

Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Hoja de cálculo para diseño de filtros analógicos

Titulación: Ingeniería Industrial
Alumno/a: Carlos Gamboa Gil de Sola
Director: Lorenzo Ros McDonnell

Cartagena, 15 de Octubre de 2012

Índice

1. Antecedentes	2
2. Conceptos teóricos	6
1. Principios básicos	6
2. Función de transferencia	7
3. Atenuación	9
4. Tipos de filtros	9
5. Aproximaciones	11
3. Resolución de problemas	14
1. Filtro de paso bajo simple	14
2. Problema con transformación a paso bajo equivalente	16
3. Problemas de filtros con ajustes de frecuencias	17
4. Aplicación práctica	19
1. Usos de la hoja de cálculo	19
2. Uso del entrenador NI Elvis II+	23
5. Campos de mejora y futuras ampliaciones	25
6. Anexos	27
1. Ecuaciones de cálculo y tablas	28
2. Guía de instrucciones orientadas al alumnado	40
3. Instrucciones para el uso del software NI Elvis II+	44
7. Bibliografía	46

1. Antecedentes

El trabajo que a continuación se desarrolla parte de la iniciativa del profesor Amir Eghbali, perteneciente al departamento de sistemas electrónicos (ISY) de la institución Linköpings Universitet, localizada en Linköping, Östergötland, Suecia. Consiste en la transformación efectiva de las sesiones prácticas de laboratorio de la asignatura *Analog Filter/Analog filters* (Filtros Analógicos), dejando de lado la programación de ejercicios diseñados para Matlab para orientarlos a la implementación directa en un circuito real, montado sobre el entrenador Elvis II+ de National Instruments. Para ello se ha diseñado un programa en formato Excel, que sirva al docente para un diseño cómodo de los ejercicios y a los alumnos, para comprobar sus cálculos y centrarse mejor en la labor práctica.

La asignatura que se trata es de un volumen lectivo de seis créditos (6 ECTS), en la cual se abordan todos los conocimientos imprescindibles para calcular y realizar filtros electrónicos sencillos. Se emplea como guía de contenidos el libro *Analog Filters Using Matlab*, escrito por Lars Wanhammar, un antiguo profesor de dicha universidad. El índice que lo vertebra es, a grandes rasgos, el siguiente:

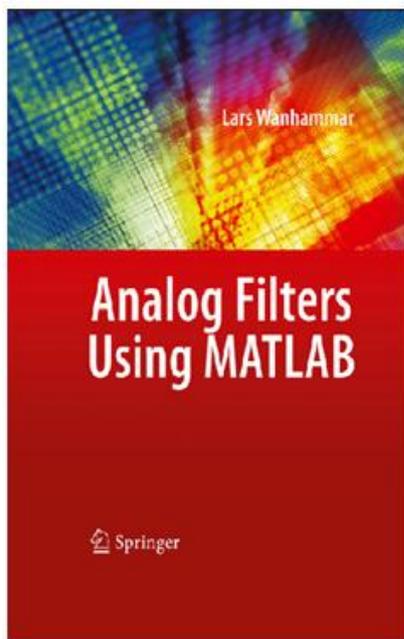


Figura 1.1: Libro de texto y dispositivo entrenador para montaje de circuitos

1. En el primer capítulo se estudian conceptos básicos concernientes a filtros analógicos, como ganancia, fase, tiempos continuo y discreto, etc.
2. En el segundo capítulo se estudian los principales parámetros que afectan al diseño de los filtros, y los tipos de filtros según la aproximación que se emplee (Butterworth, Chebyshev I y II, Cauer).
3. En el tercer capítulo se estudia el cálculo de filtros pasivos, es decir, aquellos en los que sólo intervienen componentes pasivos (resistencia, bobina y condensador), usando el filtro de paso bajo (LP) como base, y calculando los demás a partir de éste.
4. El cuarto capítulo estudia filtros pasivos con elementos distribuidos, es decir, aquellos componentes cuya magnitud depende de sus dimensiones. De este tipo de elementos son, por ejemplo, las líneas de distribución, que tanta mayor inductancia presenta cuanto mayor es su longitud.
5. En el quinto capítulo se estudian los elementos pasivos y activos (diodos, transistores, amplificadores operacionales) que formarán parte de circuitos y redes más complejas, y su comportamiento.
6. En el sexto capítulo empiezan a abordarse filtros activos, en forma de secciones (o redes) de primer y segundo orden, que son tales por la cantidad de polos presentes en su función de transferencia, que depende de la cantidad de componentes filtradores que contienen y su disposición. Un filtro de segundo orden puede cumplir con unas especificaciones más exigentes que uno de

primer orden, a costa de una mayor complejidad y un mayor número de componentes.

7. En el séptimo capítulo se estudia la adecuada combinación de secciones de primer y segundo orden para obtener filtros de orden superior a estos.
8. En el octavo capítulo, se plantean estrategias para evitar la implementación de bobinas en los circuitos, debido a la imprecisión, la generación de ruidos y el elevado precio que tienen asociadas, aunque siempre cumpliendo las exigencias de origen.
9. El noveno capítulo estudia el diseño de los filtros en función de las ondas incidentes y reflejadas, en lugar de por estado de tensión y corriente a la entrada y la salida. Como ocurre con la luz, un cambio en el medio físico produce cambios en el comportamiento de ésta, como refracciones y reflexiones. En el caso de un circuito, un cambio de impedancia con respecto a un elemento previo produce también reflexiones, las cuales pueden emplearse para obtener la magnitud relativa de esas impedancias.
10. En el décimo capítulo, se estudian simulaciones topológicas, esto es, circuitos activos transformados a partir de filtros pasivos convencionales, que permiten retirar las bobinas de su diseño y a su vez realizar una variación cómoda de sus parámetros de funcionamiento.
11. Por último, el undécimo capítulo explica las técnicas para calibrar y ajustar los filtros, una vez implementados.

Los ejercicios para los que se ha diseñado el programa son fundamentalmente los del tercer capítulo, es decir, filtros básicos pasivos con estructura en cascada. A juicio del profesor, estos ejercicios son los más importantes a nivel conceptual y, al mismo tiempo, razonablemente ejecutables en el tiempo que dura cada sesión de prácticas (cuatro horas).

Dado que por norma los ejercicios de diseño son abiertos y a veces implican cálculos muy tediosos, cuando no una cierta complejidad, el profesor facilita a los alumnos de su asignatura una guía con las fórmulas necesarias, junto con unas tablas y diagramas. Con estas tablas es posible hallar rápidamente los valores relativos de condensadores y bobinas con respecto a las resistencias que se emplean, conocidos algunos valores de entre amortiguación, orden del filtro y frecuencias de corte. Los cálculos del programa se basan también en estas tablas, a fin de que la coincidencia entre el cálculo teórico y el

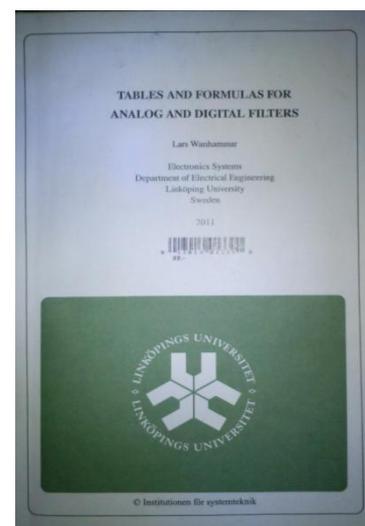


Figura 1.2: Tablas de cálculo

resultado del programa sea exacta.

Para una mejor consecución del objetivo práctico que se persigue, el programa incluye el cálculo del filtro deseado a través de diferentes vías, las cuales se justifican según los datos iniciales de los que se disponga, además de la transformación de los valores teóricos calculados en valores comerciales normalizados y fácilmente disponibles en cualquier laboratorio.

Otro aspecto de este proyecto implica tomar en consideración las condiciones propias del entrenador Elvis II+ de National Instruments. Al igual que otros entrenadores comerciales, está equipado con placas ProtoBoard fijas, fuente de alimentación, puertos de entrada y salida de datos, generador de señales, entradas y salidas analógicas y digitales, terminales para distintas variedades de conector (banana jack, pinzas de cocodrilo, cables), display de siete segmentos, etc. Este dispositivo lleva asociado un software instalable, que recoge los datos transmitidos y los procesa, pudiendo realizar mediciones limitadas del comportamiento de los circuitos instalados, como un osciloscopio simple. Como se descubrirá más adelante, la gran versatilidad del entrenador restringe severamente las condiciones de contorno de cada prueba examinada específicamente, mostrando valores distorsionados cuando tales condiciones se sobrepasan. La solución que entonces se adopta, lejos de limitar la capacidad de diseño del programa elaborado, consiste en advertir al alumnado de las limitaciones inherentes al equipo que emplean.

2. Conceptos teóricos

Para contextualizar adecuadamente la labor práctica de la asignatura y las funciones del programa es preciso desarrollar de forma concisa los contenidos teóricos que intervienen.

1. Principios básicos.

La función de un filtro analógico consiste en alterar una señal de entrar para obtener de ella las propiedades que son aprovechables en ciertas condiciones, amortiguando o eliminando las propiedades que queremos ignorar. La función más habitual consiste en seleccionar un conjunto determinado de frecuencias de una señal para amplificarlas, atenuando el conjunto excluido, siendo de especial utilidad en el mundo del audio y las comunicaciones.

El principio de funcionamiento de un filtro pasivo se basa en que la impedancia de algunos elementos es variable con la frecuencia, de manera que cuando se disponen de la manera apropiada algunas frecuencias permanecen inalteradas, mientras que otras sufren distintos grados de atenuación. En última instancia, son divisores de tensión selectivos en frecuencia. Los elementos de impedancia variable

son el condensador (C) y la bobina (L). Su comportamiento en frecuencia es el siguiente:

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} \ (\Omega)$$

$$Z_L = 2\pi f L \ (\Omega)$$

Donde Z_i representa la impedancia del elemento i , f la frecuencia de la señal de entrada en hertzios (Hz), C la capacidad del condensador y L la inductancia de la bobina. Cabe recordar la relación $\omega = 2\pi f$. Estos elementos pueden emplearse con una resistencia formando filtros de paso bajo simples de primer orden, según la disposición:



Figura 2.1: Ejemplos de filtros sencillos basados en componentes pasivos

Ambos circuitos son equivalentes, ya que a frecuencias bajas el condensador se comporta como un circuito abierto, dejando apenas alterada la señal de entrada; y a medida que la frecuencia aumenta su impedancia disminuye, hasta comportarse casi como un cortocircuito, perdiéndose la mayor parte de la señal, disipada en la resistencia. Por el principio inverso, la disposición de la bobina produce el mismo efecto.

2. Función de transferencia

Expresando esto en forma matemática, se define la función de transferencia como el cociente entre la señal de salida y la de entrada de un circuito, y la cual refleja exactamente el comportamiento del mismo. Se opera en el marco del plano complejo $\mathbb{C} (\mathbb{R} - I)$, en el cual la parte puramente resistiva se localiza en el eje real y la parte puramente reactiva se localiza el eje imaginario. De esta manera, dado que los cambios en frecuencia se sitúan exclusivamente en el eje imaginario (reactancias), se suele expresar la frecuencia en forma $j\omega$. Por tanto, con elementos dependientes de la

frecuencia tales como condensadores y bobinas, una función de transferencia H se escribe con la notación $H(j\omega)$. Vemos un ejemplo para el circuito RC de la figura 1.1:

Tensión de entrada: V_I ; Tensión de salida: V_O

$$V_O = \frac{Z_c}{R + Z_c} V_I = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} V_I = \frac{1}{1 + j\omega RC} V_I$$

$$H(j\omega) = \frac{V_O}{V_I} = \frac{1}{1 + j\omega RC} V_I / V_I = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Como el denominador tiene sólo una raíz (polo), el filtro anterior es de orden 1.

Tal como ocurre en teoría del control y teoría de circuitos, se representan las funciones de transferencia según la transformada de Laplace, con numerador y denominador definidos en s . Permiten describir el funcionamiento de un circuito con independencia de la magnitud de las señales de entrada y salida.

El orden del filtro viene dado por el número de polos (o número de raíces en el denominador); y el número de ceros (número de raíces en el numerador) es siempre igual o inferior al número de polos. Además, para asegurar la estabilidad del sistema, los polos se sitúan siempre en el semiplano real negativo, a la izquierda del eje imaginario, y para los problemas de frecuencia selectiva que se estudian los ceros son pares imaginarios puros. Para esto, es necesario que todos los coeficientes de la función de transferencia sean positivos. Le forma genérica de representar una función de transferencia se muestra a continuación:

$$H(s) = G \frac{(s - s_{z1})(s - s_{z2})(s - s_{z3}) \cdots (s - s_{zM})}{(s - s_{p1})(s - s_{p2})(s - s_{p3}) \cdots (s - s_{pN})}$$

De donde s_{z1}, \dots, s_{zM} constituyen los ceros y s_{p1}, \dots, s_{pN} constituyen los polos. Atendiendo a esta notación, el filtro de orden 1 del ejemplo anterior se puede expresar de nuevo de la siguiente forma:

$$H(s) = \frac{1}{1 + RCs}$$

La forma más natural de representar las funciones de transferencia y estimar rápidamente su comportamiento es el uso de las gráficas, en las que se ilustra la

evolución de dicha función de transferencia a lo largo de todo el espectro de frecuencias. En el eje de ordenadas se representa el valor numérico de la función de transferencia, mientras que en el eje de ordenadas se representan las frecuencias.

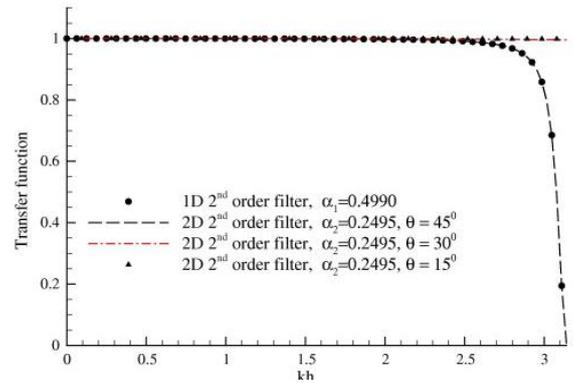


Figura 2.2: Ejemplo de gráfica de filtro de paso bajo, en que se muestra la amplitud en función de la frecuencia

3. Atenuación

La pérdida de magnitud en la señal es expresada en la atenuación, y se mide en decibelios (dB). Para su cálculo se toma el valor absoluto de la función de transferencia, es decir, el módulo de la coordenada polar correspondiente. Considerando una función de transferencia $H(j\omega)$, la atenuación (o ganancia, aunque no se dé en filtros pasivos) se define como:

$$A(\omega) = -20 \cdot \log(|H(j\omega)|)$$

En este caso, se prefiere el uso de la notación $j\omega$ en lugar de s , ya que el cálculo de la atenuación hace siempre referencia a una frecuencia. Vemos que la atenuación ha de evaluarse para una frecuencia específica, porque lo más habitual es que la atenuación sea variable a lo largo de todo el rango de frecuencias. Los valores de atenuación obtenidos varían en el intervalo $(0, \infty)$, siendo los próximos a cero aquellos cuya amortiguación es muy baja (banda pasante), y los superiores a 40 dB aproximadamente aquellos en los que la señal permanece prácticamente eliminada (banda no pasante). Se verá más adelante que el grado de atenuación en las distintas regiones de frecuencias es un parámetro fundamental al plantear el diseño de un filtro analógico.

Otro efecto importante en filtros es el desfase relativo de las frecuencias, aunque no se abordará en el tipo de ejercicios para los que se ha diseñado el programa. Este desfase justifica la existencia de filtros que dejan pasar a su través todas las frecuencias, y cuya función consiste en sincronizar la velocidad de transmisión de todas las ellas, evitando que el sonido de origen se escuche distorsionado al final de una comunicación.

4. Tipos de filtros

En la clase de filtros que ocupan este trabajo se distinguen dos tipos de zonas: aquellas en que la señal entrante permanece casi inalterada (banda pasante) y aquella en que la atenuación es lo suficientemente importante como para considerar anulada

la señal de entrada (banda no pasante). Dependiendo de la distribución de bandas de frecuencias admitidas y rechazadas (bandas pasantes y no pasantes, respectivamente), podemos clasificar cuatro tipos de filtros:

1. **De Paso Bajo** (LP – *Low Pass*): aquellos que permiten el paso de señales o armónicos inferiores a cierta frecuencia, atenuando las que son superiores a ella.
2. **De Paso Alto** (HP – *High Pass*): aquellos que permiten el paso de señales o armónicos superiores a cierta frecuencia, atenuando las que son inferiores a ella.
3. **De Paso Banda** (BP – *Band Pass*): aquellos que sólo permiten el paso de frecuencias comprendidas entre dos valores límites de frecuencia, atenuando todo lo que se encuentre excluido.
4. **De Rechaza Banda** (BS – *Band Stop*): aquellos que sólo atenúan las frecuencias comprendidas entre dos valores límites de frecuencia, permitiendo el paso de todo lo que se encuentre excluido.

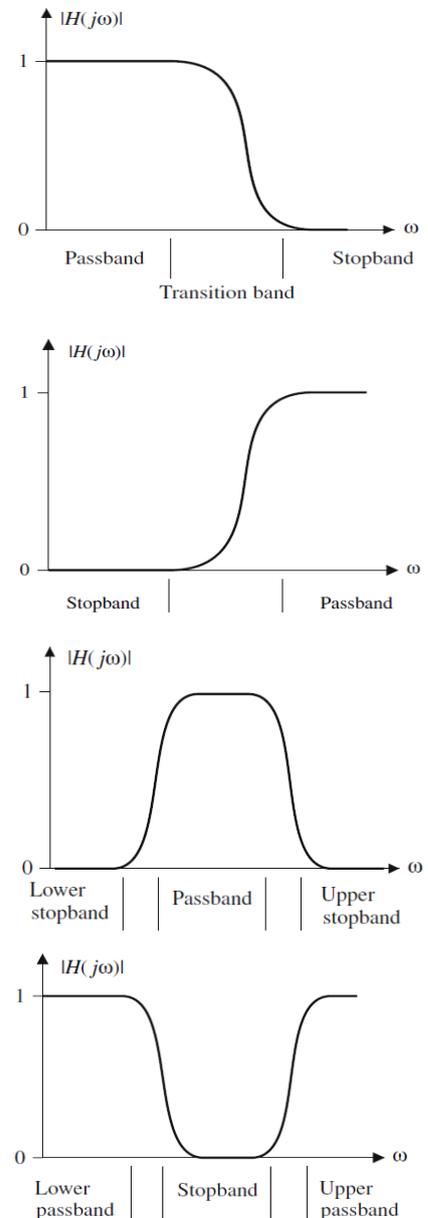


Figura 2.3

5. Además, existe también los filtros de **Paso Todo** (AP): Aquellos que permiten el paso de todas las frecuencias pero ecualizan la fase de la señal.

En el conjunto anterior de figuras, *passband* refleja el conjunto de frecuencias de la banda pasante, mientras que *stopband* hace otro tanto con el conjunto de frecuencias de la banda no pasante. Puede observarse que entre estas zonas diferenciadas existen unos intervalos o saltos llamados bandas de transición, en las cuales se produce el paso de un estado a otro.

En filtros ideales (es decir, tal como se diseñan desde un punto de vista teórico) esta zona de transición es inexistente, mientras que en filtros reales su anchura puede abarcar varios órdenes de magnitud. Los filtros de órdenes bajos suelen presentar bandas de transición extensas, mientras que los de órdenes superiores pueden ajustarse a bandas de transición muy estrechas. Las frecuencias límite se llaman **frecuencias de corte** y **frecuencias atenuadas**, asignándoseles los subíndices c o s según delimiten la zona admitida o la rechazada (ω_c , ω_s).

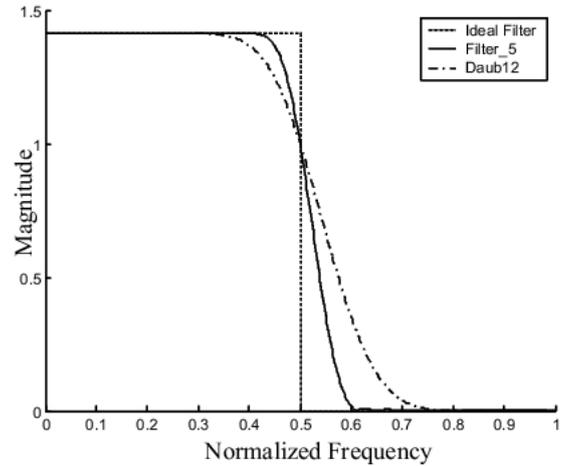


Figura 2.4

De forma análoga a como sucede con la banda de transición, el comportamiento en las bandas pasante y no pasante en filtros reales se aproximan al todo/nada del ideal teórico, pero no lo cumplen estrictamente. Según la clase de aproximación se emplee, buscando conservar ciertas propiedades en las distintas regiones, se obtendrá un orden de filtro determinado. En general, cuanto más suave es la forma de la respuesta en frecuencia del filtro, más se acerca a su comportamiento ideal, y se requerirán órdenes mayores que para otro filtro con una forma más irregular, para unos requisitos dados.

5. Aproximaciones

De acuerdo con este principio, podemos distinguir los cuatro tipos de filtros más básicos y empleados con mayor frecuencia:

1. **Butterworth**: se obtiene al imponer que la respuesta en magnitud del filtro sea *máximamente plana* en la banda pasante y en la banda no pasante. Su función de transferencia sólo contiene polos.
2. **Chebyshev I y Chebyshev II**: se obtiene una pendiente más abrupta en la banda de transición que en un filtro de tipo Butterworth, a costa de permitir cierto rizado en alguna de sus bandas. Se subdividen en:
 - a. *Chebyshev I*: presenta rizado constante (equirizado) en la banda pasante, caída monótonica en la banda no pasante, y su función de transferencia está integrada únicamente por polos.
 - b. *Chebyshev II*: presenta caída monótonica en la banda pasante y un rizado constante en la banda no pasante, y su función de transferencia presenta tanto polos como ceros.

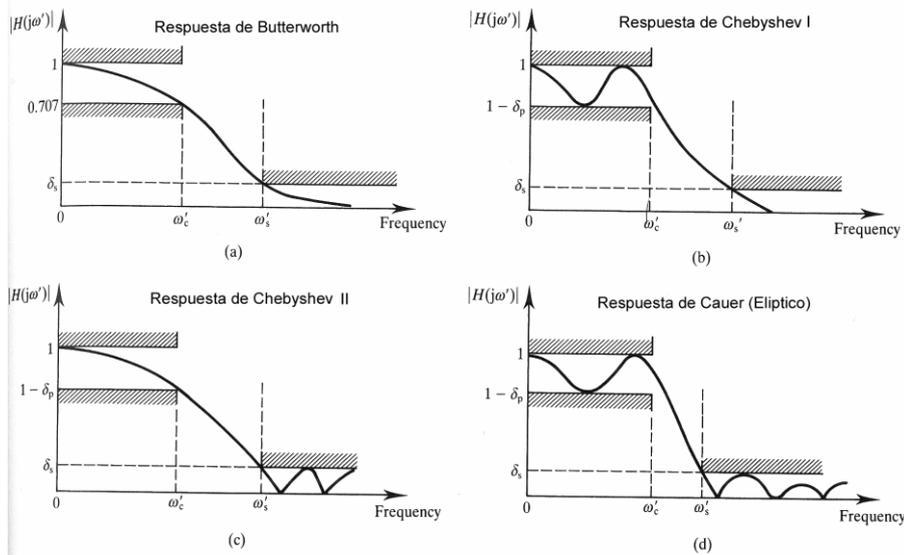


Figura 2.5: Respuesta en frecuencia de un filtro de paso bajo según las cuatro aproximaciones

3. **Cauer (elíptico)**: se obtiene una banda de transición muy estrecha a costa de permitir rizado en las bandas pasante y no pasante. Su función de transferencia contiene polos y ceros, y permite filtros de orden inferior a los anteriores ante un conjunto determinado de especificaciones.

La disparidad de comportamientos entre las diferentes aproximaciones se debe a la distribución de polos y ceros en el plano complejo. Dependiendo además del tipo de filtro requerido se darán diferentes topologías dentro de la misma aproximación. Aunque podrían desarrollarse métodos de cálculo para cada clase de filtro, lo más habitual es tomar un caso de referencia, en este caso un filtro de paso bajo, y realizar las transformaciones necesarias para que partiendo de diferentes escenarios, se puedan calcular todos ellos como el problema tipo. Por esto, una vez conocidos los datos del problema, se calculan parámetros equivalentes en paso bajo, se resuelve normalmente y se deshace el cambio, obteniéndose el filtro requerido. Un ejemplo de transformación de parámetros se ilustra en la siguiente figura:

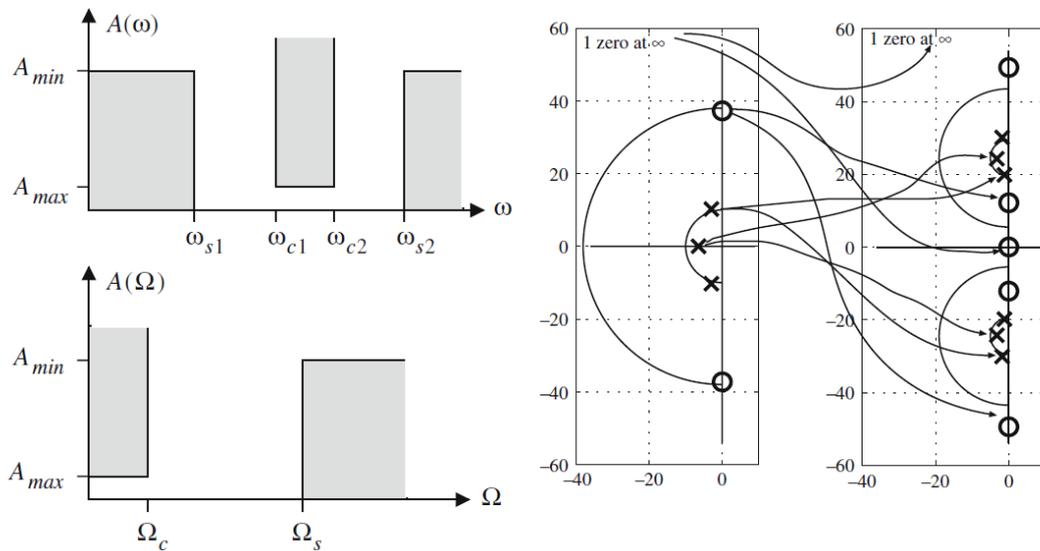


Figura 2.6: Ejemplo de un caso de transformación de paso banda a su paso bajo equivalente, y viceversa

Se ilustran los pasos de la transformación, en primer lugar desde los datos de inicio (las frecuencias de corte) hasta las frecuencias del filtro de paso bajo equivalente; en segundo lugar la duplicación de los polos y los ceros del paso bajo equivalente al del filtro buscado.

Para cerrar el apartado introductorio, es preciso actualizar el concepto de filtro tal como se va a presentar a continuación. Siempre que se aproxime el funcionamiento del filtro a un comportamiento ideal, su diseño será más complejo y de mayor *orden* (N). El filtro, diseñado para hacer selección de frecuencias dentro de una señal, puede plantearse según *varias aproximaciones*, dependiendo de la exigencia del comportamiento en las bandas pasante y no pasante. Cuanto más regular y predecible sea esta exigencia, mayor será el orden del filtro, haciendo que los del tipo Butterworth tengan más orden con respecto a los Chebyshev y los Cauer. El aumento del orden implica un mayor número de componentes.

En lo relativo a las frecuencias, existen las *frecuencias de corte* (ω_{ci}), que delimitan la banda pasante, y las *frecuencias atenuadas* (ω_{si}), que delimitan la banda no pasante. Cuanta menor sea la banda de transición, mayor será el nivel de exigencia. Asimismo, cuando se minimiza la atenuación en la banda pasante (A_{max}) y se maximiza en la banda no pasante (A_{min}), el filtro se aproxima más al ideal y, por tanto, tiene un orden mayor.

3. Resolución de problemas

1. Filtro de Paso Bajo simple

Un tipo de problema muy habitual a lo largo del estudio de la asignatura, sobre el que luego se realizan extensiones y variaciones, es el siguiente:

Determina los valores de los elementos en un filtro de paso bajo, de orden 5, en cascada, doblemente resistivo LC en T, aproximado por Butterworth, como el que muestra la figura, que cumpla las siguientes condiciones:

$$N=5 ; \omega_c=20 \text{ krad/s} ; \omega_s=62 \text{ krad/s} ; A_{\max}=0,5 \text{ dB} ; A_{\min}=40 \text{ dB} ; R_s=R_L=1000 \Omega$$

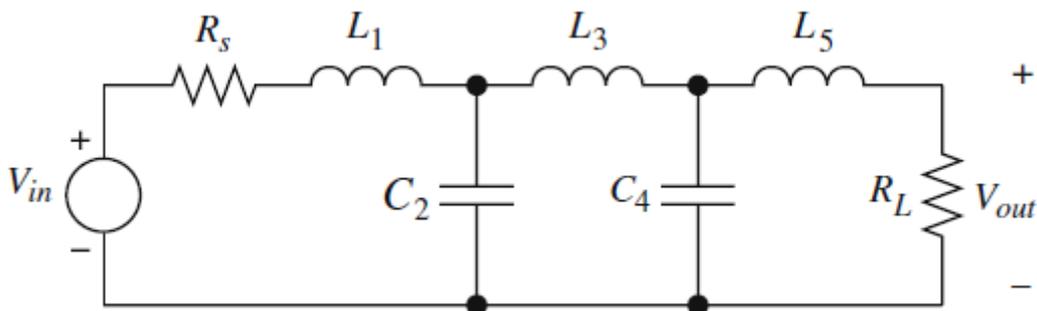


Figura 3.1: Estructura de filtro en cascada en T de orden 5

Este es el caso más sencillo posible de resolución de un filtro, ya que no hay ninguna transformación involucrada, y ni siquiera es necesario calcular el orden del filtro. El hecho de que sea un filtro en T implica que el primer elemento en contacto con R_s está en serie, mientras que si estuviera en paralelo la disposición pasaría a llamarse en π . Aunque el mismo enunciado ya revela que se trata de un filtro de quinto orden, se calcula como se haría normalmente a partir de los demás datos. Así, para una aproximación de Butterworth:

$$N \geq \frac{\log\left(\frac{10^{0.1A_{min}} - 1}{10^{0.1A_{max}} - 1}\right)}{2 \cdot \log(\omega_s/\omega_c)} = \frac{4,91353}{0,98272} = 4,9999$$

Como ha de tomarse el primer número entero superior a este valor, se confirma que el orden de filtro buscado es cinco. De esta forma consultamos las tablas (las facilitadas por el profesor de la asignatura) de los valores normalizados para los componentes por aproximación de Butterworth. De la tabla $r=1$ ($r=R_L/R_s$), tomamos los valores de la quinta línea $N=5$:

L1	C2	L3	C4	L5
0,618	1,618	2	1,618	0,618

Estos valores están normalizados, es decir, son valores relativos que sirven para un amplio abanico de casos diferentes, y que pueden particularizarse. En este caso, necesitamos el radio de la circunferencia que forman los polos r_{p0} , y la resistencia R_s .

$$r_{p0} = \omega_c \varepsilon^{-1/N} \quad ; \quad \varepsilon = \sqrt{10^{0.1A_{max}} - 1}$$

Puede observarse que para los valores del enunciado $\varepsilon=0,3493$; y $r_{p0}=24682,40$. La desnormalización se lleva a cabo multiplicando las bobinas normalizadas por R/r_{p0} y los condensadores normalizados por $1/Rr_{p0}$. Así, los valores definitivos de bobinas y condensadores serán:

$$R/r_{p0} = 0,0405 \quad ; \quad 1/R \cdot r_{p0} = 4,05 \cdot 10^{-8}$$

$$L1 = L5 = 0,618 \cdot 0,0405 = 0,02503 H = 25,03 mH$$

$$C2 = C4 = 1,618 \cdot 4,05 \cdot 10^{-8} = 6,553 \cdot 10^{-8} F = 65,53 nF$$

$$L3 = 2 \cdot 0,0405 = 0,081 H = 81 mH$$

2. Problema con transformación a paso bajo equivalente:

Determina los valores de los elementos en un filtro de paso alto, de orden 5, en cascada, doblemente resistivo LC en T, aproximado por Butterworth y que cumpla las siguientes condiciones:

$$N=5 ; \omega_c=30 \text{ krad/s} ; A_{\max}=0,1 \text{ dB} ; A_{\min}=40 \text{ dB} ; R_s=R_L=1000 \Omega$$

Lo primero que hacemos es, a partir del orden y la frecuencia conocidos, averiguar los posibles valores de ω_s . Conviene recordar que, en filtros de paso alto, $\omega_s < \omega_c$. Así:

$$\omega_s = \frac{\omega_c}{10^{\left(\frac{\log\left(\frac{10^{0.1A_{\min}} - 1}{10^{0.1A_{\max}} - 1} \right)}{2N} \right)}}$$

$$\omega_s=8200,6 \text{ rad/s para } N=5$$

$$\omega_s=5929,7 \text{ rad/s para } N=4$$

Se escoge un número cualquiera comprendido entre estos valores, por ejemplo, 8000 rad/s. A continuación se calculan las frecuencias del filtro paso bajo equivalente. Para ello, se asigna arbitrariamente la frecuencia angular ω_f^2 . Normalmente se selecciona de manera que $\omega_f^2 = \omega_c^2$, y a partir de esta igualdad, se calculan las frecuencias equivalentes:

$$\Omega_c = \frac{\omega_f^2}{\omega_c} ; \Omega_s = \frac{\omega_f^2}{\omega_s}$$

El filtro de paso bajo equivalente a calcular queda entonces delimitado por los siguientes parámetros:

$$N=5; \Omega_c=30 \text{ krad/s}; \Omega_s=112,5 \text{ krad/s}; A_{\max}=0,1 \text{ dB} ; A_{\min}=40 \text{ dB} ; R_s=R_L=1000 \Omega$$

Por analogía con el ejemplo anterior, se conoce que los valores normalizados del filtro de paso bajo equivalente son:

L1	C2	L3	C4	L5
0,618	1,618	2	1,618	0,618

De nuevo es necesario el cálculo de ε y r_{p0} para desnormalizar. Con los valores del enunciado, se obtiene:

$$r_{p0} = \omega_c \varepsilon^{-1/N} = 43691,7 ; \quad \varepsilon = \sqrt{10^{0,1A_{max}} - 1} = 0,15262$$

Los elementos por tanto del filtro de paso bajo equivalente son:

$$L1 = L5 = 14,15 \text{ mH}$$

$$L3 = 45,78 \text{ mH}$$

$$C2 = C4 = 37,03 \text{ nF}$$

Para deshacer al cambio y obtener los valores de los filtros de paso alto, se definen los elementos definitivos mediante las siguientes fórmulas:

$$c_i = 1/\omega_f^2 L_i$$

$$l_j = 1/\omega_f^2 C_j$$

Por tanto, los valores del filtro de paso alto buscado son:

$$c1 = c5 = 78,55 \text{ nF}$$

$$c3 = 24,27 \text{ nF}$$

$$l2 = l4 = 30 \text{ mH}$$

3. Problema de filtros con ajustes de frecuencia

Determina los valores de los elementos en un filtro de paso banda, en cascada, doblemente resistivo LC en π , aproximado por Cauer y que cumpla las siguientes condiciones:

$$\omega_{c1}=5 \text{ krad/s} ; \omega_{c2}=20 \text{ krad/s} ; \omega_{s1}=2 \text{ krad/s} ; \omega_{s2}= 90 \text{ krad/s} ;$$

$$A_{max}=0,1 \text{ dB} ; A_{min}=40 \text{ dB} ; R_s=R_L=5100 \Omega$$

Se comienza por hacer la simetría de frecuencias, recurso que nos permite realizar las transformaciones matemáticas de forma sencilla. Para efectuarse con rigor, este ajuste se realiza desde el punto de vista de la seguridad, es decir, la frecuencia que se modifique dará lugar a un filtro más restrictivo, y que por tanto cumple con holgura las especificaciones requeridas. La simetría impuesta es:

$$\omega_{c1} \omega_{c2} = \omega_{s1} \omega_{s2} = \omega_f^2$$

El producto del primer término da como resultado 100000000, mientras que el segundo da como resultado 180000000. Sólo existen dos alternativas de ajuste, o bien mayorar el primer término o bien minorar el segundo. Mayorar el primero supondría alterar de manera significativa la forma de la banda pasante, lo cual desvirtúa el filtro original. Si se minorar el segundo término, se ha de hacer de forma que se estreche la banda de transición, es decir, que el filtro sea más restrictivo. Por tanto, a efectos de cálculo a partir de ahora, se emplea la siguiente frecuencia de corte:

$$\omega_{s2}' = 100000000 / 2000 = 50 \text{ krad/s}$$

Los valores de frecuencia del paso bajo equivalente, a partir de un filtro paso banda son:

$$\Omega_c = \omega_{c2} - \omega_{c1} \quad ; \quad \Omega_s = \omega_{s2} - \omega_{s1}$$

Y a continuación se resuelve de la forma ya vista en los ejemplos anteriores. El orden del filtro de paso bajo equivalente es cuatro, y al deshacer el cambio este número se dobla. Nótese que, tanto en aproximaciones por Chebyshev II como por Cauer, un polo puede estar representado por dos componentes, de forma que para un orden cuatro se requieren cinco elementos, los cuales al doblarse en número forman diez componentes. El valor final de los elementos es:

$$c_1 = 10 \text{ nF} \quad l_1 = 680 \text{ mH} \quad c_{21} = 33 \text{ nF} \quad l_{21} = 270 \text{ mH} \quad c_{22} = 68 \text{ nF} \quad l_{22} = 120 \text{ mH}$$

$$c_3 = 22 \text{ nF} \quad l_3 = 390 \text{ mH} \quad c_4 = 10 \text{ nF} \quad l_4 = 150 \text{ mH}$$

4. Aplicación práctica

1. Usos de la hoja de cálculo

El tipo de problema que se puede resolver en el programa coincide con todas las clases de filtros en cascada LC que se pueden calcular según el plan de estudios de la asignatura a la que sirve. Los órdenes que se abarcan dependen estrictamente de las tablas. Los problemas que se resuelven con este programa tienen unas características definidas: en primer lugar, siempre se tratan filtros pasivos en cascada, por este motivo, sólo se emplearán resistencias, bobinas y condensadores; en segundo lugar, el orden de los filtros está limitado en diez para aproximaciones en Butterworth, en nueve y sólo números impares para las aproximaciones en Chebyshev I, y en cinco para aproximaciones en Cauer; en tercer lugar, en la mayoría de los casos (salvo uno de Butterworth) se emplean estructuras doblemente resistivas, procurando la simetría del circuito; en cuarto lugar, se fuerza la simetría de las frecuencias de corte en filtros de paso banda y elimina banda para su correcta transformación a paso bajo equivalente (como puede verse en el último ejemplo explicado).

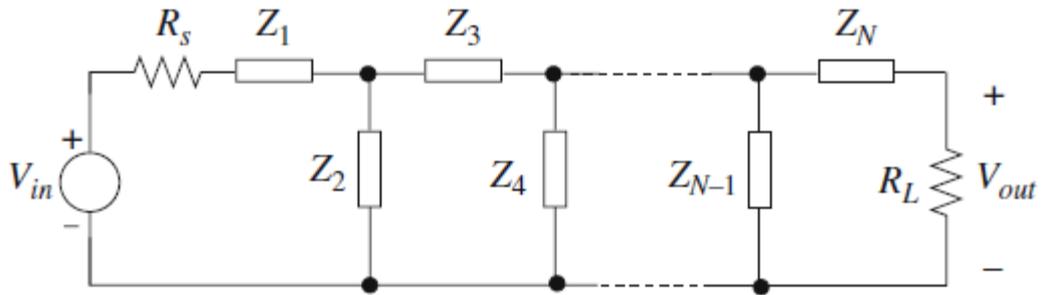


Figura 4.1: Estructura en cascada genérica en T

El funcionamiento del programa es muy sencillo e intuitivo, y elaborado de tal forma que no sea posible salir de las condiciones de contorno, evitando así mostrar datos confusos. La interfaz del programa es el siguiente:

Specifications																									
Filter	Band Pass Band Stop	Design Path	Kind	Amin		Amax		LP equivalent																	
Approximation	Butterworth Chebyshev 1	Order Frequencies	r T	$\omega S1$ $\omega C1$		$\omega S2$ $\omega C2$		Ω^2	Ω_c	Ω_s															
Order		Ratio		Maximum value of $\omega S2$		Minimum value of $\omega S2$		0	0	0															
Std R Values (Ohm)	freq'		r	1	Ladder components (standard)																				
Order of magnitude x 10 x 100					c1	i1	c2	i2	c3	i3	c4	i4	c5	i5	c6	i6	c7	i7	c8	i8	c9	i9	c10	i10	
1,0k																									
1,1k																									
1,2k																									
1,3k																									
1,5k																									
1,6k																									
1,8k																									
2,0k																									

Figura 4.2: Impresión de la interfaz de la hoja de cálculo

Los campos que presenta son:

- **Filter:** en él se pueden seleccionar entre los cuatro tipos de filtros estudiados, a saber: paso bajo, paso alto, paso banda y rechaza banda (Low Pass, High Pass, Band Pass y Band Stop, respectivamente).
- **Approximation:** permite seleccionar entre las aproximaciones de Butterworth, Chebyshev y Cauer.
- **Design Path:** permite seleccionar entre orden y frecuencias (order y frequencies, respectivamente). Se justifica en que existen distintos puntos de partida para diseñar los filtros: en unas situaciones es preferible limitar el orden hasta cierto valor, variando el valor de la frecuencia atenuada; mientras

que en otras situaciones se da preferencia al comportamiento sin importar el orden del que él resulte.

- **Kind:** permite seleccionar entre filtros tipo π o tipo T, según se requiera un filtro con el primer elemento en paralelo o en serie.
- **Amin:** permite introducir el valor de atenuación mínima en la banda no pasante.
- **Amax:** permite introducir el valor de atenuación máxima en la banda pasante.
- $\omega c1$, $\omega c2$, $\omega s1$, $\omega s2$: en ellos se introducen los valores de las frecuencias de corte y frecuencias atenuadas que se pretendan para el filtro.
- **Order:** en él se introduce el valor del orden del filtro que se va a calcular, si Design Path está configurado en el modo order, o muestra el valor de orden correspondiente a las frecuencias de diseño, si Design Path está en modo frecuencias.
- **Ratio:** muestra la relación entre la frecuencia atenuada del paso bajo equivalente y su frecuencia de corte (Ω_s/Ω_c).
- **Maximum /mínimum value of $\omega s2$:** muestra los valores entre los que debe situarse la frecuencia más alta de diseño, cuando Design Path está configurado en modo order.
- **LP Equivalent:** muestra el valor de los parámetros fundamentales del filtro de paso bajo equivalente del filtro a diseñar.
- **freq':** muestra el valor de la frecuencia de simetría que se emplea en los cálculos a la hora de diseñar filtros de paso banda y rechaza banda.
- **r:** muestra la relación entre la resistencia de carga y la de entrada en estructuras doblemente resistivas en cascada en filtros con aproximación por Butterworth.
- **Order of magnitude:** permite seleccionar el orden de magnitud de las resistencias empleadas en el filtro, multiplicando la lista de valores resistivos que se encuentra debajo por el orden de magnitud seleccionado.
- **Ladder Components (standard):** muestra el valor final de los condensadores y las bobinas que componen el filtro, usando valores normalizados para todos ellos.

Todas las operaciones que permiten la realización de los cálculos automatizados son las mismas que a nivel teórico se emplean para resolver normalmente el problema. Con el fin de no entorpecer la explicación del programa con un exceso de fórmulas, se presentan éstas en el anexo de cálculos, al igual que las tablas empleadas en el cálculo.

Los mayores logros entonces de este programa radican en su robustez en su facilidad para las variaciones de diseño y su interfaz visual.

El programa puede considerarse robusto, por no permitir la introducción de valores erróneos en los campos decisivos. Un dato puede ser erróneo bien por el tipo de dato introducido, bien por su falta de concordancia con un buen diseño. En todos los casos, al seleccionar la celda afectada, se muestra un cuadro aclaratorio indicando la forma en que ésta debe rellenarse. Para evitar confusiones, en el caso de que la celda se rellene incorrectamente, se muestra un cuadro de error, advirtiendo del error que se comete y no permitiendo su introducción. Se produce a su vez el efecto de borrar el contenido de todas las celdas de diseño cuando se alteran factores fundamentales, como el tipo de filtro a sintetizar o la aproximación por la que se diseña.

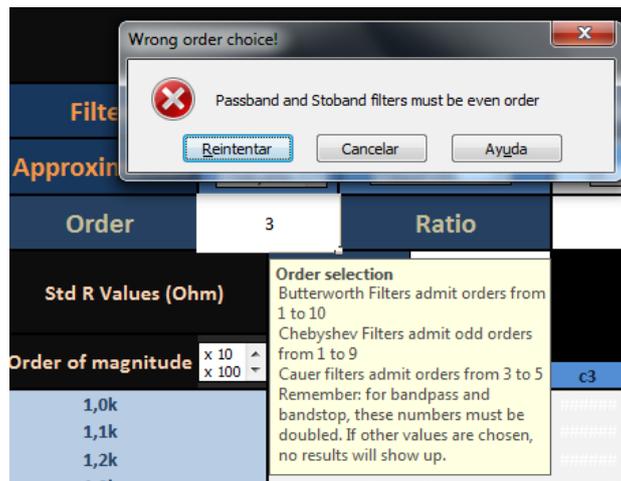


Figura 4.3: Muestra de las diferentes guías del programa para su correcto uso

La facilidad para variaciones en el diseño se refleja en que pueden verse los cambios que se van realizando en el diseño de un filtro en tiempo real, resultando de esto la posibilidad de calcular por tanteo. Además, permite el diseño de filtros a través de dos vías diferentes, lo cual evita tener que tantear indefinidamente en busca de unas características concretas de funcionamiento. Esta propiedad es de especial utilidad para el profesor, y permite hacer comparativas rápidas entre distintos tipos de filtros y de aproximaciones, evitando los pasos de diseño más tediosos.

La interfaz visual permite escoger entre docenas de variedades diferentes de filtros que cumplen con los mismos requisitos. Esto resulta de especial utilidad cuando se pretende implementar el diseño en un circuito real, debido a que los laboratorios no siempre están equipados con un surtido flexible de componentes electrónicos. Suplir esta carencia con una amplia variedad de diseños puede facilitar considerablemente la realización de experimentos para grandes grupos de alumnos.

Filter	High Pass Band Pass	Design Path		Kind		Amin	40	Amax	0,1						
Approximation	Butterworth Chebyshev I	Order	10	Ratio	2	ω_S	5000	ω_C	10000						
Order	10	Ratio	2	Maximum value of ω_c		Minimum value of ω_c		9563,27	10277,78						
Std R Values (Ohm)		r		1	Ladder components (standard)										
Order of magnitude	x 10 x 100	l1	c2	l3	c4	l5	c6	l7	c8	l9	c10				
100		39mH	1µF	8,7mH	680nF	6,2mH	470nF	6,8mH	680nF	12mH	3,3µF	OH	OH	OH	OH
110		39mH	1µF	9,1mH	470nF	6,8mH	470nF	7,5mH	680nF	15mH	3,3µF	OH	OH	OH	OH
120		47mH	1µF	10mH	470nF	7,5mH	470nF	8,2mH	680nF	15mH	3,3µF	OH	OH	OH	OH
130		51mH	1µF	10mH	470nF	8,2mH	470nF	9,1mH	680nF	18mH	2,2µF	OH	OH	OH	OH
150		56mH	680nF	12mH	470nF	9,1mH	330nF	10mH	470nF	18mH	2,2µF	OH	OH	OH	OH
160		56mH	680nF	12mH	330nF	10mH	330nF	10mH	470nF	22mH	2,2µF	OH	OH	OH	OH
180		68mH	680nF	15mH	330nF	10mH	330nF	12mH	470nF	22mH	2,2µF	OH	OH	OH	OH
200		68mH	680nF	15mH	330nF	12mH	220nF	12mH	330nF	27mH	1,5µF	OH	OH	OH	OH
220		82mH	470nF	18mH	220nF	12mH	220nF	15mH	330nF	27mH	1,5µF	OH	OH	OH	OH
240		82mH	470nF	18mH	220nF	15mH	220nF	15mH	330nF	33mH	1,5µF	OH	OH	OH	OH
270		100mH	470nF	22mH	220nF	15mH	220nF	18mH	330nF	33mH	1µF	OH	OH	OH	OH
300		120mH	330nF	22mH	220nF	18mH	150nF	18mH	220nF	39mH	1µF	OH	OH	OH	OH
330		120mH	330nF	27mH	150nF	18mH	150nF	22mH	220nF	39mH	1µF	OH	OH	OH	OH

Figura 4.4: Muestra de una amplia variedad de soluciones de un mismo problema

Otra propiedad que puede ser de especial utilidad para los alumnos se descubre cuando el programa muestra los pasos intermedios más importantes de la síntesis del filtro, de manera que éstos pueden valerse del programa para ir comprobando la bondad de sus cálculos a medida que avanza en la resolución del ejercicio.

2. Uso del entrenador NI Elvis II+

El entrenador NI Elvis II+ es el dispositivo escogido por el director del proyecto para realizar las sesiones prácticas en el laboratorio. Tiene como ventajas su uso sencillo, su amplia disponibilidad para todo el alumnado y una buena versatilidad para experimentos sencillos. Está diseñado para funcionar conectado a un ordenador, con un software específico instalado, el cual cumple las funciones propias de un osciloscopio, mostrando a través de gráficas las mediciones realizadas sobre el circuito. Las directrices que a continuación se explican están redactadas en un documento aclaratorio para los alumnos de la práctica, e incluidas en un anexo.

Antes de intentar realizar las conexiones, hay que comprobar que dispositivo y ordenador se conectan correctamente. Cuando el piloto llamado Prototype Board Power está encendido, y el terminal USB conectado (USB-READY encendido), se procede a inicializar el software a través de los siguientes pasos:

Start>All Program Files>>National Instruments>>NI ELVISmx>>NI ELVISmx Instrument Launcher

El proceso de implementación del circuito consiste en el montaje de los componentes sobre la placa ProtoBoard, la realización de las conexiones con la masa (GROUND), y con la señal que permitirá hacer el barrido en frecuencia (FGEN). Cuando todo está adecuadamente montado, se ejecuta la utilidad Bode perteneciente al software NI Elvismx Instrument Launcher. Una vez ejecutado, se abre un panel con distintos parámetros de diseño, y cuyo apartado más importante es Measurement settings. Para escoger la vía por la que se recogen los datos se seleccionan los canales Channel A0 y Channel A1 como de estímulo y de respuesta, respectivamente, en lugar de los predefinidos SCOPE 0 y SCOPE 1. Nótese que hay que conectarlos previamente en el circuito montado en la entrada y la salida del circuito, y se pueden encontrar en la zona de conexiones a la izquierda de la placa ProtoBoard.

Por último, se fijan las condiciones del experimento. Conviene hacer un barrido lo más extenso posible, razón por la que fijamos la frecuencia de inicio en su mínimo, 10 Hz, y la frecuencia de parada en su máximo, esto es, 200 kHz. El uso de diez puntos de medición por década es suficiente para una buena resolución, y una amplitud de señal de 2V asegura un buen funcionamiento en filtros pasivos.

Todos los detalles relativos al funcionamiento del entrenador están incluidos en el manual de instrucciones adjuntado en forma de anexo.

Campos de mejora y futuras ampliaciones

Existen una serie de problemas asociados, en primer lugar al uso del entrenador, y en segundo lugar a la naturaleza propia de estos experimentos.

Entre las dificultades asociadas al entrenador se cuenta lo limitado de las frecuencias de barrido (un osciloscopio o un espectrómetro convencionales pueden ofrecer, al menos, dos décadas más), lo que impulsa a sintetizar filtros con frecuencias de corte y atenuadas relativamente bajas, en las que los desniveles de la banda de transición sean fácilmente apreciables. El entrenador deja de mostrar mediciones fiables cuando los filtros se basan en resistencias de 10 k o superiores, ya que la potencia suministrada por el dispositivo es muy baja.

Los problemas asociados a estos experimentos en general se basan principalmente en la imperfección de los componentes y sus elevadas tolerancias. A partir de resistencias de 100 k el ruido térmico contamina las medidas, los condensadores (no polarizados) son de baja calidad cuando empiezan a exceder el valor de 1 μF . También es un inconveniente que a partir de este valor, el salto de un valor de condensador al siguiente normalizado puede ser de hasta el ciento por ciento. Además, el acceso a las bobinas es muy complicado y en muchas ocasiones implica su fabricación de forma casera, y su comportamiento tiende a inestabilizar los circuitos, a menos que los cambios de corriente en la señal sean mínimos. Si además se considera que la tolerancia normalizada de una resistencia es de un 5%, y de un condensador un 20%, la realización de filtros de órdenes mayores que tres conservando las

características de diseño resulta casi imposible, debido a los efectos de esta imprecisión acumulada.

Los aspectos en los que el programa puede mejorar deben basarse en una tendencia a la estabilidad de los circuitos, a la posibilidad de ser implementados en un montaje real y en su valor didáctico. Se puede plantear, por ejemplo, la sustitución de las bobinas por topologías alternativas a base de circuitos activos, es decir, haciendo uso de amplificadores operacionales (ya sea por sustitución directa, mediante CGI de Antoniou o por transformaciones topológicas –Bruton, Gorski-Popiel, Leapfrog). El programa calcularía los componentes normalizados que serían necesarios en estos casos. Otra posibilidad de mejora consiste en que, al lado de cada filtro, el cual está basado en una resistencia concreta, se muestre el error cuadrático medio que existe entre los valores teóricos calculados y los componentes normalizados, de manera que el que presente un menor error es el que más probabilidades tiene de cumplir con precisión las exigencias de diseño.

6. Anexos

1. Ecuaciones de cálculo y tablas.

Las ecuaciones en que se basan las operaciones realizadas en las hojas de cálculo son las siguientes:

Butterworth:

$$N = \frac{\log_{10} \left[\left(1 / \delta_2 \right)^2 - 1 \right]}{2 \cdot \log_{10} \left(\Omega_s / \Omega_c \right)}$$

Chebyshev I y II:

$$N = \frac{\log_{10} \left[\frac{\sqrt{1 - \delta_2^2} + \sqrt{1 - \delta_2^2} \cdot (1 + \varepsilon^2)}{\varepsilon \cdot \delta_2^2} \right]}{\log_{10} \left[\frac{\Omega_s}{\Omega_c} + \sqrt{\left(\Omega_s / \Omega_c \right)^2 - 1} \right]}$$

Cauer:

$$N = \frac{K(\Omega_c / \Omega_s) \cdot K\left(\sqrt{1 - \delta_2^2} (1 + \varepsilon^2) / \sqrt{1 - \delta_2^2}\right)}{K\left(\varepsilon \cdot \delta_2 / \sqrt{1 - \delta_2^2}\right) \cdot K\left(\sqrt{1 - (\Omega_c / \Omega_s)^2}\right)}$$

$$K(x) = \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - x^2 \cdot \sin^2 \theta}}$$

Butterworth, r=1

N	c1	l2	c3	l4	c5	l6	c7	l8	c9	l10
1	1									
2	1,4142	0,7071								
3	1,5	1,3333	0,5							
4	1,5307	1,5772	1,0824	0,3827						
5	1,5451	1,6944	1,382	0,8944	0,309					
6	1,5529	1,7593	1,5529	1,2016	0,7579	0,2588				
7	1,5576	1,7988	1,6588	1,3972	1,055	0,656	0,2225			
8	1,5607	1,8246	1,7287	1,5283	1,2588	0,937	0,5776	0,1951		
9	1,5628	1,8424	1,7772	1,6202	1,4037	1,1408	0,8414	0,5155	0,1736	
10	1,5643	1,8552	1,8121	1,6869	1,51	1,2921	1,0406	0,7626	0,4654	0,1564
	l1	c2	l3	c4	l5	c6	l7	c8	l9	c10

Butterworth, r=0,5

N	c1	l2	c3	l4	c5	l6	c7	l8	c9	l10
1	3									
2	0,4483	3,3461								
3	1,1811	0,7789	3,2612							
4	0,2175	2,4524	0,8826	3,1868						
5	0,6857	0,4955	3,051	0,9237	3,1331					
6	0,1412	1,6531	0,6542	3,3687	0,9423	3,0938				
7	0,4799	0,3536	2,2726	0,7512	3,5532	0,9513	3,064			
8	0,1042	1,2341	0,5003	2,6863	0,8139	3,6678	0,9558	3,0408		
9	0,3685	0,2735	1,7846	0,6046	2,9734	0,8565	3,7426	0,9579	3,0223	
10	0,0825	0,9818	0,4021	2,1943	0,6808	3,1795	0,8864	3,7934	0,9588	3,0072
	l1	c2	l3	c4	l5	c6	l7	c8	l9	c10

Butterworth, r=0

N	c1	l2	c3	l4	c5	l6	c7	l8	c9	l10
1	2									
2	1,4142	1,4142								
3	1	2	1							
4	0,7654	1,8478	1,8478	0,7654						
5	0,618	1,618	2	1,618	0,618					
6	0,5176	1,4142	1,9319	1,9319	1,4142	0,5176				
7	0,445	1,247	1,8019	2	1,8019	1,247	0,445			
8	0,3902	1,1111	1,6629	1,9616	1,9616	1,6629	1,1111	0,3902		
9	0,3473	1	1,5321	1,8794	2	1,8794	1,5321	1	0,3473	
10	0,3129	0,908	1,4142	1,782	1,9754	1,9754	1,782	1,4142	0,908	0,3129
	l1	c2	l3	c4	l5	c6	l7	c8	l9	c10

Chebyshev I, Amax=0,1

N	<i>c1</i>	<i>l2</i>	<i>c3</i>	<i>l4</i>	<i>c5</i>	<i>l6</i>	<i>c7</i>	<i>l8</i>	<i>c9</i>
1	0,3052								
2									
3	1,0316	1,1474	1,0316						
4									
5	1,1468	1,3712	1,975	1,3712	1,1468				
6									
7	1,1812	1,4228	2,0967	1,5734	2,0967	1,4228	1,1812		
8									
9	1,1957	1,4426	2,1346	1,6467	2,2054	1,6167	2,1346	1,4426	1,1957
	<i>l1</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>c4</i>	<i>l5</i>	<i>c6</i>	<i>l7</i>	<i>c8</i>	<i>l9</i>

Chebyshev I, Amax=0,5

N	<i>c1</i>	<i>l2</i>	<i>c3</i>	<i>l4</i>	<i>c5</i>	<i>l6</i>	<i>c7</i>	<i>l8</i>	<i>c9</i>
1	0,6986								
2									
3	1,5963	1,0967	1,5963						
4									
5	1,7058	1,2296	2,5408	1,2296	1,7058				
6									
7	1,7373	1,2582	2,6383	13.443	2,6383	1,2582	1,7373		
8									
9	1,7504	1,269	2,6678	1,3673	2,7239	1,3673	2,6678	1,269	1,7504
	<i>l1</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>c4</i>	<i>l5</i>	<i>c6</i>	<i>l7</i>	<i>c8</i>	<i>l9</i>

Cauer, N=3, Amax =0,01

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>c1=c3</i>	<i>c2</i>	<i>l2</i>
16	3,62795528	31,1	0,596795	0,0664	0,899061
15	3,86370331	32,8	0,601968	0,055764	0,908699
14	4,13356549	34,7	0,606811	0,048188	0,917724
13	4,44541148	36,6	0,611324	0,041244	0,926135
12	4,80973435	38,7	0,615506	0,034905	0,933928
11	5,24084306	41	0,619356	0,029149	0,941101
10	5,75877048	43,5	0,622872	0,023956	0,947655
9	6,39245322	46,3	0,626055	0,019307	0,953587
8	7,18529654	49,3	0,628904	0,015187	0,958896
7	8,20330905	52,8	0,631419	0,011582	0,963582
6	9,56677223	56,8	0,633598	0,00848	0,967644
5	11,4737	61,61	0,6354	0,0059	0,9711
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1=l3</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>

Cauer, N=3, Amax=0,1

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>c1=c3</i>	<i>c2</i>	<i>l2</i>
24	2,45859334	30	0,941281	0,125322	1,012052
23	2,55930467	31,1	0,948378	0,114209	1,02301
22	2,66946716	32,3	0,955179	0,103732	1,033512
21	2,79042811	33,6	0,961683	0,093865	1,043557
20	2,9238044	34,9	0,967891	0,084586	1,053144
19	3,07155349	36,2	0,9738	0,075873	1,06227
18	3,23606798	37,7	0,979409	0,067701	1,070934
17	3,42030362	39,2	0,984718	0,060067	1,079135
16	3,62795528	40,8	0,989727	0,052941	1,086872
15	3,86370331	42,5	0,994434	0,046313	1,094145
14	4,13356549	44,3	0,99884	0,040169	1,100951
13	4,44541148	46,2	1,002943	0,034496	1,107291
12	4,80973435	48,3	1,006745	0,029285	1,113164
11	5,24084306	50,6	1,010243	0,024524	1,118568
10	5,75877048	53,1	1,013438	0,020206	1,123505
9	6,39245322	55,9	1,016329	0,016322	1,127972
8	7,18529654	59	1,018917	0,012865	1,13197
7	8,20330905	62,5	1,021201	0,009828	1,153499
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1=l3</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>

Cauer, N=3, Amax=1,25

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>c1=c3</i>	<i>c2</i>	<i>l2</i>
36	1,70130162	30,5	1,946	0,354882	0,767221
35	1,7434468	31,3	1,960164	0,332738	0,77708
34	1,78839165	32,1	1,97394	0,311579	0,786671
33	1,83607846	32,9	1,98394	0,291361	0,795994
32	1,88707992	33,8	2,000325	0,272045	0,805047
31	1,94160403	34,7	2,012932	0,253595	0,81383
30	2	35,6	2,025148	0,235977	0,822341
29	2,13005447	37,4	2,048401	0,203117	0,838548
28	2,20268927	38,4	2,059438	0,18782	0,846241
27	2,20626653	36,5	2,036971	0,219161	0,830581
26	2,28117203	39,4	2,07008	0,173245	0,85366
25	2,36620158	40,5	2,080327	0,159371	0,860804
24	2,45859334	41,6	2,090179	0,146475	0,867673
23	2,55930467	42,7	2,099633	0,13364	0,874265
22	2,66946716	43,9	2,10869	0,121747	0,880581
21	2,79042811	45,2	2,11735	0,11048	0,88662
20	2,9238044	46,5	2,125611	0,099824	0,892381
19	3,07155349	47,8	2,133472	0,089766	0,897864
18	3,23606798	49,3	2,140934	0,080291	0,903068
17	3,42030362	50,8	2,147995	0,071389	0,907994
16	3,62795528	52,4	2,154657	0,063049	0,91264
15	3,86370331	54,1	2,160917	0,055259	0,917006
14	4,13356549	55,9	2,166675	0,048012	0,921092
13	4,44541148	57,8	2,172232	0,041299	0,921898
12	4,80973435	60	2,177285	0,035112	0,928423
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1=l3</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>

Cauer, N=4, Amax=0,01

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>l2</i>	<i>c3</i>	<i>l4</i>
31	2,07920174	30,6	0,566984	0,20486	0,955778	1,232039	0,67191
30	2,14318934	31,8	0,577174	0,189382	0,971743	1,238292	0,670821
29	2,21179218	33	0,586991	0,174802	0,987188	1,244374	0,669761
28	2,28550236	34,3	0,596441	0,161064	1,002112	1,25028	0,668731
27	2,36488496	35,6	0,605526	0,147118	1,016513	1,256007	0,667732
26	2,45059212	37	0,614251	0,135919	1,03039	1,261551	0,666765
25	2,54338044	38,4	0,62262	0,124426	1,043742	1,266908	0,665831
24	2,64413274	39,8	0,630635	0,113602	1,056569	1,272075	0,664931
23	2,75388547	41,3	0,638301	0,103413	1,068871	1,277049	0,664066
22	2,87386367	42,9	0,645621	0,093829	1,080646	1,281828	0,663236
21	3,00552584	44,6	0,652596	0,084823	1,091896	1,286408	0,662441
20	3,15062227	46,3	0,65923	0,076369	1,102619	1,290788	0,661683
19	3,31127192	48,1	0,665526	0,068445	1,112817	1,294965	0,660961
18	3,49006471	50,1	0,671486	0,061031	1,12249	1,298938	0,660275
17	3,69020013	52,1	0,677112	0,054107	1,131637	1,302705	0,659627
16	3,91567766	54,2	0,682406	0,047656	1,140258	1,306265	0,659015
15	4,17156348	56,5	0,68737	0,041664	1,148356	1,309615	0,65844
14	4,46437139	58,9	0,692006	0,036116	1,155928	1,312754	0,657903
13	4,80261962	61,5	0,696316	0,031	1,162977	1,315682	0,657402
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>c4</i>

Cauer, N=4, Amax=0,1

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>c4</i>
40	1,65420443	30,7	0,861933	0,323701	0,969509	1,580359	0,835663
39	1,69108256	31,7	0,87425	0,303977	0,986112	1,589324	0,83479
38	1,73007601	32,6	0,886224	0,285241	1,002301	1,598094	0,833934
37	1,77135362	33,6	0,897857	0,267432	1,018074	1,606664	0,833094
36	1,81510309	34,7	0,909154	0,250498	1,033431	1,615033	0,832273
35	1,86153367	35,7	0,920117	0,234388	1,04837	1,623196	0,83147
34	1,91087937	36,8	0,930747	0,219058	1,062891	1,631152	0,830686
33	1,96340266	37,9	0,941049	0,204469	1,076994	1,638898	0,829923
32	2,01939891	39	0,951023	0,190582	1,090677	1,646432	0,829181
31	2,07920174	40,2	0,960673	0,177365	1,10394	1,653751	0,82846
30	2,14318934	41,4	0,969999	0,164786	1,116783	1,660854	0,827761
29	2,21179218	42,6	0,979005	0,153817	1,129206	1,667739	0,827083
28	2,28550236	43,9	0,987692	0,141433	1,141208	1,674403	0,826428
27	2,36488496	45,2	0,996062	0,130608	1,152789	1,680847	0,825796
26	2,45059212	46,6	1,004115	0,120323	1,163949	1,687067	0,825186
25	2,54338044	48	1,011854	0,110556	1,174687	1,693062	0,824599
24	2,64413274	49,5	1,01928	0,101289	1,185005	1,698832	0,824034
23	2,75388547	51	1,026395	0,092506	1,194901	1,704375	0,823493
22	2,87386367	52,6	1,033199	0,08419	1,204376	1,709689	0,822975
21	3,00552584	54,2	1,039693	0,076327	1,21343	1,714774	0,82248
20	3,15062227	56	1,045879	0,68905	1,222062	1,719629	0,822009
19	3,31127192	57,8	1,051758	0,061911	1,230273	1,724252	0,82156
18	3,49006471	59,7	1,05733	0,055333	1,238063	1,728643	0,821135
17	3,69020013	61,7	1,062597	0,049163	1,245431	1,732802	0,820733
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>c4</i>

Cauer, N=4, Amax=1,25

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>l2</i>	<i>c3</i>	<i>l4</i>
54	1,295444	30,4	1,69332	0,837139	0,629901	2,517966	0,773871
53	1,31381409	31,2	1,715444	0,794274	0,643877	2,536499	0,773437
52	1,33305505	32	1,737075	0,754274	0,657593	2,55472	0,773005
51	1,35321463	32,8	1,758246	0,714965	0,671049	2,572626	0,772575
50	1,37434455	33,6	1,778963	0,678213	0,684245	2,590215	0,772148
49	1,3965009	34,4	1,799232	0,64322	0,69718	2,607485	0,771726
48	1,41974456	35,2	1,819055	0,609867	0,709855	2,624433	0,771308
47	1,44414177	36	1,838437	0,57805	0,722269	2,641059	0,770896
46	1,46976462	36,9	1,857382	0,547674	0,734424	2,657358	0,77049
45	1,49669176	37,8	1,875893	0,518652	0,746318	2,673331	0,77009
44	1,52500912	38,6	1,893972	0,490907	0,757951	2,688976	0,769698
43	1,55481073	39,5	1,911623	0,464368	0,769325	2,704289	0,769312
42	1,58619971	40,4	1,928847	0,43897	0,780438	2,719271	0,768935
41	1,61928936	41,4	1,945648	0,414655	0,791291	2,733919	0,768565
40	1,65420443	42,3	1,962028	0,391367	0,801883	2,748232	0,768203
39	1,69108256	43,3	1,977988	0,369059	0,812216	2,762208	0,76785
38	1,73007601	44,3	1,99353	0,347685	0,822288	2,775847	0,767505
37	1,77135362	45,3	2,008656	0,327204	0,832099	2,789147	0,767168
36	1,81510309	46,3	2,023367	0,357077	0,84165	2,802106	0,766841
35	1,86153367	47,3	2,037665	0,288769	0,850941	2,814723	0,766522
34	1,91087937	48,4	2,051551	0,270784	0,855971	2,826998	0,766212
33	1,96340266	49,5	2,065027	0,253484	0,868741	2,838928	0,765911
32	2,01939891	50,6	2,078092	0,236949	0,87725	2,850514	0,765619
31	2,07920174	51,8	2,090749	0,221119	0,885498	2,861754	0,765336
30	2,14318934	53	2,102998	0,205969	0,893486	2,872646	0,765062
29	2,21179218	54,2	2,11484	0,191478	0,901213	2,883191	0,764798
28	2,28550236	55,5	2,126275	0,177625	0,908678	2,893387	0,764542
27	2,36488496	56,8	2,137305	0,164392	0,915883	2,903232	0,764296
26	2,45059212	58,2	2,147931	0,151762	0,922827	2,912727	0,764059
25	2,54338044	59,6	2,158151	0,139717	0,925951	2,921871	0,763731
24	2,64413274	61,1	2,167968	0,128245	0,935931	2,930662	0,763612
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>c4</i>

Cauer, N=5, Amax=0,01

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>l2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>l4</i>	<i>c5</i>
45	1,41423562	30,2	0,626527	0,192033	1,109963	1,270671	0,653531	0,712524	0,349426
44	1,43955654	31,3	0,633249	0,181945	1,119798	1,282206	0,608592	0,737498	0,369323
43	1,46627919	32,4	0,639758	0,172281	1,129271	1,29376	0,528391	0,762069	0,388575
42	1,49447655	33,5	0,646059	0,163019	1,1384	1,305302	0,492491	0,78622	0,407206
41	1,52425309	34,7	0,652159	0,154136	1,147201	1,316807	0,459037	0,809932	0,425236
40	1,55572383	35,9	0,658062	0,145616	1,15569	1,328248	0,427803	0,833191	0,442685
39	1,58901573	37,1	0,663773	0,137439	1,163879	1,339602	0,398593	0,855982	0,459572
38	1,62426925	38,3	0,669298	0,129591	1,171781	1,350085	0,371233	0,878293	0,475911
37	1,66164014	39,5	0,67464	0,122058	1,179407	1,361967	0,34557	0,900113	0,491718
36	1,70130162	40,8	0,679803	0,114828	1,186766	1,372941	0,321469	0,92143	0,507006
35	1,7434468	42,1	0,684792	0,107887	1,193867	1,383751	0,298812	0,942236	0,521788
34	1,78829165	43,5	0,689609	0,101227	1,200717	1,394387	0,27749	0,962522	0,536073
33	1,83607846	44,8	0,694258	0,094837	1,207325	1,40483	0,25741	0,98228	0,549872
32	1,88707992	46,3	0,698743	0,088708	1,213695	1,415068	0,238486	1,001503	0,563195
31	1,94160403	47,7	0,703065	0,082831	1,219834	1,425089	0,220643	1,020184	0,576049
30	2	49,2	0,707229	0,0772	1,225747	1,434881	0,203813	1,038317	0,588442
29	2,06266534	50,8	0,711235	0,071807	1,231439	1,444434	0,187934	1,055897	0,600382
28	2,13005447	52,4	0,715088	0,066645	1,236912	1,453739	0,172951	1,072918	0,611874
27	2,20268927	54	0,718788	0,061709	1,242173	1,462785	0,158815	1,089375	0,622925
26	2,28117203	55,7	0,722339	0,056993	1,247222	1,471565	0,145481	1,105265	0,633539
25	2,36620158	57,5	0,725741	0,052491	1,252064	1,480069	0,145481	1,120583	0,643723
24	2,45859334	59,3	0,728998	0,048199	1,256702	1,488292	0,132908	1,135326	0,653479
23	2,55930467	61,2	0,73211	0,044113	1,261137	1,496225	0,12106	1,14949	0,662813
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>l4</i>	<i>c4</i>	<i>l5</i>

Cauer, N=5, Amax=0,1

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>l2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>l4</i>	<i>c5</i>
54	1,23606798	30,6	0,93445	0,281006	1,095745	1,423968	0,933516	0,661236	0,582296
53	1,25213566	31,6	0,943266	0,267686	1,107503	1,441776	0,876116	0,685564	0,603992
52	1,26901822	32,6	0,951806	0,254947	1,118856	1,459472	0,822851	0,709602	0,62514
51	1,28675957	33,5	0,96008	0,242753	1,129824	1,477038	0,773294	0,733335	0,645759
50	1,30540729	34,6	0,968098	0,231069	1,140427	1,494452	0,727075	0,756748	0,665864
49	1,32501299	35,6	0,975868	0,219865	1,150681	1,511699	0,683873	0,779829	0,685469
48	1,34563273	36,6	0,983399	0,209114	1,160602	1,528761	0,643405	0,802565	0,704588
47	1,36732746	37,7	0,990698	0,198792	1,170202	1,545623	0,605428	0,824946	0,723231
46	1,39016359	38,7	0,997773	0,188874	1,179495	1,562272	0,569723	0,84696	0,741409
45	1,41423562	39,8	1,00463	0,179344	1,188493	1,578695	0,5361	0,868599	0,759131
44	1,43955654	40,9	1,011276	0,170181	1,197206	1,594879	0,504392	0,889855	0,776406
43	1,46627919	42	1,017716	0,161368	1,205643	1,610814	0,47448	0,910717	0,793241
42	1,49447655	43,1	1,023956	0,15289	1,213814	1,626489	0,446134	0,93118	0,809642
41	1,52425309	44,3	1,030001	0,144734	1,221727	1,641894	0,419333	0,951235	0,825617
40	1,55572383	45,5	1,035855	0,136886	1,229388	1,65702	0,393938	0,970877	0,84117
39	1,58901573	46,7	1,041524	0,129335	1,236805	1,671859	0,369854	0,990098	0,856307
38	1,62426925	47,9	1,04701	0,122069	1,243985	1,686403	0,346995	1,008894	0,871032
37	1,66164014	49,2	1,052319	0,115079	1,250932	1,700643	0,325285	1,027258	0,885349
36	1,70130162	50,4	1,057453	0,108355	1,257651	1,714573	0,304653	1,045184	0,899261
35	1,7434468	51,8	1,062416	0,101889	1,264149	1,728187	0,285037	1,062669	0,912772
34	1,78829165	53,1	1,067212	0,095672	1,270429	1,741476	0,26638	1,079708	0,925886
33	1,83607846	54,4	1,071843	0,089698	1,276495	1,754437	0,248643	1,096295	0,938603
32	1,88707992	55,9	1,076312	0,083958	1,282351	1,767062	0,231743	1,112428	0,950928
31	1,94160403	57,4	1,080621	0,078447	1,288001	1,779347	0,215672	1,128101	0,962862
30	2	58,8	1,084774	0,073159	1,293448	1,791286	0,200381	1,14331	0,974406
29	2,06266534	60,4	1,088772	0,068088	1,298695	1,802875	0,185834	1,158054	0,985563
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>l4</i>	<i>c4</i>	<i>l5</i>

Cauer, N=5, Amax=1,25

theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>l2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>l4</i>	<i>c5</i>
67	1,08636038	30,1	1,825838	0,668577	0,717923	1,858209	2,294944	0,355767	1,199065
66	1,09463628	31	1,844671	0,636958	0,730142	1,895864	2,146891	0,373913	1,23296
65	1,10337792	31,9	1,862807	0,607185	0,741881	1,933092	2,012323	0,391936	1,266168
64	1,11260194	32,8	1,880291	0,579078	0,753181	1,969883	1,889437	0,409824	1,298717
63	1,12232624	33,7	1,89716	0,552481	0,764061	2,00623	1,776741	0,427566	1,330634
62	1,13257005	34,7	1,913449	0,52726	0,774552	2,042127	1,672984	0,445151	1,361938
61	1,14335407	35,6	1,929188	0,503299	0,784675	2,077567	1,57711	0,46257	1,39265
60	1,15470054	36,5	1,944408	0,480496	0,794452	2,112544	1,488228	0,479814	1,422786
59	1,1666334	37,4	1,959132	0,45876	0,803901	2,147052	1,405574	0,496876	1,45236
58	1,1791784	38,4	1,973385	0,438013	0,813041	2,181085	1,328495	0,513749	1,481385
57	1,19236329	39,3	1,987187	0,418185	0,821885	2,214638	1,256427	0,530425	1,509871
56	1,20621795	40,3	2,00056	0,399214	0,830449	2,247705	1,188883	0,546898	1,537829
55	1,22077459	41,2	2,013519	0,381044	0,838745	2,280281	1,125436	0,563161	1,565267
54	1,23606798	42,2	2,026083	0,363624	0,846784	2,312361	1,065717	0,579211	1,592191
53	1,25213566	43,2	2,038265	0,346911	0,854578	2,343941	1,0094	0,59504	1,618609
52	1,26901822	44,2	2,050081	0,330863	0,862135	2,375014	0,956197	0,610644	1,644525
51	1,28675957	45,2	2,061543	0,315444	0,869466	2,405578	0,905857	0,626019	1,669944
50	1,30540729	46,2	2,072663	0,300621	0,876577	2,435626	0,858154	0,641159	1,694869
49	1,32501299	47,2	2,083452	0,286363	0,883477	2,465155	0,812888	0,65606	1,719305
48	1,34563273	48,2	2,09392	0,272642	0,890172	2,49416	0,769882	0,670719	1,743254
47	1,36732746	49,3	2,104078	0,259434	0,89667	2,522637	0,728977	0,685131	1,766718
46	1,39016359	50,3	2,113933	0,246715	0,902975	2,550581	0,69003	0,699292	1,789699
45	1,41423562	51,4	2,123495	0,234464	0,909093	2,577989	0,652913	0,713199	1,812198
44	1,43955654	52,5	2,13277	0,222661	0,91503	2,604857	0,61751	0,726848	1,834217
43	1,46627919	53,6	2,141766	0,211288	0,92079	2,631179	0,583717	0,740235	1,855756
42	1,49447655	54,8	2,150491	0,200329	0,926373	2,656954	0,551439	0,753358	1,876815
41	1,52425309	55,9	2,158949	0,189769	0,931795	2,682176	0,520592	0,766213	1,897396
40	1,55572383	57,1	2,167147	0,179592	0,937048	2,706841	0,491097	0,778798	1,917498
39	1,58901573	58,3	2,17509	0,169786	0,94214	2,730948	0,462885	0,791108	1,937121
38	1,62426925	59,5	2,182785	0,160339	0,947074	2,75449	0,43589	0,803142	1,956265
37	1,66164014	60,8	2,190234	0,151238	0,951852	2,777466	0,410053	0,814897	1,974929
theta	<i>ratio</i>	<i>amin</i>	<i>l1</i>	<i>l2</i>	<i>c2</i>	<i>l3</i>	<i>l4</i>	<i>c4</i>	<i>l5</i>

Conversiones de frecuencia:

P. Baja → P. Baja	$s \rightarrow \frac{\Omega_c}{\Omega'_c} \cdot s$	Ω_c' nueva frecuencia de corte
P. Baja → P. Alta	$s \rightarrow \frac{\Omega_c \cdot \Omega'_c}{s}$	Ω_c' nueva frecuencia de corte
P. Baja → P. Banda [$\Omega_1, \Omega_l, \Omega_u, \Omega_2$]	$s \rightarrow \Omega_c \cdot \frac{s^2 + \Omega_l \cdot \Omega_u}{s \cdot (\Omega_u - \Omega_l)}$	Ω_l frecuencia inferior de la banda Ω_u frecuencia superior de la banda
P. Baja → Elimina Banda [$\Omega_l, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_u$]	$s \rightarrow \Omega_c \cdot \frac{s \cdot (\Omega_u - \Omega_l)}{s^2 + \Omega_l \cdot \Omega_u}$	Ω_l frecuencia inferior de la banda Ω_u frecuencia superior de la banda

2. Guía de instrucciones orientadas al alumnado

ANALOG FILTERS Lab Instructions for NI Elvis II+

The process of solving your lab exercises will count with three separate stages: your previous design solution of the problem suggested, the approximation of your solution with standard components by using an excel sheet, and the correct placement of those components in the board NI ELVIS II⁺. By following this tour you will start dealing with the theoretic aspects of the design, evolving towards a real, practical experience with electronic design.

As the first part is nothing but your own calculations of the problem, you should bring them solved to the practical lesson. From this starting point, you must open the file *Analog filters lab session designer for Elvis II+*, and next introduce the filter requirements in the adequate cells.

Specifications																					
Filter	High Pass Band Pass	Design Path	Kind	Amin		Amax	LP equivalent														
Approximation	Butterworth Chebyshev I	Order Frequencies	n T	ω_{s1} ω_{c1}		ω_{s2} ω_{c2}	Ω_i^2	Ω_c	Ω_s												
Order		Ratio		Maximum value of ω_{s2}		Minimum value of ω_{s2}	0	0	0												
Std R Values (Ohm)	freq'			r																	
Ladder components (standard)																					
Order of magnitude	c1	l1	c2	l2	c3	l3	c4	l4	c5	l5	c6	l6	c7	l7	c8	l8	c9	l9	c10	l10	
10																					
11																					
12																					

The use of this sheet is very intuitive, so no major problems will come on the way. Depending on the kind of filter to be designed, all unnecessary cells will disappear, so you focus only on the ones you need. Note that, as this sheet has been programmed to work along with the tables and formulas given for the course, also the same restrictions will apply; namely, all Cauer filters must be of orders from 3 to 5 for the equivalent Lowpass filter, which means that for Bandpass and Bandstop filters only 6, 8 and 10 orders will work.

Besides that, you can decide whether designing the filter with a fixed order value or with a fixed set of frequencies. In the first option, select *Order* in the *Design Path* cell, so for the last frequency value to be filled you will see displayed the range of values which meet the requirements. In the second option, select *Frequencies* in the *Design Path* cell, so after introducing all the values in the right cells, the order will automatically be computed.

After all the parameters are set, the values of the capacitors and inductors will show up, depending on the load resistance. You should select the closest standard resistance to your design resistance. You can also change the order of magnitude of the resistances. If any of the part values is displayed in red, it means that you have reached the maximum standard value for it, so maybe a filter made of it is distorted.

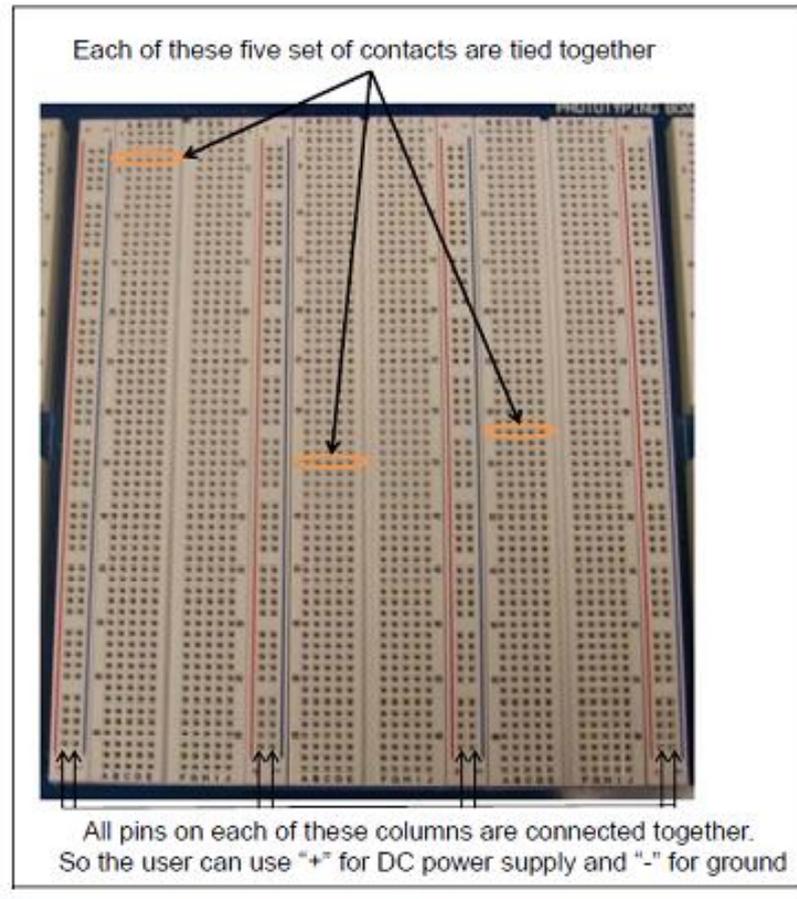
This excel sheet will also be useful to check your own results. Note that nearly a 10% change in the value parts can be expected, and even more when the capacitors start having large values.

The next step in the design is the actual implementation on the NI Elvis II⁺ board. Take the components computed in Excel, including the resistances. Before even turning the board on, you should have a clear idea of the shape of the network you have to place.

Plug the USB connector to the computer and switch the board on, by pressing the switch placed at the right back side of the board. After that, press the switch placed in the upper right corner, in the top side of the board. The Prototyping Board Power LED should be on. Once the USB-READY light is on, you can open

Start>All Program Files>>National Instruments>>NI ELVISmx>>NI ELVISmx Instrument Launcher

Place the parts in the circuit in the right way, knowing beforehand which holes in the board are interconnected:



Once you have mounted the circuit, look for FGEN and GROUND in the left hand side of the board. These points will feed the circuit, as supply voltage and ground, respectively. Reference your circuit to them. Then open the feature *Bode* in the *NI ELVISmx Instrument Launcher* in the desktop of your computer. A new window with many options will appear. In the Measurement Settings section, which is the most important, you can edit the condition for your Bode analysis.

Start by changing the Stimulus and Response channels, which are set SCOPE 0 and SCOPE1 default. Choose for the Stimulus Channel A0, and for the Response Channel A1. As these are the points you are going to measure with (the reference and the signal, respectively), you must connect them also to the circuit. The Stimulus Channel, taken with A10 + and A10- (upper, left hand side of the board), must be directly connected to FGEN and GROUND, respectively. The Response Channel, taken with A11+ and A11-, must be connected to the output of the circuit (thus it takes the voltage in the load resistor) and to GROUND, respectively.

Once everything is properly connected, it is time to change the settings. Make the measurement range as wide as possible, for this reason, set the start frequency to 10 Hz and the stop frequency to 200 kHz. Choose as many steps per decade as you want, but 10 is a good number. The peak amplitude is recommended to be more than

2.00 for passive circuits. Once you have set these values click on run and check that the circuit works properly.

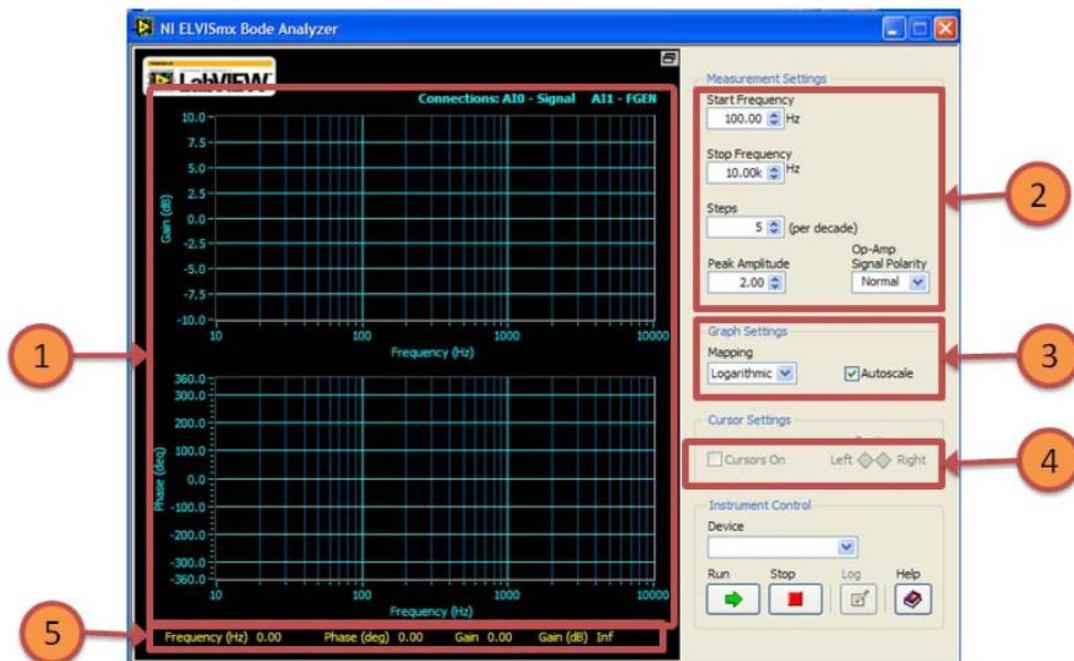
Some tips to finish: In the design phase, you will have the option to scale the circuit, resistor based. For a good performance of the board, try to make the impedances as small as possible. Filters based on 100k resistors start showing strange behaviours that have nothing to do with the theory, and 1M based resistors take useless outputs.

3. Instrucciones para el uso del software NI Elvis II+

Bode (Bode Analyzer)

A bode analyzer describes the frequency response of a circuit-under-test (e.g. a low pass RC filter) by displaying the Gain (in dB) and Phase (degrees) of the circuit-under-test as a function of frequency. The NI ELVISmx Bode analyzer uses the Function generator to output a stimulus and then uses two input channels to measure the circuit response and stimulus and computes the Gain (in dB) and Phase (degrees) of the system under test based on the measured signals. The FGEN signal row (see Section D) and a

GROUND signal row is connected to the AI $1\pm$ signal rows. The signal output and a GROUND signal row is connected to AI $0\pm$ signal rows. Shown below is the Bode SFP in Figure 9, as well as an explanation of the important controls.



1. Gain Display: displays the Bode gain (in dB) and Bode phase (in degrees) graphs for the circuit under test. These signals are plotted against frequency measured in Hz. Also displayed, if enabled, are measurement cursors that can be moved horizontally by clicking any cursor and dragging it along the frequency axis.

2. Measurement Settings: As previously stated a bode plot is the representation of the response of a circuit at different frequencies in terms of gain and phase. For this reason, a frequency sweep must be performed. The NI ELVISmx Bode analyzer sweeps the frequency in a logarithmic fashion as opposed to linear fashion (i.e. the logarithm of the frequency is swept linearly instead of the actual frequency). These controls allow the user to specify the sweep parameters in terms of:

- *Start Frequency* which specifies the starting frequency for the frequency sweep; *Stop Frequency* which specifies the frequency at which the frequency sweep stops;
- *Step (per decade)* which specifies the number of evenly spaced points to sweep per decade (A decade in the logarithmic sense represents multiplication by 10 from the previous value);
- *Peak Amplitude* which specifies the peak amplitude of the stimulus (the FGEN output signal). It is recommended that a high amplitude signal be used to drive passive circuits for improved accuracy and a relatively smaller signal be used to drive circuits with high gain to avoid saturating the circuit;
- *Op-amp Signal polarity* which can be *Normal* or *Inverted*, and allows Select *Inverted* to invert the measured values of the stimulus signal during Bode analysis. This choice affects only the phase plot and is used to zero the phase shift for an inverting circuit.

3. Graph Settings: This set of controls allows the user to select between a linear and logarithmic scale for the Gain graph. The default is logarithmic.

4. Cursor Settings: These set of controls give the user the choice of enabling measurement cursors on the Gain and Phase plots and precise control of the cursors via the *Left* and *Right* buttons (see part 5)

5. Measurement display: displays the gain (linear and in dB), phase and frequency of the current measurement point during a frequency sweep or cursor movement (see part 4).

Bibliografía

- Lars Wanhammar - *Analog Filters Using Matlab*, Springer, 2009

- Universidad de Valencia:

http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/filtros-digitales/tema_2_revision_de_los_tipos_de_filtros_analogicos_mas_comunes.pdf

- Programantium – Programación en Excel:

<http://www.programantium.com/excel2.htm>

- IEEE:

<http://www.ieee.org/index.html>

- National Instruments:

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/13137>

- Matheonics (matemática aplicada a la electrónica):

http://www.matheonics.com/Tutorials/Elliptic.html#Paragraph_6.5

