paramétrica introducida por DMCplus, que ofrece las siguientes ventajas:

- Utiliza un modelo en el espacio de estados para representar relaciones internas entre variables.
- Especialmente indicada para procesos MIMO (Multiple In/Multiple Out), pudiendo obtener la mínima parametrización y aumentando su eficiencia.
- Es un proceso no iterativo que usa álgebra lineal.

Su mayor inconveniente es su poca implantación hasta el momento en la industria, por lo que no está demasiado depurado su funcionamiento.

2.4.2.- Modelo del DMC

Como ya hemos dicho, los distintos tipos de control predictivo se diferencian entre otras cosas en el modelo que utilizan para realizar las predicciones de las señales de salida del proceso.

En el caso del control DMC el modelo monovariable que utiliza es el modelo en escalón, del tipo

$$y(t) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot \Delta u(t-i),$$

donde: t es el tiempo en el que nos encontremos

u es la señal de entrada al sistema

g son los coeficientes del modelo

N número máximo de coeficientes utilizados en el modelo

y es la señal de salida del proceso.

Así, tras una serie de operaciones matemáticas se llega a que las predicciones generadas por DMC son de la forma

$$\hat{y}(t) = G \cdot u + f$$

en donde $G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m & g_{m-1} & \dots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \dots & g_{p-m+1} \end{bmatrix}$ se denomina matriz dinámica del ensayo en escalón y

lleva los coeficientes del modelo para todas las variables formada por m (horizonte de control) columnas, f es la respuesta libre del sistema, u son las señales de control e \hat{y} son las predicciones de salida (vector de dimensión p, número de variables del sistema).

2.4.3.- Perturbaciones en DMC

El efecto de las perturbaciones medibles se puede añadir de una manera simple a la ecuación anterior de predicción tratando a las perturbaciones medibles como señales de entrada al sistema. Así nos encontraríamos con la expresión

$$\hat{y}_d = D \cdot d + f_d$$

donde \hat{y}_d es la contribución de las perturbaciones medibles a la salida del sistema, D es una matriz similar a G que contiene los coeficientes de la respuesta del sistema a un escalón en la perturbación, d es el vector de perturbaciones y f_d es la parte de la respuesta que no depende de la perturbación.

Si tomamos también el caso general de perturbaciones medibles y no medibles, podremos suponer la respuesta libre del sistema como una suma de cuatro efectos: respuesta a la entrada u(t), a la perturbación medible d(t), a la perturbación no medible y al estado actual del proceso: $f = f_u + D \cdot d + f_d + f_n$, pudiendo usar la expresión que

teníamos en un principio: $\hat{y}(t) = G \cdot u + f$

2.4.2.- Función objetivo y algoritmo de control de DMC

Una de las principales causas del éxito del DMC es que utiliza una función objetivo a la cual se le pueden añadir restricciones.

En general, la función objetivo que se intenta minimizar para obtener el punto de operación más adecuado para el proceso es, incluyendo sólo los errores futuros,

$$J = \sum_{j=1}^p \left[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j) \right]^2$$

aunque si incluimos también el esfuerzo de control obtenemos la expresión

$$J = \sum_{j=1}^p \left[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j) \right]^2 + \sum_{j=1}^p \lambda \cdot [\Delta u(t+j-1)]^2$$

utilizándose λ como parámetro para incrementar o disminuir la importancia de la acción de control en la función objetivo.

Sin restricciones, la minimización de la función objetivo anterior nos da como solución de la acción de control

$$u = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - f)$$

siendo ésta la acción de control a lo largo de todo el horizonte de control, pero hay que recordar que sólo ha de aplicarse la primera de las acciones.

Además podemos añadir restricciones al problema del tipo matricial

$$R \cdot u \leq c$$

aunque esto nos lleva a soluciones no analíticas y sí numéricas.

Por último resaltar que las expresiones anteriores son fácilmente aplicables a sistemas multivariables sin más que convertir las variables en vectores de forma que recojan todas las señales de entrada y salida que intervengan en el proceso. La matriz G quedaría entonces como:

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1nu} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2nu} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{ny1} & G_{ny2} & \cdots & G_{nynu} \end{bmatrix}$$

donde cada submatriz G_{ij} contiene los coeficientes de la respuesta ante escalón i -ésima correspondiente a la entrada j -ésima.