

Tema 1

Introducción a la Identificación de sistemas dinámicos

1.1 La Identificación como herramienta para la modelización de sistemas dinámicos

El funcionamiento de los procesos industriales ha cambiado drásticamente en las últimas décadas. Este cambio es debido principalmente a la evolución de la tecnología del ordenador. La automatización de los procesos ha comportado un aumento de la productividad de algunos sectores industriales, obligando a la industria a adaptarse a las demandas de mercado y aumentar su competitividad [Backx, 1993].

Para aumentar la competitividad ha sido necesario desarrollar nuevas técnicas: métodos y herramientas que permitan maximizar la eficiencia de los procesos, desarrollando controladores de gran calidad, y maximizar la flexibilidad de los procesos con el menor ajuste de la máquina. Para ello es imprescindible conocer el comportamiento dinámico del proceso, principalmente de las partes críticas.

En la actualidad, cada vez más, el trabajo de un ingeniero consiste en la realización de modelos matemáticos de los procesos estudiados [Ljung 1994]. Los modelos son utilizados en áreas tan distintas como: bioingeniería, construcción, economía, meteorología, procesos químicos,... El campo de utilización de dichos modelos es muy amplio, destacar aplicaciones como: *control, supervisión, predicción, simulación, optimización*,.... A continuación comentamos un poco más las dos primeras ya que las técnicas de identificación y el diseño de controladores han seguido un camino paralelo y porque la supervisión está enlazada directamente con otro curso del programa de doctorado: *diagnóstico y detección de fallos*.

Según [Seborg, 1994], las estrategias actuales de diseño de controladores pueden clasificarse en dos grupos: control convencional y control avanzado. El control convencional consistente en el control: manual, PID, de relación, en cascada, en avance o retardo de fase. Según dicho autor el 90% de los controladores de procesos industriales son actualmente controladores convencionales. Las estrategias de control avanzado se subdividen en tres grupos: técnicas de control convencionales (control desacoplado, control selectivo, control con compensación de retardo puro), técnicas de control basadas en modelos numéricos (control predictivo, control adaptativo, control robusto, control con modelo interno) y técnicas de control basadas en conocimiento (sistemas expertos, control neuronal, control fuzzy). Tanto para la utilización de técnicas de diseño convencionales como técnicas avanzadas y especialmente las basadas en modelos, es necesario un modelo numérico preciso del proceso estudiado.

Comentar también que los procesos industriales están sujetos a severos requerimientos de eficacia, disponibilidad y seguridad. La complejidad de los mismos crece constantemente y esto hace necesario el desarrollo de herramientas automáticas de ayuda al operador humano: los sistemas de supervisión. Entre las tareas de este tipo es necesario destacar las tareas destinadas a la detección y diagnóstico de fallos. Con una rápida detección de los fallos se puede evitar desde una pérdida de prestaciones hasta un deterioro del sistema con consecuencias que pueden ser catastróficas para el propio sistema e incluso para el personal de la planta. Los sistemas de detección de fallos se basan en la obtención de síntomas, de señales indicadoras de fallos, y su análisis para indicar la posible existencia y localización de dicho fallo. Uno de los métodos utilizados para ello es la comparación del proceso con un modelo de simulación, son los métodos denominados diagnóstico basado en modelos como en [Iserman84], [Gertler98].

Principalmente, por las dos razones expuestas anteriormente diseño de controladores y métodos de detección de fallos, es necesario disponer de un modelo matemático que se ajuste al comportamiento del sistema estudiado. El curso tiene como objetivos:

- Conocer una metodología de modelización denominada *identificación*; dicha metodología parte de la información disponible de dichos sistemas o, con otras palabras, el análisis de las entradas, señal de excitación, y las salidas, respuesta del sistema;
- Estudiar distintas herramientas para la identificación de:
 - Modelos lineales, utilizando herramientas de análisis temporal y frecuencial;
 - Modelos no lineales, utilizando redes neuronales.

El desarrollo de las técnicas de diseño de controladores utilizando métodos numéricos y las técnicas de identificación, se originaron simultáneamente [Backx93]. El inicio de las técnicas de identificación, aplicadas a procesos con una entrada y una salida, tienen su origen a principios de los años 70 [Åström70]. No será hasta finales de la década de los 90 que empiezan aplicarse a procesos industriales [Ljung87; Söderström89], algunas de ellas útiles para el estudio de sistemas múltiple entrada múltiple (MIMO).

1.2 Estructura y clasificación de los modelos

1.2.1 Aspectos generales

Se denomina *identificación* a la técnica de construir un modelo a partir de las variables medidas del proceso: entradas o variables de control, salidas o variables controladas y, posiblemente, perturbaciones. En principio y con el objetivo de modelizar se pueden proponer tres formas distintas de utilizar los métodos de identificación:

- Hacer distintas aproximaciones para estructurar el problema: seleccionar las señales de interés, observar la dependencia entre ellas, estudiar el grado de linealidad del proceso, ...
- Construir un modelo que describa el comportamiento entre las entradas y las salidas, prescindiendo del comportamiento físico. Hay distintas formas de abordar el problema, según se consideren *modelos no paramétricos* o *modelos paramétricos*.
- Utilizar los datos para determinar los parámetros no conocidos del modelo físico obtenido a base del estudio de propiedades y leyes físicas del proceso estudiado. En este caso se habla de modelos “*tailor-made*” de los cuales se debe estimar solamente los valores de los parámetros no conocidos. Para ello se recurre a ensayos de comportamiento o pruebas físicas y/o a la utilización de técnicas de optimización.

El curso propuesto se centra en las dos primeras.

Otro aspecto a tener en cuenta será el tipo de modelo matemático que se pretende identificar. Hay varias formas de catalogar los modelos matemáticos [Ljung94]: deterministas o estocásticos, dinámicos o estáticos, de parámetros distribuidos o concentrados, lineales o no lineales, y de tiempo continuo o tiempo discreto. Los tipos de modelos que se pretende analizar en este curso serán:

- *Deterministas*, ya que se quiere estudiar la relación entre la entrada y la salida con una parte no modelizable o no conocida (estocástica);
- *Dinámicos*, porque el objetivo es conocer el comportamiento dinámico de un proceso;
- *De parámetros concentrados*, no se considera la variación en función del espacio;
- *Lineales o no lineales*, se hará mayor énfasis a las técnicas de identificación de modelos lineales, comentando algunas técnicas para ser utilizadas en el caso de sistemas no lineales;

- *Tiempo continuo o tiempo discreto*, se propone describir técnicas para la identificación de modelos en tiempo discreto y continuo.

Debemos dejar claros varios aspectos en cuanto a la construcción de un modelo:

- a) Un modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y, por lo tanto, es una representación parcial de la realidad;
- Un modelo se construye para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin;
- Un modelo tiene que ser por necesidad un compromiso entre la simplicidad y la necesidad de recoger los aspectos esenciales del sistema en estudio.

1.2.2 Estructura del modelo

Partiendo de la base de que para modelizar un proceso necesitamos los datos observados, en el caso de un sistema dinámico con una entrada en el instante t denominada como $u(t)$ y una salida en el instante t denominada como $y(t)$ los datos serán una colección finita de observaciones:

$$Z^N = \{u(0), y(0), u(1), y(1), \dots, u(N), y(N)\}$$

El problema de los métodos de identificación consiste en encontrar relaciones matemáticas entre las secuencias de entrada y las secuencias de salida. O también, si definimos las observaciones de forma más general:

$$Z^N = \{[y(t), \mathbf{j}(t)]; t=1, \dots, N\}$$

lo que nos preocupa es como determinar $y(N+1)$ a partir de $\mathbf{j}(N+1)$. En el caso de un sistema dinámico, $\mathbf{j}(t)$ contendría la información de las entradas y salidas anteriores a t .

El problema matemático que se formula es la construcción de una función $\hat{g}_N(t, \mathbf{j}(t))$ tal que a partir de ella podamos determinar $y(t)$:

$$\hat{y}(t) = \hat{g}_N(t, \mathbf{j}(t))$$

En general se busca una función g que sea parametrizable, es decir que tenga un número finito de parámetros. A estos parámetros se les denomina con \mathbf{q} . A toda la familia funciones candidatas se las denomina *estructura del modelo*, y en general estas funciones se escriben como $g_N(t, \mathbf{q}, \mathbf{j}(t))$.

Esta función permite calcular el valor $y(t)$:

$$y(t) \approx g_N(t, \mathbf{q}, \mathbf{j}(t))$$

La búsqueda de una buena función se realiza en términos del parámetro \mathbf{q} , y el cálculo del valor $\hat{\mathbf{q}}_N$ conduce a:

$$\hat{g}_N(t, \mathbf{j}(t)) = g(t, \hat{\mathbf{q}}_N, \mathbf{j}(t))$$

Por ejemplo en el caso de una estructura de modelo simple como ARX de primer orden:

$$y(t) + ay(t-1) = b_1u(t-1) + b_2u(t-2)$$

la correspondencia con la formulación general seria:

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= (a, b_1, b_2) \\ \mathbf{j}(t) &= (y(t-1), u(t-1), u(t-2)) \\ g(t, \mathbf{q}, \mathbf{j}(t)) &= -ay(t-1) + b_1u(t-1) + b_2u(t-2) \end{aligned}$$

El ejemplo anterior muestra la formulación convencional de bs sistemas de identificación, en que la estructura del modelo se corresponde con una regresión lineal. En general, la estructura del modelo podría ser cualquiera, desde regresiones no lineales (caso en que g es no lineal respecto a \mathbf{q}), modelos tipo ‘*taylor-made*’, a redes neuronales. También podrían incluirse modelos dinámicos *Fuzzy* en el caso en que se reemplazara $\mathbf{j}(t)$ y $y(t)$ por valores como “*el horno está muy caliente*”, “*el horno está tibio*”, “*el agua está hirviendo*”, ...

1.2.3 Modelos paramétricos y no paramétricos

La utilización de modelos como $g_N(t, \mathbf{q}, \mathbf{j}(t))$ indica que estamos restringiéndonos a un conjunto pequeño de modelos parametrizados respecto a \mathbf{q} . Un caso interesante es cuando se asume que la correcta representación del sistema pertenece a un gran número de sistemas y que no pueden parametrizarse con un número finito de parámetros. Un ejemplo sería el de la respuesta impulso en donde su modelo corresponde a un número infinito de coeficientes. Matemáticamente este concepto se representa por:

$$\bigcup_{d=1}^{\infty} g_d(t, \mathbf{q}^d, \mathbf{j}(t))$$

en donde el vector \mathbf{q}^d contiene d parámetros. Por supuesto que para cada conjunto finito de datos Z^N se tiene un $d < \infty$. Esta situación se denomina no paramétrica. Los modelos no paramétricos se presentan en el tema 2.

1.3 Clasificación de los métodos de identificación paramétrica

1.3.1 Principio de la identificación de sistemas

Como se ha comentado en el apartado anterior, el principio de la identificación de sistemas dinámicos se basa en buscar $g(t, \mathbf{q}, \mathbf{j}(t))$ de manera que:

$$y(t) \text{ próximo a } g(t, \mathbf{q}, \mathbf{j}(t))$$

Este principio también incluye el caso en donde \mathbf{j} y y son valores no numéricos, en el caso en que “próximo” se defina adecuadamente. Si consideramos el caso numérico se debe seleccionar $\mathbf{q} = \hat{\mathbf{q}}_N$ tal que

$$V_N(\mathbf{q}) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|y(t) - g(t, \mathbf{q}, \mathbf{j}(t))\|$$

se minimiza considerando alguna norma $\|\cdot\|$, por ejemplo: $\|\mathbf{e}\| = |\mathbf{e}|^2$, siendo:

$$\mathbf{e}(t, \mathbf{q}) = y(t) - g(t, \mathbf{q}, \mathbf{j}(t))$$

Este caso origina una familia de métodos de identificación denominados “métodos de predicción del error”.

1.3.2 Clasificación de los métodos de identificación

Son varios los criterios a partir de los cuales clasificar los métodos de identificación [Iserman80]. Podemos considerar en primer lugar unos aspectos prácticos:

- a) error entre proceso y modelo;
- b) algoritmo utilizado;
- c) secuencia de evaluación o procesada de las medidas.

a) Evaluando el error entre el modelo y el proceso se puede diferenciar entre *ecuación de error* y *error en la señal de salida*. El primero se suele utilizar cuando se dispone de un modelo con una función de pesos, y la segunda si se dispone de una función de ecuaciones diferenciales y/o funciones de transferencia. Para ilustrar la diferencia entre ambas aproximaciones consideremos las siguientes estructuras de modelo:

- estructura ARX: $y(t) + ay(t-1) = b_1 u(t-1) + b_2 u(t-2) + v(t)$

- estructura OE: $y(t) = \frac{b_1 + b_2 q^{-1}}{1 + f_1 q^{-1}} u(t-1) + v(t)$

donde $y(t)$ es la medida de la salida del sistema, $u(t)$ es la medida de la entrada del sistema mientras que $v(t)$ es el término perturbación (ruido, señal no conocida). Dependiendo de la estructura del modelo, la estimación de la señal error será:

- *ecuación del error*, estructura ARX, calculado por la expresión:

$$e(t) = y(t) + ay(t-1) - b_1 u(t-1) - b_2 u(t-2) \approx v(t)$$

donde tanto el histórico de las entradas como salidas influyen en el cálculo del término error.

- *error en la salida*, estructura OE, calculado por:

$$e(t) = y(t) - \frac{b_1 + b_2 q^{-1}}{1 + f_1 q^{-1}} u(t-1) \approx v(t)$$

en donde el error o residuo solo está afectado por el histórico de las entradas.

b) Con respecto a los algoritmos utilizados en los métodos de identificación, se puede distinguir entre algoritmos *recursivos* o algoritmos *no recursivos*. En el primer caso la estimación de los parámetros se realiza después de cada nuevo conjunto de datos, utilizando el valor de los parámetros estimados con un conjunto de datos como punto de partida para la estimación de los parámetros para el conjunto de datos posterior. Con el algoritmo no recursivo se utilizan secuencias enteras que comprenden todos los datos almacenados para calcular en un solo paso el valor de los parámetros.

c) Con el hecho de disponer de un ordenador para realizar la identificación del modelo, podemos distinguir entre dos formas de acoplar el proceso con el ordenador, son las denominadas: *operación on-line* (acoplamiento directo) y *operación off-line* (acoplamiento indirecto). En el caso *off-line* se almacenan los datos adquiridos del proceso y posteriormente se transfieren al ordenador para ser evaluados y procesados. Ya que este tipo de identificación se realiza sobre un conjunto de datos, puede considerarse como un proceso en lote (*batch processing*). Cuando se trabaja en *on-line* los datos son directamente procesados dando lugar a lo que se denomina *procesado en tiempo real* o *batch processing* cuando los datos son evaluados después de realizarse un conjunto de medidas. Las distintas formas de procesar los datos se describe en la figura 1.1.

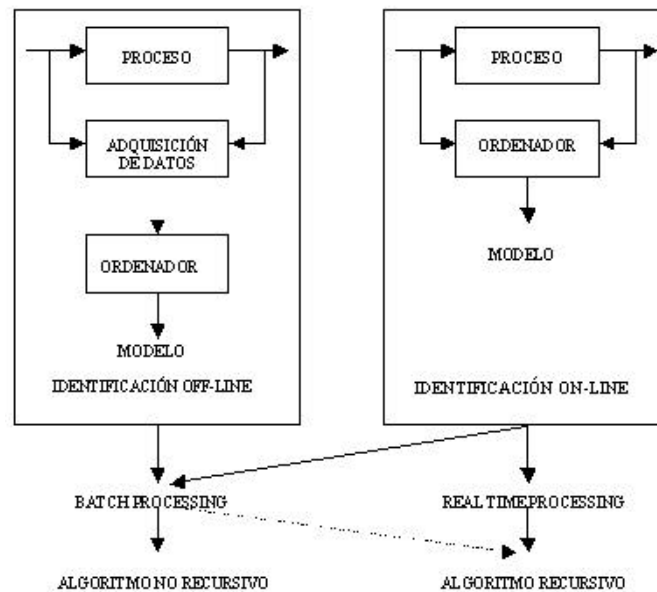


Figura 1.1. Formas para el procesamiento de los métodos de identificación [Isermann80]

Los métodos de identificación pueden clasificarse también en función de los modelos obtenidos, de esta forma podríamos diferenciar entre: *técnicas de identificación no paramétricas*, obteniéndose modelos no paramétricos, y *técnicas de identificación paramétricas*, que conducen modelos paramétricos. Dentro de las denominadas *técnicas de identificación no paramétricas* podemos citar como mas importantes:

- (1) *Análisis de la respuesta transitoria* se basa en la obtención de la respuesta del sistema a un impulso o a un escalón. Las señales de test a utilizar en este caso son un impulso o un escalón, respectivamente, y la salida registrada da el modelo correspondiente.
- (2) *Análisis de correlación* es un método del dominio temporal, útil para sistemas lineales y con señales continuas o discretas. Como resultado del mismo se obtiene la función de correlación entre las variables de interés y, como caso especial, una función de pesos.
- (3) *Técnicas frecuenciales* que son utilizadas directamente para estimar la respuesta frecuencial del sistema. Dentro de las técnicas frecuenciales podemos diferenciar entre el *análisis de Fourier* y el *análisis Espectral*.

Todas ellas son aplicables en el caso de considerar procesos lineales o linealizables. Para su utilización no se debe suponer ningún tipo de estructura para el modelo y los resultados obtenidos son de tipos gráfico los cuales pueden ser mas o menos fáciles de interpretar.

En el caso de *métodos de identificación paramétricos*, se debe tener en cuenta una cierta estructura para el modelo. Los parámetros del modelo se calculan minimizando ciertos criterios de error entre el modelo y el proceso. En general podemos distinguir entre dos tipos de técnicas:

- *Técnicas frecuenciales*, las cuales minimizan el error entre la respuesta frecuencial real del proceso y la respuesta frecuencial del modelo;
- *Técnicas temporales*, las cuales minimizan el error temporal, *error de predicción* o *error de salida*, entre el modelo y el proceso. Forman parte de este grupo los métodos de identificación paramétricos clásicos y con redes neuronales los cuales se expondrán extensamente en este curso.

Ambas pueden ser utilizadas tanto para la estimación de los parámetros de modelos continuos como discretos.

1.3.3 Etapas a seguir para la identificación de un modelo

En general, las etapas a seguir para identificar un modelo paramétrico son:

- *Diseño del experimento de identificación.* En esta primera etapa es necesario decidir, entre otros aspectos: el tipo de señales de excitación, el mejor periodo para la adquisición de datos, la cantidad de datos necesarios;
- *Observación y mejora de la calidad de los datos capturados.* Antes de utilizar los métodos de estimación de parámetros es necesario: observar y reparar los datos erróneos, filtrar las altas frecuencias, eliminar offsets y tendencias, ...;
- *Determinación de la estructura del modelo.* En esta etapa es necesario definir el tipos de modelos a utilizar: continuos o discretos, tipos de ruido, lineales o no lineales, regresiones, redes neuronales, ... Y es necesario adoptar un procedimiento para determinar el orden del modelo.
- *Estimación de los parámetros.* Etapa la mayoría de las veces muy relacionada con la anterior, en ella se presenta el problema de decidir el método o métodos de estimación de parámetros que se va a utilizar para calcular el valor de los mismos. En general se puede escoger entre dos técnicas distintas: en el dominio temporal y en el dominio frecuencial.
- *Validación del modelo.* Es la etapa en la que debe preguntarse si el modelo identificado es suficientemente representativo del proceso estudiado. En el se debe definir un criterio para evaluar la calidad. Generalmente se dispone de varios modelos candidatos y debe escogerse uno de ellos basándose en algún criterio.

Actualmente hay muchos programas comerciales de ayuda a ingeniero en las etapas de identificación, concretamente en las etapas de estimación de parámetros y evaluación de las propiedades del modelo estimado. Hay otras etapas que dependen exclusivamente del usuario [Ljung94]. En este curso utilizaremos como herramienta de trabajo el programa Matlab y concretamente la toolbox de identificación.

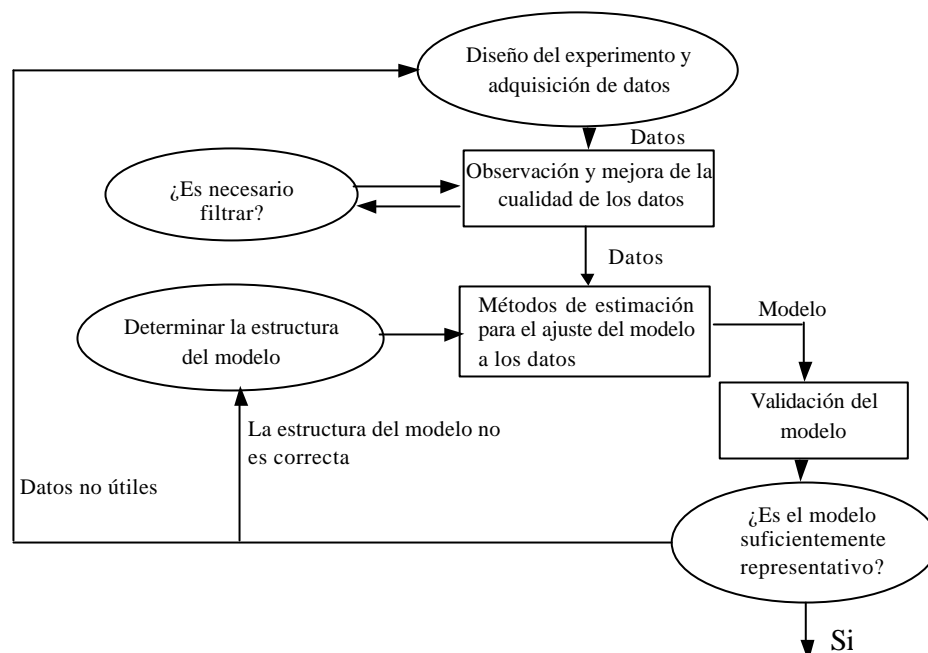


Figura 1.2. Etapas para la identificación de un proceso. Los rectángulos son en general responsabilidad del ordenador y los ovalados son en general responsabilidad del usuario.

1.3.4 Relación entre modelos y métodos

Para finalizar el tema de introducción podríamos remitirnos a [Isermann80] exponiendo de forma resumida la dependencia existente entre la construcción del modelo y su objetivo final o aplicación.

Tabla 1.1. Algunos ejemplos de la relación existente entre el objetivo final del modelo (aplicación) y las especificaciones del proceso de identificación.

| Objetivo final del modelo, aplicación | Tipos de modelos | Requerimientos de precisión del modelo | Método de identificación |
|--|--|--|---|
| verificación de modelos teóricos | lineal, tiempo continuo, no paramétrico/ paramétrico | media / alta | off-line, respuesta transitoria, respuesta frecuencial, estimación paramétrica |
| Sintonía de controladores | lineal, no paramétrico, tiempo continuo | medio | off-line, respuesta transitoria |
| Ayuda al diseño de algoritmos de control | lineal, paramétrico, (no paramétrico) tiempo discreto | medio | estimación paramétrica on-line / off line |
| Control adaptativo | lineal, paramétrico, tiempo discreto | medio | estimación paramétrica on-line |
| Supervisión y detección de fallos | lineal / no lineal, paramétrico, tiempo continuo | alto | estimación paramétrica on-line |