

SISTEMA DE BAJO COSTE PARA LA DETERMINACIÓN AUTOMÁTICA DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

J.C. Lázaro, F. Morilla, R. Hernández

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 aplicación es imprescindible en disciplinas como Automática y Electrónica. En este trabajo se presenta un circuito de bajo coste que permite determinar de forma automática o semiautomática la respuesta en frecuencia de un sistema lineal o lineal en torno a puntos de funcionamiento. Este circuito, que responde a un diseño específico de los autores, ha recibido el nombre de "bodímetro", teniendo en cuenta que el diagrama de Bode es la representación más habitual de la respuesta en frecuencia de un sistema.

El bodímetro, que se conecta a la entrada y a la salida del sistema a estudiar, se puede utilizar manualmente conectado a instrumentación convencional (fuente de continua y voltímetro) o conectado a un ordenador personal a través de una tarjeta de adquisición de datos. Al ordenador al que se conecta el Bodímetro no se le exige ninguna característica en cuanto a prestaciones o velocidad, salvo el que disponga de una salida gráfica para visualizar el diagrama; característica ésta ampliamente superada en la actualidad. A la tarjeta de adquisición de datos, tampoco se le exigen características especiales fuera de lo que es habitual en una tarjeta convencional de bajo coste.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento más completo que se puede tener del comportamiento de cualquier sistema lineal, es su respuesta en frecuencia. En un laboratorio de Automática, el disponer de este conocimiento abre un amplio abanico de posibilidades para la realización de prácticas de diversos grados de complejidad (identificación, compensación clásica, control robusto, etc...). Si bien la determinación experimental de la respuesta en frecuencia no plantea problemas y es fácil de realizar con instrumentación convencional de la que se puede encontrar en cualquier laboratorio de alumnos; si se desea barrer un margen amplio de frecuencias, con un elevado número de puntos de medida y un grado de precisión aceptable, se hará necesario realizar una tarea tremendamente rutinaria y repetitiva. Este hecho tiene una serie de consecuencias negativas: la principal es que del tiempo destinado a la realización de la práctica en el laboratorio, se invierte gran parte en la determinación de la ganancia y la fase en todos los puntos, restando posibilidades en cuanto al tratamiento posterior que se pretenda hacer. Esto puede traer como consecuencia, un desvío de la atención de los alumnos respecto del objetivo final de la práctica y una cierta desidia y desinterés hacia el conjunto de la práctica por lo monótono y repetitivo de las medidas experimentales.

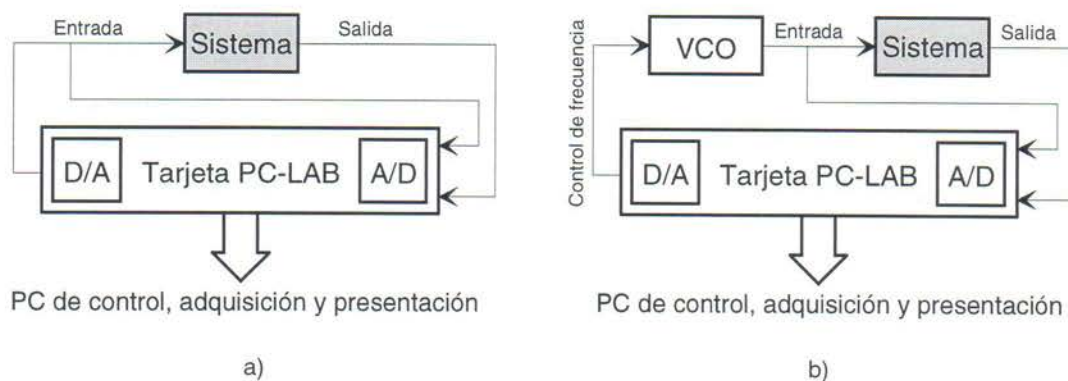


Fig. 1 Esquemas para medir experimentalmente la respuesta en frecuencia.

a) Versión básica, b) mejora de la señal de excitación.

Para estudiar sistemas a frecuencias bajas o muy bajas (por debajo de los 10-100 Hz), es suficiente una tarjeta de adquisición de datos convencional. A través de la salida analógica, se genera una señal sinusoidal de una determinada frecuencia que se emplea como entrada del sistema bajo estudio. Esta señal se debe introducir nuevamente al ordenador por un canal de entrada analógica como señal de referencia, mientras que la señal

de salida del sistema se conecta a otro canal analógico, tal y como se muestra en la figura 1a. Después de que el sistema comienza a ser excitado a una determinada frecuencia, el ordenador debe esperar a que el sistema alcance el estado estacionario. En ese momento, a través de los canales de entrada analógica A/D, se obtiene la forma de las señales de entrada y salida al sistema a lo largo de varios ciclos. Una vez que las señales son conocidas, se pueden calcular por software, la relación entre las amplitudes y la diferencia de fase entre ambas señales y presentarlas de forma gráfica.

La automatización de esta experiencia para distintas frecuencias de la señal de excitación permite caracterizar al sistema por su respuesta en frecuencia, ya sea mediante el diagrama de Bode o cualquier otra representación [1].

Este primer esquema de trabajo presenta una gran limitación en frecuencia. En cuanto a la adquisición de las señales no se plantea un problema especialmente grave, ya que como es bien sabido, basta muestrear al doble de la frecuencia de la señal, para que se pueda recuperar la señal completa mediante diversas técnicas, con lo que se podrían determinar las amplitudes y la diferencia de fase. Sin embargo, es en la salida, o lo que es lo mismo en la generación de la señal de salida que se va a emplear para excitar al sistema bajo estudio, donde se plantean los problemas. Si se genera la señal de excitación con dos o pocos más puntos por ciclo, la excitación que se le proporciona al sistema, ya no es sinusoidal, sino una serie de escalones, que van a influir fuertemente en el comportamiento del sistema. Para reducir este problema, sería necesario proporcionar muchos más puntos por ciclo, con lo que se hace necesario un conversor D/A de mayores prestaciones.

Este efecto se puede, no sólo minimizar sino eliminar completamente, si en lugar de generar la señal sinusoidal de forma digital, se genera de forma analógica mediante un oscilador controlado por tensión (VCO). De esta forma la salida del conversor D/A, ya no se emplea para generar la señal, sino para comandar al VCO, determinando la frecuencia de oscilación del mismo a través de la tensión de salida del mencionado conversor (ver fig. 1b). La forma de excitar al sistema en este caso, es la siguiente: El ordenador establece una tensión de salida a través del conversor D/A, con lo que el oscilador pasará a oscilar a la frecuencia correspondiente, que o bien puede estar tabulada con una previa calibración o para mayor precisión puede determinarse por software después de que la señal haya sido adquirida.

El segundo esquema, requiere utilizar instrumentación o circuitería adicional, y tiene como principal limitación la frecuencia de trabajo máxima. Para poder ampliar el margen de trabajo, o lo que es lo mismo ampliar el tipo de sistemas susceptibles de ser estudiados, se puede optar por cambiar la tarjeta de adquisición por otra de mayor velocidad de muestreo, lo que conlleva en primer lugar un desembolso considerable y además es posible que sea necesario un ordenador de mayores prestaciones aumentando el coste del sistema considerablemente. En este trabajo se propone otra solución, ampliando la circuitería externa, que permite llegar a frecuencias de cientos de kHz, e incluso más si se cambian algunos componentes, haciendo uso de una tarjeta de adquisición de datos de baja frecuencia; (~30kHz).

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BODÍMETRO

El trabajo que se presenta tenía como principal objetivo, encontrar un esquema alternativo al de la figura 1a); que fuera capaz de cubrir un amplio margen de frecuencias (<1.3mHz - 250kHz) con el empleo de equipamiento convencional, de bajo coste. Este objetivo se ha cubierto con el diseño de un circuito específico que realiza tres funciones básicas: 1ª-Generación de la señal de forma analógica con la ayuda de un VCO, 2ª-Determinación de la amplitud de las señales, 3ª- Determinación de la diferencia de fase de dos señales. Con la primera función se consigue, como ya se comentó anteriormente, una señal sinusoidal con un nivel de distorsión total armónica muy bajo (THD=0.5% según los datos del fabricante del VCO). La segunda y la tercera, van a proporcionar unas señales de continua proporcionales a las amplitudes de las señales de entrada y salida a la planta y la diferencia de fase entre ambas. El esquema general del bodímetro se puede ver en la figura 2, donde se muestra su diagrama de bloques y las conexiones con el sistema y el ordenador.

En el esquema de la figura 2 se puede observar que la frecuencia de oscilación del VCO, se controla mediante una de las dos salidas analógicas de que dispone la tarjeta de adquisición de datos. La otra salida analógica se emplea para reinicializar los circuitos de detección de pico. Para esta función, no es necesaria una señal analógica y se puede emplear igualmente una de las 16 salidas digitales de la tarjeta, ya que lo único que se requiere es poner un transistor en saturación para descargar los correspondientes condensadores, como se describirá más adelante en el apartado del detector de pico. Por último, al conversor de entradas analógicas se le proporcionan tres señales: las dos amplitudes y la diferencia de fase. En lugar de introducir las amplitudes por separado, se podría incluir en el circuito un divisor que calculase la relación entre ambas. Sin embargo,

como la práctica totalidad de tarjetas de adquisición de datos disponen de un multiplexor de 16 entradas, resulta mucho más sencillo realizar este cálculo directamente por software. Se cuenta además con la ventaja de que al tratarse de niveles de continua, el hecho de conmutar el multiplexor de entrada, no supone ninguna limitación adicional.

Las ventajas de disponer de un circuito como este en el laboratorio son: a) Permite obtener directamente las características necesarias para dibujar el diagrama de Bode. b) Una vez alcanzado el estacionario por parte del sistema, tanto las amplitudes como la diferencia de fase serán constantes, por lo que basta cualquier tarjeta de adquisición de datos para introducir estos valores en el ordenador. c) El coste completo del circuito se mantiene muy reducido; sin embargo con el cambio de algunos operacionales por otros algo más costosos, que presenten mayor ancho de banda y un tiempo de subida menor, se puede ampliar el margen de trabajo hasta 1MHz, que es el límite superior del VCO elegido, sin modificar el diseño lo más mínimo.

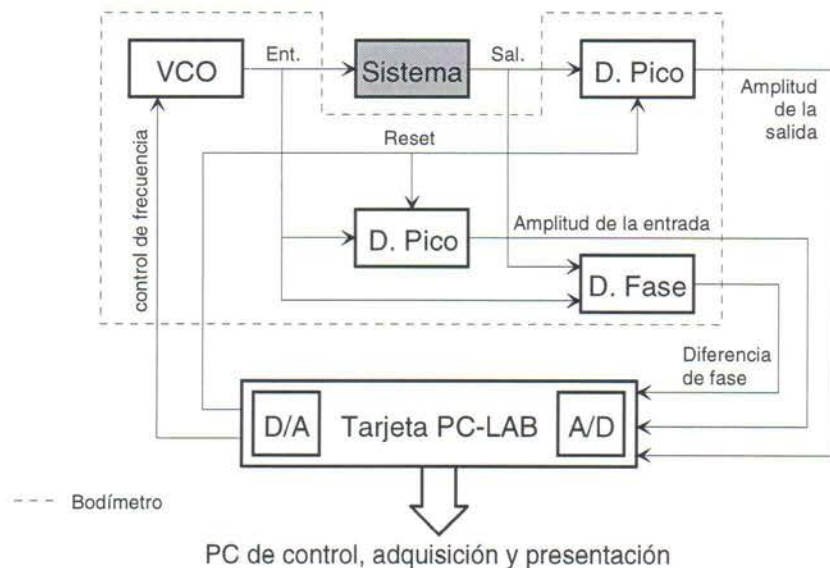


Fig. 2 Esquema general del Bodímetro.

GENERACIÓN DE LA SEÑAL DE EXCITACIÓN

La señal de entrada se obtiene como se comentó con la ayuda de un oscilador controlado por tensión, construido en torno al integrado XR-2206 [2], que realiza todas las funciones necesarias del VCO. La frecuencia de oscilación de este integrado se puede controlar variando la resistencia entre el terminal 7, polarizado internamente a unos 3 voltios y tierra. Para controlar la frecuencia mediante una tensión, se puede sustituir esa resistencia por un generador de tensión, sin embargo éste presenta el problema de que al poner una tensión cercana a la polarización interna del integrado, puede suceder que se supere, aunque sea sólo de forma transitoria, con lo que la corriente en ese terminal se invierte y el integrado deja de oscilar bruscamente. Para evitar este efecto, se puede dejar un margen de seguridad, pero en ese caso existe la limitación de no poder realizar barridos tan amplios y además el oscilador se podría parar debido al ruido. Por estos motivos se ha optado por no atacar directamente con un generador de tensión sino intercalando un transistor. De esta forma, a) se puede reducir la corriente de salida en el terminal de control del VCO sin que llegue a invertirse su sentido; b) se consigue un margen de barrido de casi cuatro décadas, suficiente para el estudio de la mayor parte de sistemas. Estas cuatro décadas se pueden centrar en distintas frecuencias conmutando el condensador C de forma manual. Si fuese necesario automatizar más la adquisición, se podría realizar la conmutación del condensador bajo el control del ordenador, pero teniendo en cuenta que con un sólo condensador se pueden explorar casi cuatro décadas, suficiente para la mayor parte de sistemas, no merece la pena la complicación adicional que supone. En la parte de la generación de señal se han añadido dos operacionales adicionales que se encuentran en un mismo integrado AD-712 [3]. El primero de ellos permite controlar el nivel de continua de la señal de salida, y el segundo hace las veces de etapa amplificadora de salida. La ganancia de esta etapa de salida se selecciona también de forma manual, en un margen de 0 a 20Vp-p. De esta forma, una vez elegida la banda en la que se va a realizar el estudio, se conmuta al condensador correspondiente, y una vez ajustado el nivel de excitación, se le da la orden al ordenador para que comience con el barrido en frecuencia. La figura 3 muestra el circuito correspondiente.

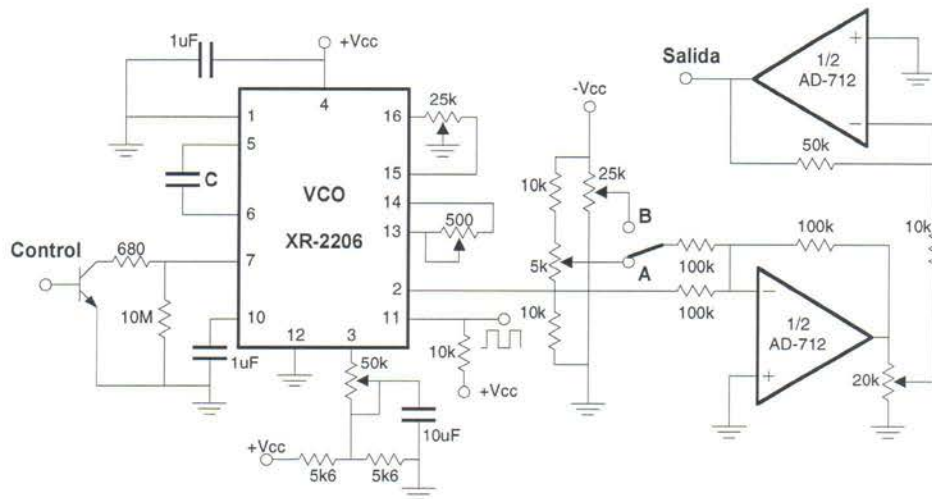


Fig. 3 Esquema circuital del módulo generador de la señal sinusoidal
 En la posición A se anula el nivel de continua.
 En la posición B se puede establecer un nivel de continua arbitrario

DETERMINACIÓN DE LAS AMPLITUDES

La determinación de la amplitud, se realiza de la misma forma para las señales de entrada y de salida, duplicando el esquema circuital de la figura 4 [4,5]. En esta figura se puede observar un circuito comparador que carga al condensador C a través del diodo D. Esta carga se produce únicamente cuando la señal de entrada es superior a la tensión en bornes del condensador. El diodo D evita que el condensador se descargue durante el resto del ciclo. A la salida se incorpora un seguidor de tensión, que realiza la función de adaptación de impedancias. Para esta función se ha vuelto a elegir el AD-712 que presenta una elevada impedancia de entrada, ya que se trata de un operacional con entrada FET, con lo que se retarda la descarga del condensador y permite alcanzar frecuencias más bajas sin tener que aumentar el valor del condensador. Por tratarse de un operacional dual, se emplea un único integrado para los dos detectores de pico.

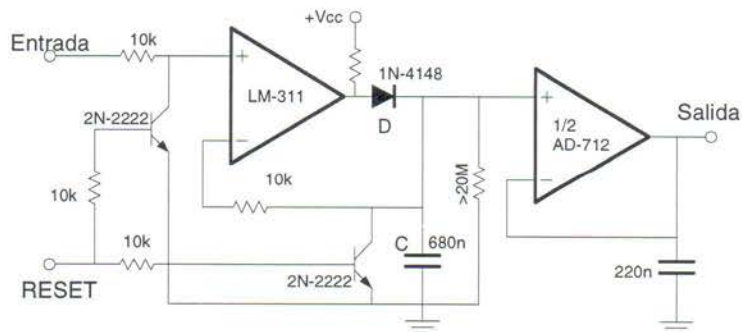


Fig. 4 Circuito encargado de medir la amplitud de las señales.

Puesto que los detectores de pico, por su propia naturaleza, presentan un comportamiento acumulativo, se hace necesario reinicializarlos para realizar una nueva medida. Esto se consigue descargando el condensador con la ayuda de un transistor, que en estado de funcionamiento normal del circuito está cortado y se pone en saturación cuando se activa la señal de Reset. Como puede verse, esta señal de Reset únicamente sirve para cortar o saturar al transistor, por lo que tal y como se comentó antes, puede emplearse una de las salidas digitales para tal función. Con este esquema, el mínimo nivel de señal con el que puede trabajar el detector de pico está en el valor de la tensión Colector-Emisor del transistor en saturación y que se sitúa en torno a los 0,25 V. En cuanto a la frecuencia máxima de trabajo, la limitación está en el circuito comparador, (obsérvese que el seguidor de tensión trabaja con señal prácticamente continua y por lo tanto no influye en este aspecto), y se sitúa por encima de los 250kHz a máximo nivel de señal. Sin embargo, se pueden alcanzar mayores frecuencias, con el mismo circuito, si se sustituye el comparador LM-311 [6] por otro que tenga un tiempo de subida menor, con el único inconveniente del correspondiente incremento de coste. En cuanto a la mínima

frecuencia, el problema está en la descarga del condensador. Para reducir esta frecuencia, basta con aumentar su constante de tiempo. Ésta se puede aumentar tanto como se desee cambiando el condensador C por otro de mayor capacidad, pero como consecuencia, el circuito tardará mucho más en alcanzar el estacionario, aunque este efecto se puede minimizar si la carga del condensador se hace con la ayuda de un transistor en el lugar del diodo D. Sin embargo, ésto no es necesario, ya que el detector de fase va a imponer mayores restricciones en este aspecto. Por otra parte, las frecuencias muy bajas no son un problema especial, ya que en ese caso se pueden emplear las señales de entrada y salida directamente y determinar la amplitud y la fase por software a partir de la adquisición de la forma de onda.

DIFERENCIA DE FASE

La diferencia de fase entre las dos señales se puede obtener de forma sencilla, si mediante sendos comparadores pasamos las dos señales sinusoidales (entrada y salida) a señal cuadrada. Una vez conseguido esto, basta una puerta XOR y una red R-C a su salida para obtener una señal de continua proporcional a la diferencia de fase entre ambas. En la figura 5 se muestra el circuito correspondiente y las señales en distintos puntos del mismo. Respecto al límite superior de la frecuencia de trabajo, cabe decir lo mismo que para el detector de pico. En cuanto al valor mínimo, ahora la situación es mucho más crítica, ya que ahora las constantes de tiempo asociadas a la carga y a la descarga del condensador son iguales, al contrario que en el detector de pico donde la constante de tiempo de descarga era varios órdenes de magnitud superior a la de carga, gracias a la función del diodo D. Por este motivo, en este caso no se puede adoptar una solución similar por lo que la mínima frecuencia de trabajo es mucho mayor, y la única forma de rebajarla es aumentar la constante de tiempo de carga-descarga. Sin embargo, el incremento de esta constante de tiempo, hace que el circuito tenga un tiempo de respuesta mucho mayor, por lo que el tiempo necesario para la determinación de todo el diagrama de Bode se incrementa considerablemente. Esto se corrige con el empleo de unos interruptores CMOS (4016) para elegir uno u otro condensador en función del margen de frecuencias en el que se realiza la medida. No obstante, como para bajas frecuencias se puede disponer mediante adquisición directa de las formas de onda completas de entrada y salida del sistema bajo estudio, se ha adoptado una solución de compromiso en la que se emplea la determinación electrónica por encima y la determinación por software por debajo de una frecuencia determinada seleccionable por programa.

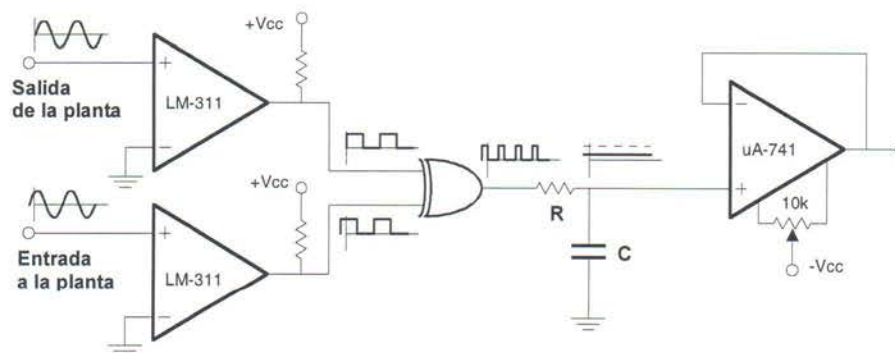


Fig. 5 Esquema del circuito que se encarga de determinar la diferencia de fase entre las señales de entrada y salida, donde se muestran las señales en distintos puntos.

El problema se reduce a establecer la frecuencia a la que se realizará el cambio del cálculo entre uno y otro método. Para elegir esta frecuencia, intervienen como factores, las características de la tarjeta de adquisición de datos y el tiempo necesario para obtener el diagrama completo. Para una tarjeta sencilla de unos 30kHz de frecuencia de muestreo, este intercambio se puede situar alrededor de los 10-100 Hz. Frecuencias más altas permiten poner una constante de tiempo menor y por lo tanto mayor velocidad, pero el número de puntos obtenidos por ciclo puede resultar escaso para obtener una cierta precisión, por lo que se hará necesaria una reconstrucción de la señal. Por el contrario frecuencias más bajas, permiten obtener un mayor número de puntos por ciclo de la señal, con lo que se puede evitar su reconstrucción, pero por contra se debe aumentar la constante de tiempo del condensador que producirá un incremento del tiempo necesario para obtener el diagrama completo. Con objeto de que no se produzcan saltos en el diagrama debidos al cambio del método de medida, este se aplica de forma gradual estableciendo un peso que va de 0 a 1 en un pequeño margen en el que la medida se realiza por los dos métodos.

Una forma alternativa, para la determinación de la diferencia de fase, es la de medir la anchura de los pulsos proporcionados por la puerta XOR mediante un contador, o lo que es lo mismo el tiempo que media entre los flancos de subida o bajada de las señales proporcionadas por los dos comparadores, que convierten la señal sinusoidal en señal cuadrada. En este caso, se sigue presentando el mismo problema, pero ahora en una versión digital: para poder mantener resolución a altas frecuencias, el contador debería recibir una señal de muy alta frecuencia, lo cual es costoso; y por otra parte, para poder medir las bajas frecuencias, el número de bits necesario es excesivo.

REQUISITOS PARA LA UTILIZACIÓN DEL BODÍMETRO

La determinación automática de respuestas en frecuencia siguiendo el esquema de la figura 2 requiere un ordenador personal, una tarjeta de adquisición de datos y un software que se encarga de todo el proceso de automatización (excitación, adquisición de datos y presentación de resultados) mediante un interfaz cómodo e intuitivo. Las características o prestaciones exigibles al ordenador no están determinadas por el sistema en sí, sino que van a depender fundamentalmente de la implementación que se haga del software de control del sistema conjunto. Si el software se desarrolla en entorno MS-DOS, prácticamente cualquier ordenador de las características de un PC-AT con un sencillo 80286 sería suficiente. Ahora bien, si se desea un entorno más potente, se debería pensar en un desarrollo para MS-WINDOWS, lo que impondría unas ciertas restricciones a la hora de elegir el ordenador, en función siempre de la versión de este sistema que se escogiera para la implementación. Otro aspecto importante, es el de el tiempo de desarrollo del software de adquisición y presentación de resultados. En un entorno más moderno como WINDOWS-95, se dispone de herramientas de programación visual que reducen considerablemente el tiempo empleado en la generación del programa. Está claro que una elección de este tipo va a llevar a un desarrollo más rápido, flexible, potente y atractivo, pero nos impone unas fuertes restricciones en cuanto a la máquina necesaria para controlar todo el sistema. Actualmente, el bodímetro está bajo pruebas en un entorno de este tipo: WINDOWS-95 y desarrollo con DELPHI-3.0, corriendo sobre un 486-DX2 a 66MHz con 16 Mb de memoria, lo cual permite agilizar el desarrollo y la puesta a punto de todo el conjunto. No obstante, está en desarrollo simultáneamente un software para MS-DOS, con el objeto de poder emplear el sistema con ordenadores que resulten inservibles para otro tipo de prácticas, como pueden ser aquellas que impliquen simulación con programas en entorno WINDOWS, o control en tiempo real de sistemas de dinámica rápida.

CONCLUSIONES

El bodímetro presentado, permite la obtención de la respuesta en frecuencia de cualquier sistema en un margen de casi cuatro décadas, que se pueden desplazar sobre el eje de frecuencias en el rango entre 0.5mHz y 250kHz. El diseño modular, permite que las distintas partes puedan realizarse como prácticas independientes de diseño electrónico. Su sencillez y bajo coste, permite una realización simple, que puede ser hecha por los propios alumnos. Estos ajustes se centran en la etapa de generación de la señal y permiten ajustar la forma de la onda para mínima distorsión y anular el nivel de continua a la salida. La principal contribución del bodímetro es la de sustituir la tediosa tarea de medir experimentalmente la respuesta en frecuencia de un sistema y reducir al mínimo el tiempo empleado en ella. Esto proporciona un punto de partida para gran número de prácticas, especialmente en aquellos casos en los que haya que obtener la respuesta en frecuencia de forma repetitiva. Como en los casos en los que se pretende ver como la modificación de algún parámetro afecta al comportamiento global del sistema. Entre las posibles mejoras, se están estudiando la ampliación del rango de frecuencias, especialmente en el límite superior, y el aumento del rango dinámico, así como la realización de un diseño más autónomo, que podría realizarse con la adición de los conversores A/D y D/A y otros circuitos complementarios.

REFERENCIAS

- [1] F. Morilla, L. Lechuga. "Automation of open-loop and closed-loop experiments". Preprints of SICICA'92 (Symp. on Intelligent Components and Instruments for control Applications), pp. 813-817
- [2] Exar Corporation. "XR-2206 Monolithic function generator".
URL: <http://www.exar.com/datashts/genpur/xr-2206.pdf>
- [3] Analog Devices. "Dual precision, Low Cost, High Speed, BiFET OP Amp".
URL: <http://www.analog.com/pdf/ad712.html>
- [4] P. Horowitz, W. Hill. "The Art of Electronics". Ed. Cambridge University Press 1989
- [5] Savant, C.J.; Martin S. Roden; Gordon L. Carpenter. "Diseño electrónico, circuitos y sistemas". 2ª Ed. Addison-Wesley. Wilmington 1992.
- [6] National Semiconductor. URL: <http://www.national.com/catalog/>