

# Trabajo de Laboratorio 3: Simulación de Filtrado - Simulink y FilterDesigner

## Señales y Sistemas

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Informática y Telecomunicaciones

### 1. Introducción

Una de los bloques más utilizados en el Procesamiento de Señales es el de filtrado. Permite separar rangos de frecuencias, definiendo las categorías básicas de PasaBajo, PasaBanda, PasaAltos y Eliminabanda.

Además, existen otras categorías, por ejemplo, los filtros multirate (que aprovechan las propiedad de cambiar la velocidad de muestreo internamente para mejorar la performance del sistema) y los filtros ecualizadores, que actúan simultáneamente sobre distintas bandas, reduciendo la capacidad de procesamiento necesaria.

Cualquier bloque de Procesamiento de Señales está restringido a la capacidad de procesamiento disponible, y en general, toda la cadena de procesamiento debe ocupar el procesador en menos de un 100 % para reducir la probabilidad de pérdida de datos o desbordes de cola intermedios. En particular, se debe destacar que para mantener un flujo constante de datos, la cantidad de operaciones necesaria para cumplir con todas las etapas del sistema debe ejecutarse entre una muestra y la siguiente para considerar al sistema en tiempo real. Sin embargo, se puede considerar la posibilidad de que exista un retardo entre la entrada y la salida, este caso sería equivalente a concatenar procesadores de manera secuencial, de manera de que la muestra de salida de uno fuera la muestra de entrada del otro. Como consecuencia, se obtiene una capacidad de procesamiento mayor, a expensas de un tiempo de retardo mayor entre la entrada y la salida.

Además del tiempo de procesamiento, existe la restricción de la precisión de cálculo en los procesadores digitales de señales. Esto es consecuencia de la cantidad limitada de bits por palabra que se pueden utilizar en las operaciones, ya sea con precisión entera como en representaciones de punto flotante. El rango dinámico (aquella relación entre la mínima y máxima amplitudes que se pueden representar) en el caso de los números enteros, y la granularidad limitada en el caso de los puntos flotantes genera errores de cálculo que deben ser considerados como un ruido agregado a la salida del proceso. Este error de cálculo, dependiendo de su origen, puede ser acumulativo, tener una distribución estadística asociada o puede ser oscilatorio.

Finalmente, el ancho de banda disponible depende de la velocidad de muestreo utilizada. Este factor está asociado directamente a la cantidad de operaciones que se pueden realizar para tener una respuesta en tiempo real, comentada más arriba. Para una misma velocidad de procesamiento, una velocidad de muestreo mayor resulta en una menor cantidad de operaciones que se pueden realizar entre una muestra y la siguiente. En particular, si se requiere crear filtros a altas frecuencias, para reducir los requerimientos de muestreo, una de las técnicas posibles consiste en la decimación e interpolación de la señal, cambiándole la banda de frecuencias utilizada.

Este trabajo se realizará en grupos de 3 estudiantes.

### 2. Descripción

En este laboratorio se utilizará la herramienta *FDATool* de Matlab, para analizar el comportamiento detallado de los filtros, las limitaciones y las herramientas de diseño disponibles.

Los objetivos de este trabajo son:

- Diseñar filtros de acuerdo a restricciones utilizando *FDATool*.
- Estudiar las diferencias entre los tipos de filtros diseñados
- Definir y utilizar una metodología tanto para realizar las mediciones como para resumir y presentar los resultados, explicando de manera correcta y con lenguaje técnico estos fenómenos.

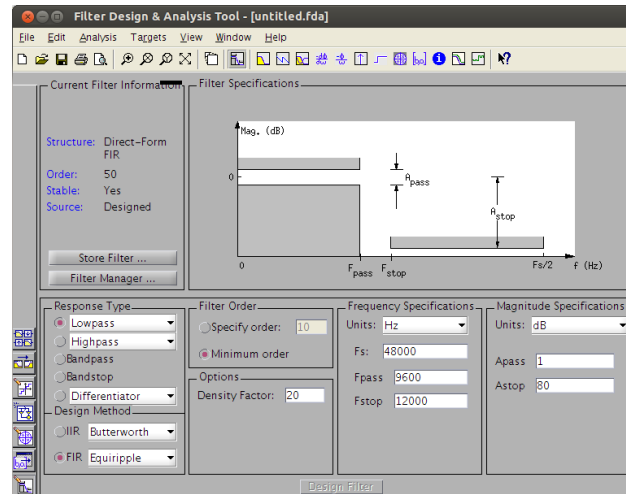
### 3. Desarrollo

#### 3.1. Pasos a Seguir

1. El primer paso para iniciar el diseño de filtros con *FDATool* es invocarlo en el prompt de Matlab:

```
>> fdatool
```

2. Luego se despliega la aplicación mostrada en la Figura 1.



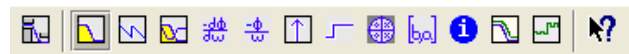
**Figura 1.** Filter Designer de Matlab

3. Los filtros digitales se diseñan utilizando una estructura básica de cociente de polinomios. El objetivo es aproximar un polinomio cuyos coeficientes se aproximen de la manera más precisa a las restricciones planteadas a partir de los parámetros de diseño: Frecuencia de corte, Frecuencia de paso, Ripple en la banda de paso, Atenuación en la banda de rechazo. Una vez que se obtienen los filtros, a través de un método de diseño, éstos se incluyen en la función de cociente de polinomios para convertirlo en una etapa de procesamiento. Cada coeficiente implica un producto y una suma: La aplicación de un filtro a una señal de entrada se realiza multiplicando los coeficientes por la muestra más reciente de la señal y por muestras anteriores, según el grado de los polinomios del numerador y del denominador.
4. El resultado de aplicar este cociente de polinomios a una señal de entrada debe ser intrínsecamente estable, sin embargo, existen expresiones que pueden generar inestabilidades tales como oscilaciones y amplificaciones para ciertas frecuencias. Para verificar la estabilidad de un filtro, se utiliza el análisis de polos y ceros. Un polo es una raíz del polinomio en el denominador, mientras que un cero es una raíz del polinomio en el numerador.
5. Existen dos tipos fundamentales de filtros: FIR e IIR. Los filtros FIR no se pueden realizar de manera analógica, sólo existen en los sistemas de procesamiento digital de señales. Estos filtros se caracterizan por tener sólo elementos en el numerador, por lo tanto son intrínsecamente estables (no hay lugares donde el denominador se haga cero, haciendo el resultado infinito). Los filtros IIR son lo similares de sus versiones analógicas, cuyos métodos de obtención más comunes se denominan Butterworth, Chevyshev y Elíptico. Cada uno de ellos tiene sus ventajas respecto a los demás. Estos filtros tienen la principal desventaja de generar coeficientes de un gran rango dinámico, lo que, en primer lugar, fuerza a utilizar cálculo de punto flotante para polinomios de mayor orden y en segundo lugar, puede generar inestabilidades. Sin embargo, la ventaja de estos filtros es tener la capacidad de obtener una respuesta similar a un FIR pero con una cantidad de operaciones considerablemente menor.
6. Para comparar el comportamiento de ambos tipos de filtro, el primer paso es definir las restricciones. Como se indica en la Figura 1, el gráfico describe el tipo de filtro elegido en el plano frecuencia(Hz)-magnitud(dB). La elección por default es un pasabajo. Para este tipo de filtro, existen las restricciones:

- $A_{pass}$ : Es la amplitud tolerada en la respuesta del filtro dentro de la banda de paso. Se entrega en dB. Equivale al ripple pasabanda. Dentro de esa banda, el polinomio puede variar libremente en su respuesta.
  - $A_{stop}$ : Es la atenuación mínima exigida al filtro dentro de la banda de rechazo. Por debajo de este límite el polinomio puede variar libremente en su respuesta.
  - $F_{pass}$ : Es la frecuencia límite de paso de la señal. A partir de esta frecuencia, el filtro empieza a atenuar la señal hasta la  $F_{stop}$ .
  - $F_{stop}$ : Es la frecuencia límite donde comienza el rechazo de la señal. A partir de esta frecuencia, debe respetarse el parámetro  $A_{stop}$ . La banda entre la  $F_{pass}$  y la  $F_{stop}$  se denomina banda de transición.
  - En el caso de un filtro pasabanda o eliminabanda, existen dos  $F_{pass}$  y dos  $F_{stop}$ .
7. Los valores anteriores se cargan en los frames "Frequency Specifications" y "Magnitude Specifications" respectivamente en las unidades seleccionadas en la caja de selección superior. Para realizar una primer comparación, se plantea analizar las diferencias entre un FIR y un IIR pasabajos.
8. Se colocan los siguientes valores a los parámetros:
- ```

Fs=60000Hz
Fpass=5000Hz
Fstop=6000Hz
Apass=2dB
Astop=60dB

```
9. Para diseñar el filtro, se habilita el botón "Design Filter" en la parte inferior y el resultado se ve en la parte superior. Este es el polinomio que más se ajusta utilizando el método de diseño "Equiripple" para los filtros FIR. En el frame de la izquierda se indica la estructura final (Direct Form, existen otras estructuras más complejas que no se estudian en este curso), el orden (cantidad de polos en el denominador), si es estable y el estado del resultado (Designed).
10. El mismo trabajo se deberá realizar ahora con un filtro IIR: En la esquina inferior izquierda, se modifica la selección del tipo de filtro dentro del cuadro "Design Method" sin modificar las condiciones de diseño anteriores. Se vuelve a solicitar el diseño del filtro y se observa el resultado.
11. Responder: Qué diferencias en el orden y respuesta de magnitud se observaron? En especial, notar que aparece un parámetro más denominado "Sections" que corresponde a la cantidad de etapas de polinomios de segundo orden que se requieren para satisfacer el diseño IIR. En particular, los IIR se diseñan construyendo una cadena de filtros más simples de segundo orden. Incluir las capturas de pantalla de cada filtro para sustentar el análisis correspondiente.
12. Los filtros no solo tienen respuesta en magnitud sino también en fase, cambiando este último parámetro con respecto a la frecuencia, debido a que se realizan con polinomios de coeficientes complejos. En la barra superior se encuentran distintas alternativas para comprender el diseño del filtro. La vista combinada Magnitud-Fase es el cuarto botón de la barra, según se puede observar en la Figura 2



**Figura 2.** Barra de vistas

13. Responder: Cómo se comporta la fase en la banda de paso y de rechazo en ambos tipos de filtros? Capturar las figuras necesarias para fundamentar su análisis.
14. El análisis temporal al impulso y a una función escalón muestra las condiciones de mayor exigencia al filtro, en especial el tiempo que tarda en estabilizarse y el máximo valor de la señal en porcentaje respecto del valor del impulso (Sobrepaso). Se puede observar este valor en el gráfico de respuesta al escalón, donde en la transición en el filtro IIR, la señal de salida sobrepasa la señal de entrada cuya amplitud es 1. Por otro lado, se puede observar el retardo de salida respecto de la entrada, dado que ambas señales (impulso y escalón) son aplicadas en el instante 0 a la entrada del filtro.

15. El catorceavo botón en la barra de vistas muestra el ruido de cuantificación normalizado agregado al sistema consecuencia de utilizar un filtro digital con la precisión elegida, que es "Double Precision" equivalente al tipo de dato Double en el lenguaje de programación C. Para modificar esta precisión y analizar el efecto, se debe ir a la barra de diseño a la izquierda, en el tercer botón comenzando desde arriba, según se observa en la Figura 3.



**Figura 3.** Barra de diseño

16. Aquí los parámetros se adaptan según la precisión elegida. Para observar el efecto de cambio de precisión, en la casilla "Filter arithmetic" se debe cambiar de "Double-precision" a "Fixed point". Inmediatamente el gráfico en la parte superior se actualiza. Responder: Qué diferencia se puede observar? Cómo afecta la limitación de la cantidad de bits en las palabras de los coeficientes, entrada y salida? Capturar las figuras correspondientes para sustentar su análisis.
17. Para estimar la carga de procesamiento del filtro, se puede observar la cantidad de multiplicaciones y sumas necesarias para realizarlo. El onceavo botón en la barra de vistas (con una "i" en su interior) permite obtener esta información.
18. Finalmente, para exportar el filtro a Simulink, se utiliza el cuarto botón de la barra de diseño comenzando desde arriba, como se observa en la Figura 3. El botón "Realize Model" genera el módulo Simulink. Allí se puede probar el diseño utilizando un generador de barrido "Chirp" (genera una forma de onda de frecuencia creciente configurable) y un "Time Scope", ambos extraídos del "DSP System Toolbox" de Simulink. Esta configuración se puede observar en la Figura 4. Probar la respuesta de ambos filtros (FIR e IIR), analizar la respuesta y realizar las capturas de gráficos necesarias para sustentar el análisis. La configuración del generador Chirp se ilustra en la Figura 5.
19. Realizar un análisis comparativo considerando:
- Respuesta en Amplitud
  - Respuesta en Fase
  - Respuesta al Impulso
  - Respuesta a la función paso
  - Cantidad de operaciones de suma y producto necesarias
  - Efecto de cuantización entre Double precision y Fixed point en 16 bits
  - Respuesta al Chirp en Simulink

de un filtro pasabanda FIR, IIR Chevyshev tipo I con las siguientes características:

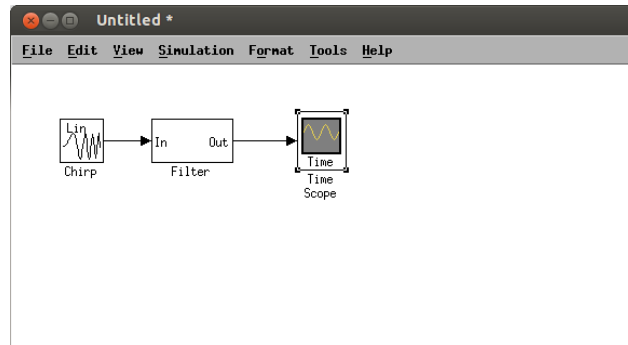


Figura 4. Filtro en Simulink

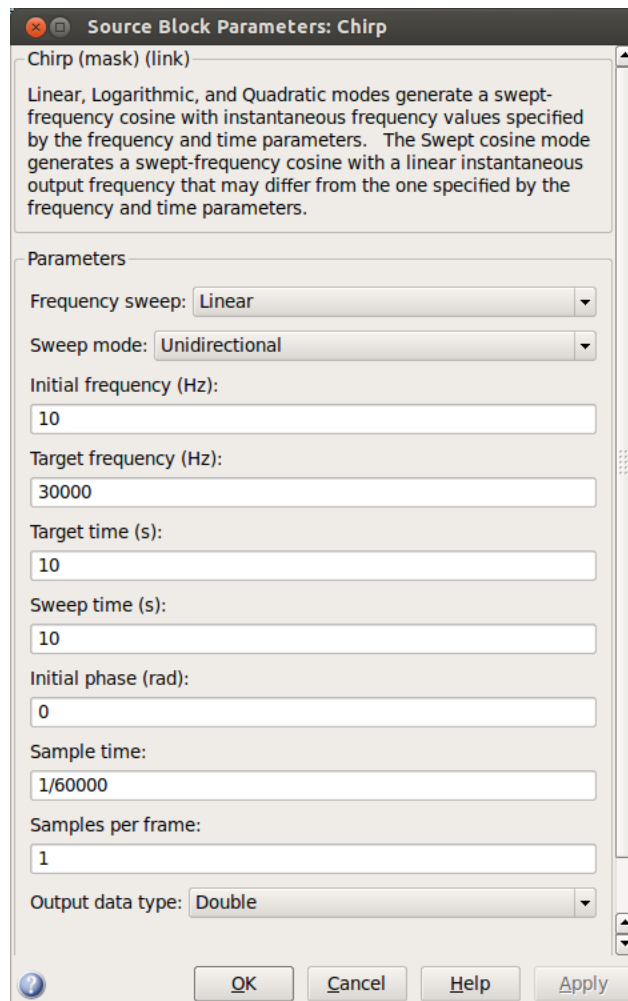


Figura 5. Configuración del generador Chirp

- Frecuencia de corte 1: 2000Hz
- Frecuencia de paso 1: 2500Hz
- Frecuencia de paso 2: 4500Hz
- Frecuencia de corte 2: 5500Hz
- Mínima atenuación 1: 40dB
- Mínima atenuación 2: 75dB

- Máxima variación de amplitud en la banda de paso: 4dB

Realizar las capturas de Figuras correspondientes para sustentar el análisis comparativo.

### 3.2. Informe

- Redacte un informe en Latex que no sobrepase las 6 páginas que contenga:
  1. Descripción breve de las mediciones a realizar y su objetivo
  2. Resultados (numéricos y gráficos)
  3. Análisis de resultados
  4. Conclusión
  5. Bibliografía
- Envíe el informe hasta el 4 de Mayo de 2017 a medianoche, en formato PDF, utilizando la plantilla provista en el sitio del curso (template.zip), a la dirección de correo: [diego.dujovne@mail.udp.cl](mailto:diego.dujovne@mail.udp.cl) con el tema “Laboratorio 3 Señales y Sistemas 2017” y en el cuerpo del correo deben listarse los miembros del grupo.