

Aplicación de un sistema de medición automática en prácticas de respuesta en frecuencia

J.C. Lázaro, F. Morilla, R. Hernández, R. Dormido

Dpto. de Informática y Automática (UNED)

C/ Senda del Rey s/n, Madrid 28040

Tel.: (91) 398.71.63, Fax: (91) 398.66.97, e-mail: jclo@dia.uned.es

Resumen

La respuesta en frecuencia, es sin duda, uno de los métodos básicos de medida y caracterización de sistemas. Su conocimiento y análisis es imprescindible en disciplinas como Automática y Electrónica [1,2]. En este trabajo se presenta la aplicación de un sistema de bajo coste que permite determinar de forma automática o semiautomática la respuesta en frecuencia de un proceso lineal. El sistema está compuesto por 1) un instrumento de medida diseñado por los autores, 2) un PC con tarjeta de adquisición de datos y 3) un programa de control del conjunto. Se describe brevemente su funcionamiento y se proponen algunos ejemplos para su utilización dentro de un laboratorio de prácticas de alumnos de asignaturas como Automática y/o Electrónica.

1. Introducción

Una práctica frecuente en un laboratorio de prácticas de automática consiste en la estimación de los parámetros de distintos sistemas analógicos de una entrada y una salida. Los sistemas tienen una representación matemática conocida, concretamente se conoce en muchos casos su función de transferencia, pero se desconoce el valor de sus parámetros. También puede partirse de un sistema completamente desconocido ("caja negra") y el problema consistirá en plantear un modelo y determinar sus parámetros experimentalmente. En ambas situaciones, la determinación de sus parámetros se puede obtener a partir del estudio de la respuesta en frecuencia del sistema. Para ello, una de las herramientas más habituales, por su sencillez tanto de obtención como de comprensión por parte de los alumnos, es el diagrama de Bode. Es interesante desde el punto de vista didáctico, que el alumno sepa obtener dichos diagramas utilizando instrumentación convencional. Haciendo uso de un osciloscopio y de un generador de señales, la obtención del diagrama de Bode (amplitud y fase) de un sistema monovariante consiste en aplicar una entrada sinusoidal a la entrada del sistema con diferentes frecuencias y componerla en el osciloscopio con la salida del sistema en estado estacionario. A partir de la elipse que resulta de esta composición a diferentes frecuencias se determinan fácilmente la amplitud y la fase del correspondiente diagrama de Bode del sistema a estudiar. También puede obtenerse la misma información observando directamente ambas señales sinusoidales en la pantalla aunque la precisión en la fase puede ser menor. En cualquier caso, si se desea barrer un margen amplio de

frecuencias y se pretende una precisión aceptable, tanto en frecuencia como en las magnitudes de amplitud y fase, esta tarea se convierte en una labor monótona y repetitiva, lo que provoca desinterés en el alumnado que está realizando la práctica. Además el tiempo empleado en la toma de medidas es considerable, siendo otra de las grandes limitaciones que presenta este método experimental. Si se abrevia el tiempo destinado a esta determinación rutinaria, se pueden analizar más sistemas distintos, estudiar la influencia de un determinado parámetro sobre el comportamiento del proceso o sistema, discutir e interpretar resultados, etc.

Existen varias posibilidades de automatizar el proceso de medida, una de las cuales se muestran en la figura 1. El problema fundamental de este tipo de soluciones es que tiene serias limitaciones en frecuencia, impuestas tanto por el PC de control como por la tarjeta de adquisición de datos.

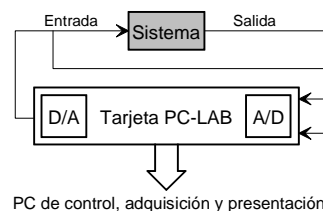


Fig. 1 Esquema simple para la determinación automática de la respuesta en frecuencia de un sistema.

En el siguiente apartado se describe brevemente el sistema propuesto y que elimina estas limitaciones. Un primer prototipo real fue presentado en las XVIII Jornadas de Automática celebradas en Gerona en Septiembre de 1997, donde se mostró su sencillo funcionamiento y la utilidad práctica del mismo [3].

2. Descripción general del sistema

El sistema está compuesto de los siguientes elementos:

1- Un instrumento de medida, que responde a un diseño específico de los autores, y que se ha bautizado como "bodímetro", teniendo en cuenta que el diagrama de Bode es la representación más habitual y sencilla de la respuesta en frecuencia de un sistema. Por estos motivos suele ser la primera que estudian los alumnos y la que mejor comprenden e interpretan. Este instrumento se encarga de generar la señal de excitación al proceso y de determinar tanto las amplitudes de las señales de entrada y de salida, así como la diferencia de fase entre ambas. Este elemento constituye el núcleo central del sistema.

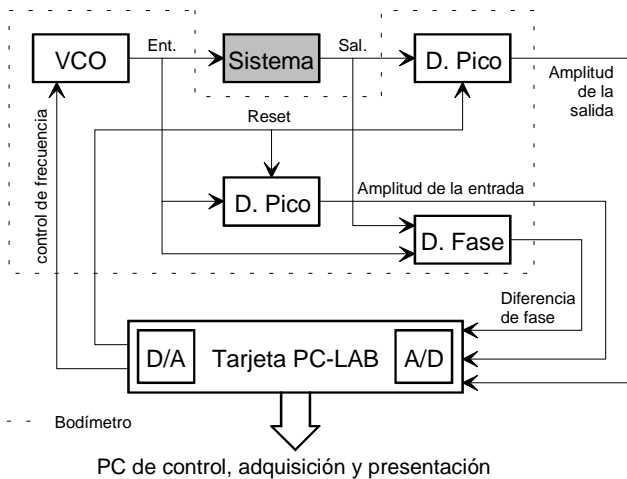


Fig. 2 Esquema general del sistema propuesto

2- Un ordenador personal con una tarjeta de adquisición de datos, que se encarga de controlar la frecuencia de excitación y de capturar las tensiones que proporciona el bodímetro.

3- Un sencillo programa de diseño específico y que se encarga de controlar todo el proceso (excitación, adquisición de datos, presentación de resultados e intercambio con otros programas como MATLAB). Este programa se ha desarrollado para entorno W3.11/W95, por resultar más cómodo e intuitivo para los alumnos. También se dispone de una versión en MS-DOS con lo que se puede hacer funcionar el sistema en cualquier ordenador disponible en el laboratorio, por bajas que sean sus prestaciones. Esto es posible gracias a que en estado estacionario (que es la situación en la que hay que realizar las medidas) las señales que deben entrar y salir del sistema PC-Tarjeta de adquisición, son señales continuas, con lo que no se requiere una velocidad alta del conjunto.

En la figura 2 se muestra el esquema general del sistema propuesto. En él puede verse como se han resuelto los problemas de la limitación en frecuencia. A continuación se describe muy brevemente la función de cada uno de los elementos que intervienen. Para una descripción más

detaillada del funcionamiento de cada una de las partes, puede consultarse [3].

En primer lugar, la señal sinusoidal se genera con la ayuda de un VCO, por lo que la combinación PC-Convertor D/A únicamente tiene que proporcionar una señal de control que en estado estacionario es constante, con lo que queda eliminada la limitación en frecuencia del convertor D/A. Esta señal de control únicamente variará para cambiar la frecuencia en la que se desea medir. Es decir una vez en cada punto de medida. La rapidez con que puede cambiar esta señal tiene una cota máxima impuesta por la dinámica del sistema, pero no tiene ninguna cota mínima, por lo que podríamos hacerlo tan despacio como fuera necesario, de tal forma que tanto el PC como el convertor D/A tengan tiempo de respuesta suficiente. La figura 3 muestra el esquema del circuito eléctrico empleado. Para una descripción detallada de su funcionamiento pueden consultarse [3,4]. El condensador C realmente es un conjunto de 6 condensadores seleccionables manualmente y que permiten elegir el margen de trabajo. Dentro de cada uno de los márgenes el recorrido en frecuencia es de casi cuatro décadas. Las frecuencias alcanzables en cada rango se muestran en la tabla 1.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
F. ini.	1.4E-3	1.4E-2	1.4E-1	1.4	1.4E1	4.3E1
F. fin.	1.2E1	1.2E2	1.2E3	1.2E4	1.2E5	3.2E5

Tabla 1. Límites de barrido del sistema en cada rango (Hz)

2- Se han añadido dos detectores de pico, con lo que las señales sinusoidales correspondientes a la entrada y salida del proceso, son convertidas también a tensión continua, con lo que se elimina la limitación en frecuencia del convertor A/D. Nuevamente aquí tenemos una cota máxima, esta vez impuesta por los detectores de pico, pero al tener un funcionamiento analógico, esta cota permite estudiar sistemas hasta los 320 kHz con un coste muy reducido, frecuencia muy costosa de alcanzar con una tarjeta de adquisición de datos que requeriría al menos 640 kHz de frecuencia de muestreo. La limitación a poco más de

300 kHz es consecuencia de los amplificadores operacionales empleados (LM311 y AD712) [5,6] y que se han elegido de bajo coste. La señal de RESET se activará cada vez que se concluya la medida a una frecuencia. Para esto debe pasar al menos un ciclo de la señal, para poder asegurar que se detecta el pico de amplitud. Esta señal de RESET anula la salida de los detectores de pico y los prepara para detectar el pico a la siguiente frecuencia.

3- Por último un detector de fase (fig. 5) de funcionamiento analógico-digital y que entrega a la salida (en estado estacionario del sistema bajo estudio) una señal continua proporcional a la diferencia de fase entre las señales de entrada y de salida del mismo.

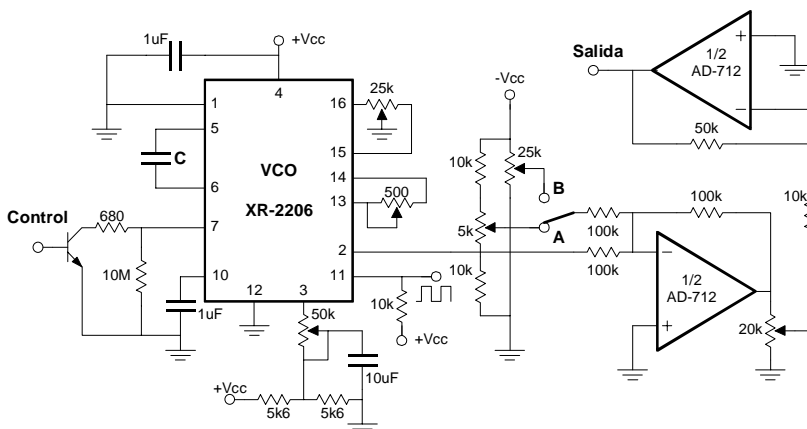


Fig. 3 Esquema eléctrico del generador sinusoidal que proporciona la señal de excitación al sistema. A partir de la señal de Control genera una senoide con bajo contenido armónico [4]. Incorpora un conmutador AB que permite ajustar manualmente un offset en la salida (posición B) o un offset nulo (posición A) ajustado de forma interna. Por último incluye un control manual de amplitud.

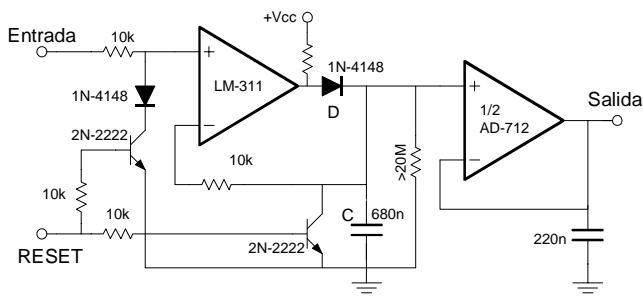


Fig. 4 Esquema eléctrico de cada uno de los detectores de pico

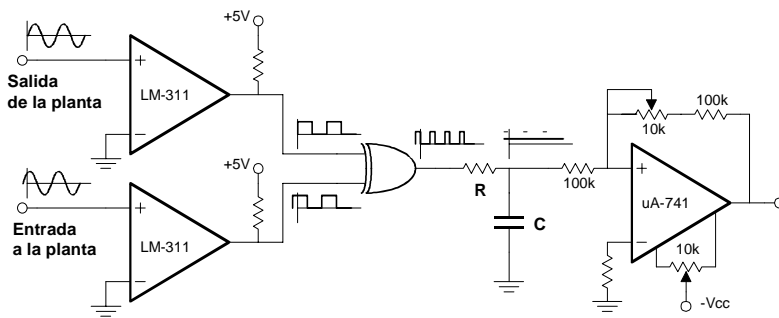


Fig. 5 Esquema del detector de fase, que consta de un multiplicador de cuatro cuadrantes y un promediador.



Fig. 6 Aspecto exterior del prototipo.

La figura 6 muestra el panel frontal del equipo. En él pueden verse los tres conectores tipo BNC para la salida de la señal de excitación y las entradas correspondientes a la entrada y salida del sistema. Dispone también de varios controles manuales. De ellos hay dos que el alumno debe ajustar para cada sistema:

- El rango de frecuencias a barrer. Deberá elegirse de acuerdo con las características del sistema.
- La amplitud de la señal de excitación. Con objeto de obtener la mejor precisión deberá posicionarse al máximo. Sin embargo, si el sistema presenta sobreelongación, su salida puede ser mayor que este máximo y saturaría tanto los detectores de pico como el conversor A/D.

3. Utilización en el laboratorio de Automática I

Como ya se ha mencionado, el Dpto. de Informática y Automática de la UNED dispone de un prototipo real que se ha utilizado durante este curso en las prácticas obligatorias asociadas a la asignatura de Automática I. El objetivo de este primer año de utilización del sistema se centraba en evaluar en la práctica, la utilidad real del sistema y la

acogida por parte de los alumnos. Por este motivo, su introducción en el laboratorio ha sido únicamente auxiliar dentro de la práctica destinada al estudio de la respuesta en frecuencia de un proceso y la estimación de sus parámetros.

En la práctica se hace uso de varios módulos electrónicos que reproducen el comportamiento de sistemas de primer y segundo orden. En la figura 7 se muestran los diagramas de bloques de algunos de ellos. Estos módulos están contruidos con operacionales y elementos pasivos (resistencias y condensadores). Se ha escogido este tipo de módulos por su sencillez y la flexibilidad que aportan tanto

en la elección de frecuencias de interés como en niveles de entrada y salida y no presentan los problemas de excitación que pueden aparecer en otros procesos como por ejemplo sistemas basados en motores. Esta flexibilidad permite una sencilla variación de sus parámetros, lo cual es especialmente interesante en prácticas de estimación de parámetros. Otro aspecto interesante es que se dispone de los diagramas eléctricos exactos de los mismos y que se proporcionan a los alumnos. Con esto, el alumno puede relacionar la visión del sistema como un elemento que responde con una determinada salida frente a distintas entradas, con un sistema

físico que tiene realmente ese comportamiento. Hay que señalar que paralelamente a la asignatura de Automática I los alumnos cursan Electrónica I por lo que no les supone ningún problema el interpretar dichos esquemas, sirviéndoles incluso de complemento a dicha asignatura de electrónica.

En la figura 8 se muestra el resultado obtenido con el sistema propuesto empleando la red de retardo de la figura 7a). La figura 9 muestra la respuesta del sistema de primer orden en tres casos distintos: En lazo abierto y con ganancia unitaria; en lazo cerrado, con la misma ganancia unitaria en lazo abierto; y por último la salida en lazo cerrado cuando la ganancia en abierto es diez. Todas estas gráficas pueden obtenerse en apenas unos minutos y muestran claramente la respuesta en frecuencia de los distintos sistemas. La obtención de todas estas curvas con una precisión aceptable por métodos tradicionales, con toda seguridad consumiría el tiempo total dedicado a la práctica.

4. Utilización en un laboratorio de Electrónica.

La sencillez de cada uno de los cuatro módulos básicos (generador de señal sinusoidal, anulación/ajuste de offset con control de ganancia, detector de pico y detector de fase) de que consta el sistema de medida hace posible su realización por parte de los mismos alumnos. Es decir, cada uno de estos módulos puede consistir una práctica en sí mismo, dentro del campo de la instrumentación. El conjunto de las cuatro tiene como consecuencia la obtención de un sistema real que puede utilizarse en otras prácticas.

Una práctica basada en el primer módulo se centra en el estudio de un VCO comercial de uso muy corriente y que puede emplearse como en este caso para realizar un generador de señal sinusoidal, cuadrada o triangular [4].

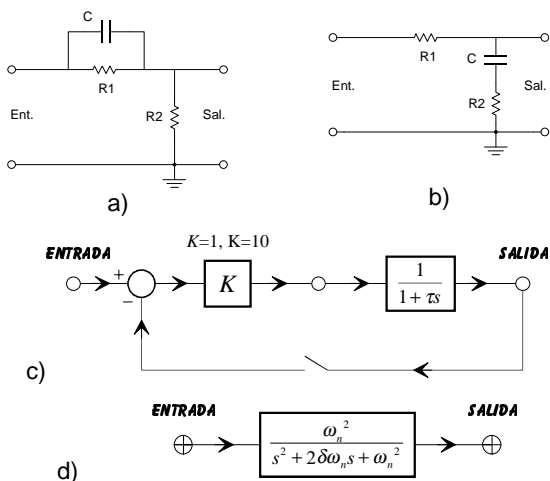


Fig. 7 Diagramas de bloques de algunos de los módulos analógicos empleados en la práctica de estimación de parámetros y en los que se hace uso del "Bodímetro". a) Red de adelanto de fase, b) Red de retardo, c) Sistema de primer orden que se puede estudiar en lazo abierto o cerrado y con una ganancia en lazo abierto $K=1$ o $K=10$, d) Sistema de segundo orden donde δ y ω_n pueden variarse mediante sendos potenciómetros.

También pueden realizarse prácticas de modulación de amplitud, modulación en frecuencia, modulación FSK, etc.

El estudio de los detectores de pico, resulta interesante por el elevado número de situaciones en las que puede aparecer. Por último el detector de fase combina circuitería analógica y digital para conseguir un objetivo conjunto. Esto introduce a los alumnos en el campo de la instrumentación electrónica, y algunos de los problemas que plantea.

Sin embargo, el objetivo inicial es la utilización del sistema completo como instrumento de medida. Un sistema como el presentado aquí puede utilizarse con buenos resultados en buen número de las prácticas más habituales, como diseño de amplificadores, etapas de acople, diseño y realización de filtros, etc.

En todos estos casos el diseño que realiza e implementa el alumno, puede comprobarse con rapidez y precisión en muy poco tiempo, lo que permite rediseñar o modificar cualquier parte del diseño. También puede utilizarse para estudiar de forma interactiva la influencia de cada uno de los elementos en el comportamiento global del sistema. Esto puede resultar de especial interés, por ejemplo, a la hora de ajustar las frecuencias de corte de un filtro.

5. Conclusiones

La utilización del sistema propuesto en el laboratorio de Automática I ha puesto de manifiesto sus ventajas y enormes posibilidades por explotar. En primer lugar, el tiempo dedicado a la toma de medidas se ha reducido considerablemente. Por otra parte, la acogida entre los alumnos ha sido totalmente favorable. Permite contrastar distintos diagramas de Bode experimentales del mismo sistema con distintos parámetros, con o sin realimentación, etc. Gracias a la utilización de entornos de ventanas y a la sencillez de conexionado, los alumnos pueden comenzar a utilizarlo desde el primer momento. Se puede utilizar como

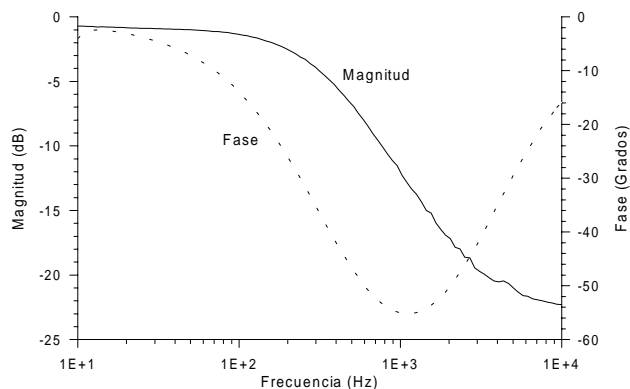


Fig. 8 Respuesta de la red de retardo obtenida con el sistema propuesto.

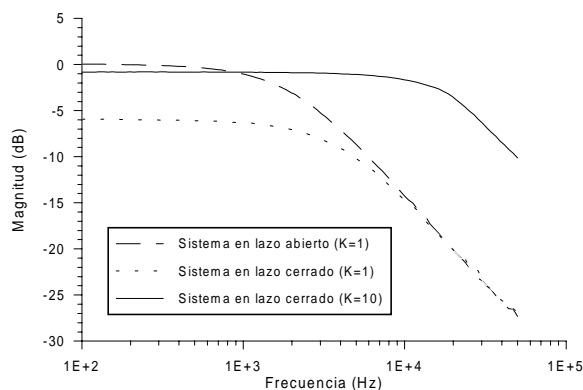


Fig. 9 Respuesta del sistema de primer orden en tres situaciones distintas. Se aprecia claramente las variaciones debidas a la realimentación. Las tres curvas han sido obtenidas en otros tantos barridos con el "Bodímetro".

instrumentación auxiliar en prácticas basadas en MATLAB puesto que genera automáticamente el fichero correspondiente. En cuanto a las mejoras bajo estudio, está el aumento del rango dinámico, integración junto con los convertidores A/D y D/A y una simplificación de alguna de sus partes como por ejemplo una reducción de los márgenes de frecuencia, puesto que las frecuencias más bajas sólo tienen interés para sistemas de dinámica muy lenta y quedan fuera de las posibilidades de tiempo dentro de una práctica.

Con la experiencia de este primer curso de funcionamiento del sistema puede abordarse el diseño de prácticas específicas en las que se haga un uso más intensivo del sistema.

Referencias

- [1] K. Ogata "Ingeniería de control moderna" Prentice-Hall 1998
- [2] B. Kuo "Sistemas automáticos de control" Prentice-Hall 1996
- [3] J.C. Lázaro, F. Morilla, R. Hernández, "Sistema de bajo coste para la determinación automática de la respuesta en frecuencia" XVIII Jornadas de Automática, Gerona Septiembre 1997.
- [4] Exar Corporation. "XR-2206 Monolithic function generator". URL: <http://www.exar.com/products/xr2206.html>
- [5] National Semiconductor. URL: <http://www.national.com/catalog>
- [6] Analog Devices "Dual precision, Low Cost, High Speed, BiFET OP Amp" URL: http://www.analog.com/product/Product_Center.html