

# Análisis espectral de señales periódicas con Simulink

---



### 8.1. Captura de un modelo

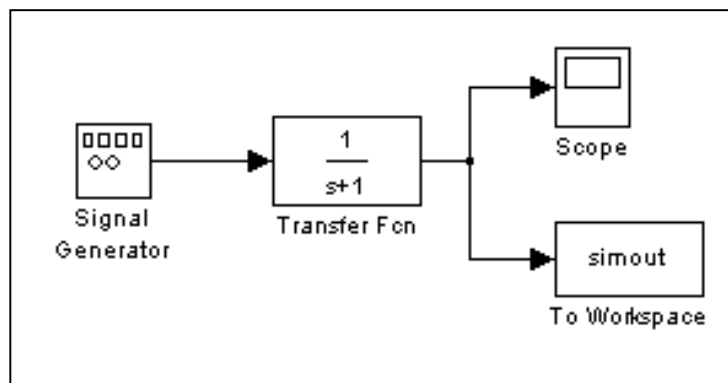
Simulink es un entorno profesional de simulación, lo que quiere decir dos cosas: poco amigable y sus librerías son tan especializadas que no se pueden usar libremente ni mucho menos mezclar.

En esta sección vamos a implementar un pequeño generador de señales del cual tomaremos las siguientes experiencias:

- Configurar el simulador para análisis espectral de señales.
- Cálculos de potencia en el dominio del tiempo.
- Cálculos de potencia en el dominio de la frecuencia.

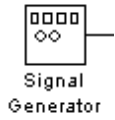
#### 8.2.1. Captura del modelo y generación de señales en Simulink

El modelo que vamos a simular corresponde a un generador de señal cuadrada, limitada en banda a 9KHz. La figura 8.1 ilustra el circuito que debe capturar.



- El bloque “Signal Generator” se encuentra en la librería básica “Simulink-Sources”.
- El bloque “Transfer Fcn” se encuentra en la librería básica “Simulink-Sources”.
- El osciloscopio o “Scope” se encuentra en la librería básica Simulink-Sinks.
- El bloque “To Workspace” se encuentra en la librería básica “Simulink-Sinks”.

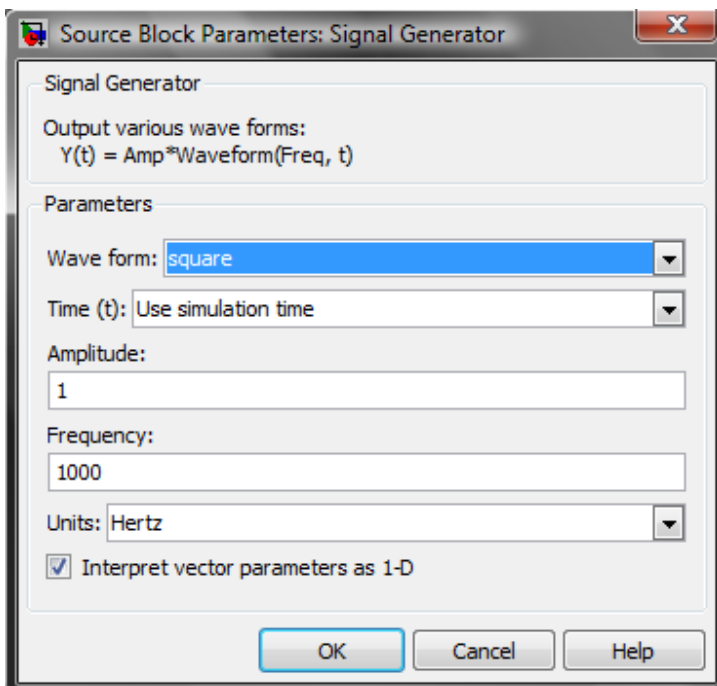
### 8.2.2. Configuración del bloque "Signal Generator"



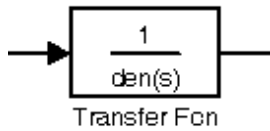
Deseamos una señal con las siguientes características:

- Elija la forma de onda cuadrada.
- Establezca la frecuencia de 1000Hz.
- La amplitud de la señal es unitaria

Haga doble click sobre el icono para mostrar el panel **Block Parameters**:



### 8.2.3. Configuración del bloque "Transfer Fcn"



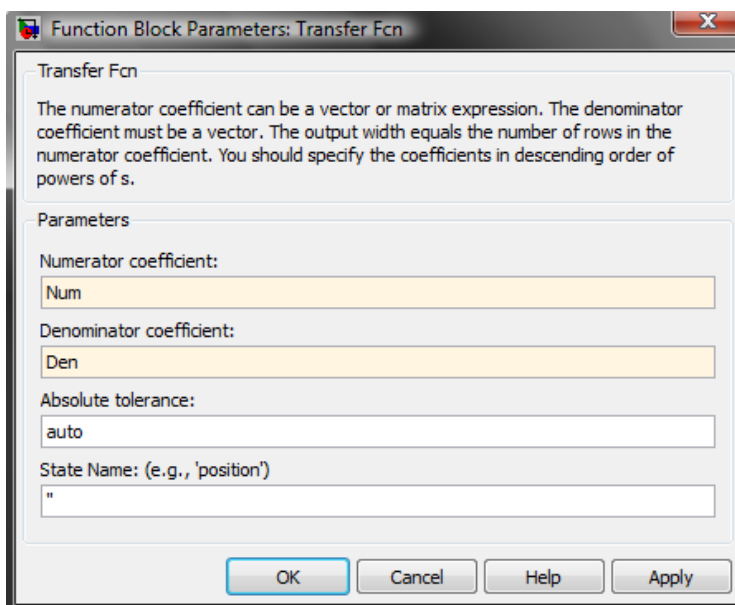
Este dispositivo contendrá la función de transferencia de un filtro limitador de banda (paso bajas). Para calcular el numerador y el denominador de la función de transferencia para tal filtro en la ventana de comandos de MATLAB tecleamos la siguiente función:

```
[Num,Den]=butter(3,2*pi*9000,'low','s')
```

Esta línea genera los polinomios correspondientes a la función de transferencia de un filtro paso-bajas. Para visualizar la respectiva función de transferencia, en la ventana de comandos de MATLAB teclee

```
tf(Num,Den)
```

Ahora haga click derecho sobre el icono y del menú emergente elija **Block parameters**. Entonces aparece el cuadro de propiedades de del bloque. Configure el bloque tal como se muestra en la figura siguiente.

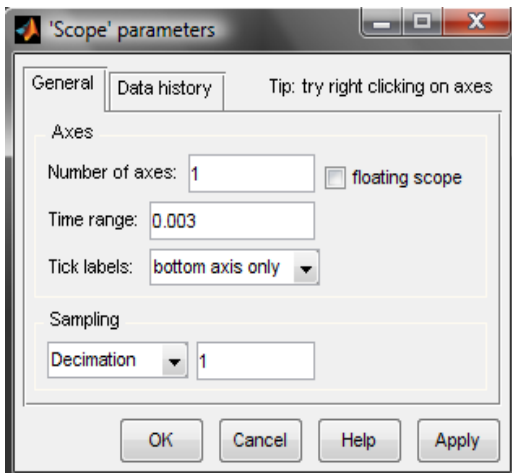
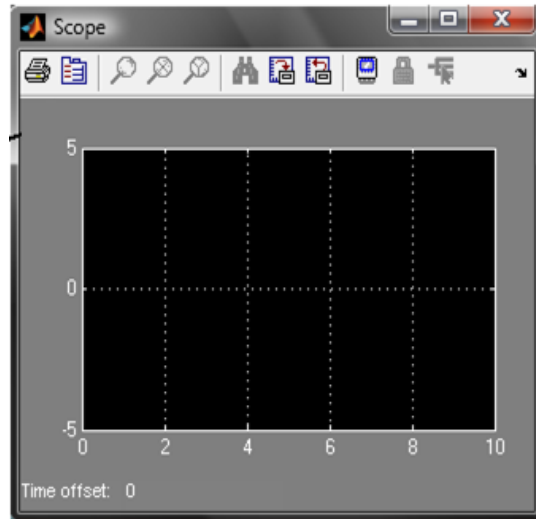


Note que las variables *Num*, y *Den* se escriben tal cuales en los campos **Numerator** y **Denominator** del **Block parameters**.

### 8.2.4. Configuración del bloque “Scope”

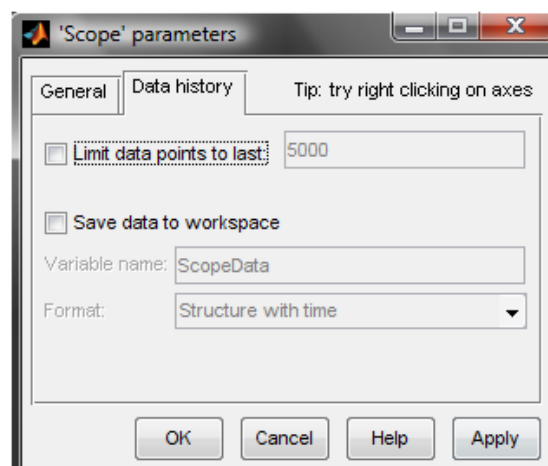


El bloque Scope se encuentra en la librería básica Simulink-Sinks y haciendo doble click se despliega el cuadro de un osciloscopio, mismo que se muestra a la derecha

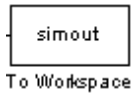


Si hace click en el icono “parameters”, podremos configurar el osciloscopio para observar tres ciclos del mensaje: cada ciclo dura 1ms, así que tres ciclos duran 3 ms. Así que el campo “*Time range*” se configura como se indica en la figura de la izquierda:

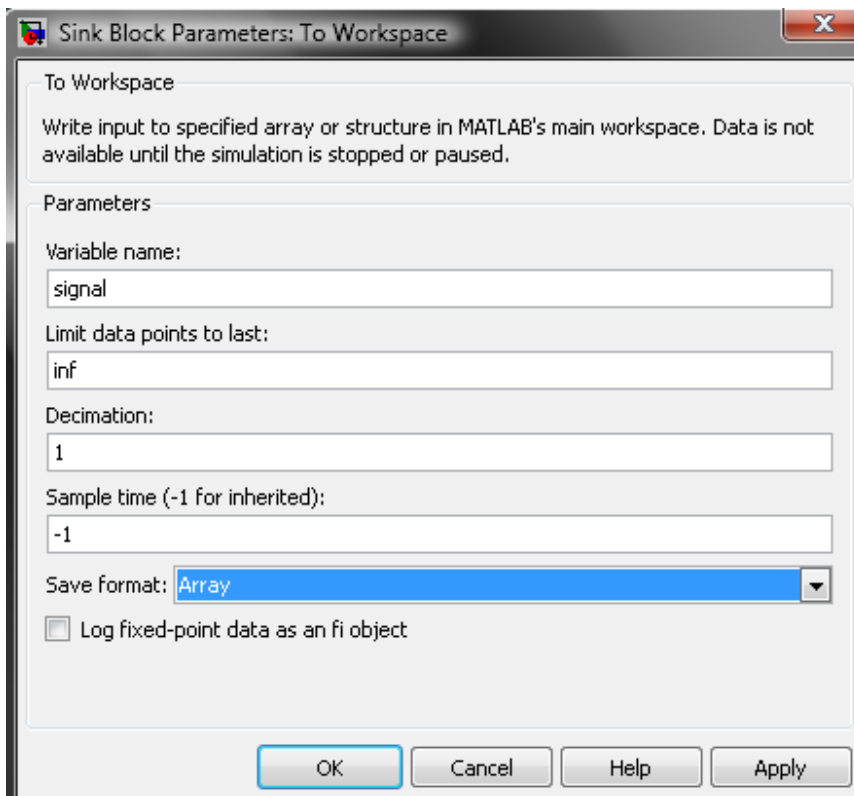
Dejaremos limpias las opciones de la pestaña “*Data history*”.



### 8.2.5. Configuración del bloque “To Workspace”



El bloque Scope se encuentra en la librería básica Simulink-Sinks y se usa para almacenar muestras de señales de Simulink generadas durante una simulación. Las muestras se guardan en una variable MATLAB en forma de vector columna. Haga doble click en el icono y se despliega el **Block Parameters**.



El campo **Variable Name** contiene el nombre de la variable MATLAB en la cual se almacenarán las muestras de alguna señal, resultado de la simulación. Cambie el nombre **simout** por un nombre conveniente, por ejemplo **signal**.

El campo **save format** es para elegir el tipo de dato en el que se almacenarán las muestras. Para nuestro caso debemos elegir la opción **Array**.

Los demás parámetros deben quedar tal cual se muestra en la figura.

## 8.2. Configuración del simulador

### 8.2.1. Los pasos generales para configurar el simulador

Para realizar un análisis en frecuencia de señales analógicas generadas en SIMULINK, mediante FFT, éstas deben ser enviadas al entorno de MATLAB y procesadas de acuerdo a la siguiente receta.

**Paso 1:** Se requieren de dos datos previos para preparar el cálculo de la DFT. El primer dato es la frecuencia máxima contenida en el mensaje

$$f_{max} = ?$$

**Paso 2:** El segundo dato previo es el número de muestras de la señal. Este debe ser potencia de 2. Por lo general se prefiere trabajar con 16384, 32768 o 65536 muestras

$$N = 16384$$

**Paso 3:** Calcule los parámetros espectrales

$$f_{SS} \geq 2f_{max} \quad \text{Frecuencia de muestreo}$$

$$df = \frac{f_{SS}}{N} \quad \text{Resolución frecuencial}$$

**Paso 4:** Calcule parámetros temporales

$$\tau_{SS} = \frac{1}{f_{SS}} \quad \text{Periodo de muestreo temporal}$$

$$T = N\tau_{SS} \quad \text{Duración del espacio muestral temporal}$$

$$stopTime = T \left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad \text{Tiempo de parada de la simulación}$$

**Paso 5:** En el dominio del tiempo, calcule el dominio y la imagen de la señal. La señal puede ser capturada.

$$t = 0:\tau_{SS}:T \left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad \text{Eje del tiempo}$$

Para finalizar esta sección, siempre es buena idea teclear el código que realiza estos cálculos en un archivo .m, de tal forma que se ejecute antes de realizar la simulación.

### 8.2.2. Pasos particulares para configurar el simulador

La configuración del simulador empieza especificando dos datos fundamentales: la frecuencia máxima contenida en la señal y el número de muestras. La frecuencia máxima presente en el sistema se considerará de 9kHz, que es la frecuencia más alta considerada en el sistema.

$$f_{max} = 9000;$$

En tanto, se considerará el uso de 16384 muestras.

$$N = 16384$$

La frecuencia de muestreo para el simulador se fijará en 10 veces la frecuencia máxima, esto es:

$$f_{ss} = 10 * f_{max}$$
$$df = f_{ss}/N$$

En resumen, el código .m que realiza el cálculo de los parámetros de simulación se muestra a continuación.

```
%Configuración del filtro
[Num,Den]=butter(3,2*pi*9000,'low','s');

% 1) Frecuencia máxima contenida en el sistema
fmax = 9000;

% 2) Número de muestras
N=16384;

% 3) Parámetros espectrales
fss = 10 * fmax;
df=fss/N;

% 4) parámetros temporales
tss=1/fss;
T=N*tss;
stopTime=T*(1-1/N);

% 5) Dominio del tiempo
t=0:tss:T*(1-1/N);
```

### 8.2.3. Los parámetros del simulador

Para cualquier simulación digital hay tres parámetros temporales que deben especificarse:

- **StartTime:** : Tiempo de arranque
- **Setp Type** : Tipo de paso: elija Fixed-Step.
- **FixedStepTime** : paso de simulación (equivalente a periodo de muestreo)
- **StopTime** : Tiempo de parada
- **Resolutor** : Es el algoritmo empleado para solucionar ecuaciones diferenciales

La definición de tales parámetros se realiza definiendo las siguientes variables

$$Type = FixedStep$$

$$Start Time = 0$$

$$Fixed Step Size = \tau_{ss}$$

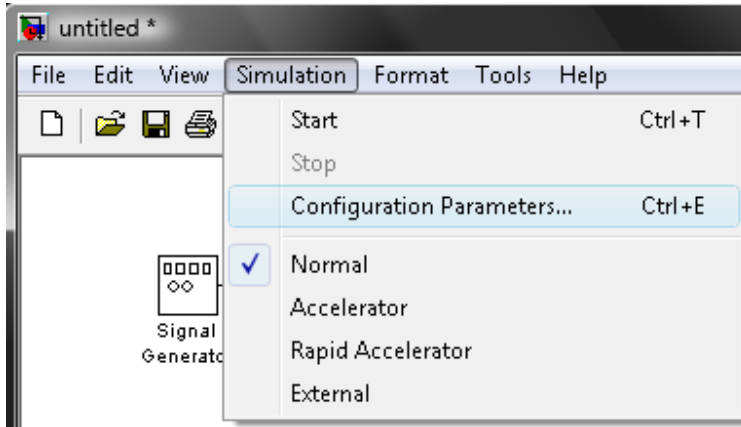
$$Stop Time = T \left( 1 - \frac{1}{N} \right)$$

$$Resolutor = [Ode4( Runge - Kutta) \quad | \quad Ode5(Dormand - Prince)]$$

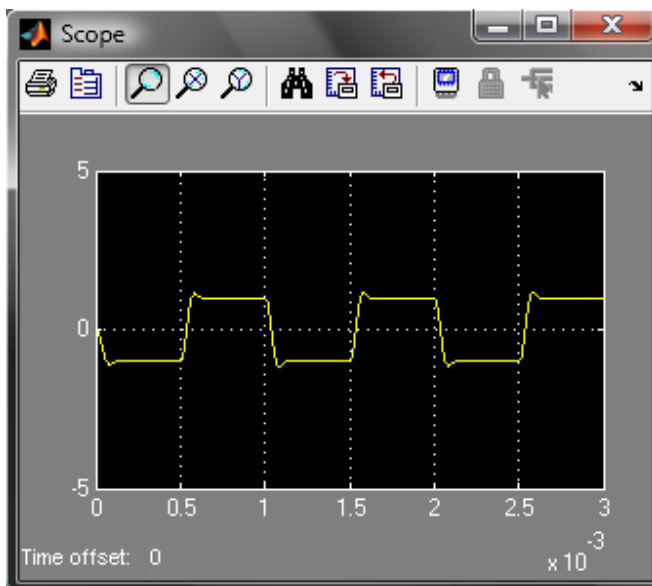
En el caso del “**stop time**”, se puede asignar directamente la variable stopTime generada según los paso de la subsección anterior.

### 8.2.3. Ejecución de la simulación

En la hoja de modelo elegimos menú **Simulation->Start** para arrancar la simulación:



De doble click sobre el **scope** para exhibir la gráfica de la señal cuadrada limitada en banda. Debe verse como se ilustra a continuación.



Verifique que la variable **signal** esté presente en el entorno de MATLAB consultando la sección Workspace, o bien teclee

```
length(signal)
```

Debe desplegarse entonces el valor 16384 que indica la longitud del vector columna llamado **signal**.

### 8.3. Oscilograma y espectro de señales generadas por Simulink

#### 8.3.1. Pasos generales para el cálculo del oscilograma y del espectro

Consulte el capítulo 7 sobre análisis espectral para tener una introducción de lo que implica el análisis espectral de señales mediante FFT.

**Paso 6:** En el dominio de la frecuencia, calcule el eje de la frecuencia y el espectro

$$f = -\frac{f_{ss}}{2} : df : \frac{f_{ss}}{2} \left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad \text{Eje de la frecuencia}$$

$$z = \text{abs} \left( \text{fftshift} \left( \frac{1}{N} \text{fft}(\text{signal}) \right) \right) \quad \text{Espectro de la señal (solo magnitud)}$$

**Paso 7:** Grafique la señal en el dominio del tiempo. A esta gráfica se le suele conocer vulgarmente como el oscilograma.

```
figure(1)
plot(t, signal)
title('Oscilograma')
```

Es posible que el oscilograma se exhiba como un manchón, es decir, hay demasiadas muestras, tantas que saturan el oscilograma. Para observar un fragmento de la señal graficada use la función axis:

```
axis([tmin tmax ymin ymax])
```

Donde *tmin tmax* especifican los límites temporales entre los cuales se visualiza la señal. Los valores *ymin ymax* son los límites en magnitud entre los cuales se grafica la señal.

**Paso 8:** Grafique el espectro de la señal.

```
figure(2)
plot(f', z)
title('Espectro')
```

Es posible que el espectro se exhiba como un pequeño manchón en el centro de la gráfica, es decir, el espectro está concentrado en una pequeña banda de frecuencias. Para observar sólo esa banda de frecuencias use la función axis:

```
axis([fmin fmax 0 zmax])
```

Al usar la función `axis` para exhibir sólo frecuencias positivas, el espectro debe multiplicarse por un factor de dos. A consecuencia, el código para exhibir el espectro de una señal, queda como:

```
figure(2)
plot(f, 2 * z)
axis([fmin fmax 0 zmax])
title('Espectro')
```

### 8.3.2. Pasos particulares para el cálculo del oscilograma y del espectro

El siguiente código .m resume tales pasos

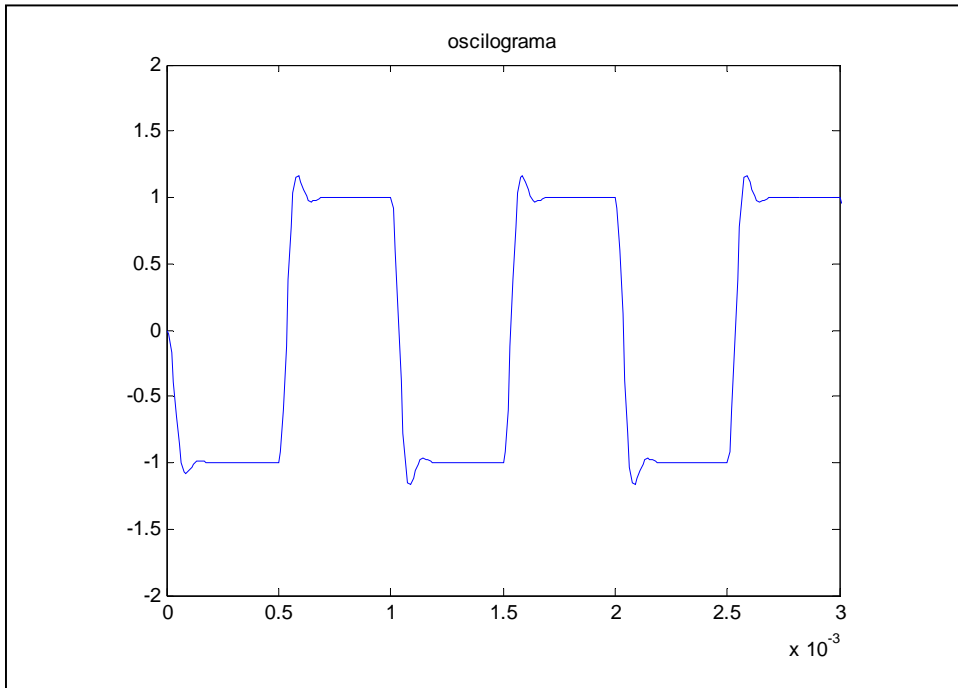
```
% 6)Dominio de la frecuencia
f=(-0.5*fss:df:0.5*fss*(1-1/N))'

z= abs(fftshift(fft(signal)/N));

% 7)Oscilograma: graficando tres ciclos de la señal
figure(1)
plot(t,signal)
axis([ 0 0.003 -2 2])
title('oscilograma')

% 8)Espectro:
figure(2)
stem(f, 2*z)
axis([0 10000 0 2])
title('Espectro')
```

El oscilograma se ve como



El espectro respectivo se ve como:

