

---

# Sistema LTI

APELLIDOS, NOMBRE: QUEIJO SEOANE DANIEL

## Objetivo

En este taller se trabajará el concepto de respuesta al impulso de un sistema Lineal e Invariante en Tiempo (LTI, del inglés Linear Time-Invariant).

La respuesta al impulso se puede definir como la respuesta en el dominio del tiempo de un sistema que está siendo analizado bajo un estímulo sonoro de corta duración. Esto quiere decir que va a mostrar información tanto de amplitud como de tiempo. Por ejemplo, cuando damos una palmada en un recinto (como una cueva) para escuchar cómo se comporta el sonido, la palmada es el impulso y lo que se recibe es la respuesta al impulso (retardo, amplitud y número de repeticiones).

En este taller se trabajará con respuestas al impulso simuladas y reales para ver el efecto que tienen en un registro de audio. En cada apartado, además de copiar las figuras, deberá analizar los resultados. Es muy importante que demuestre que ha entendido los conceptos vistos durante el tema.

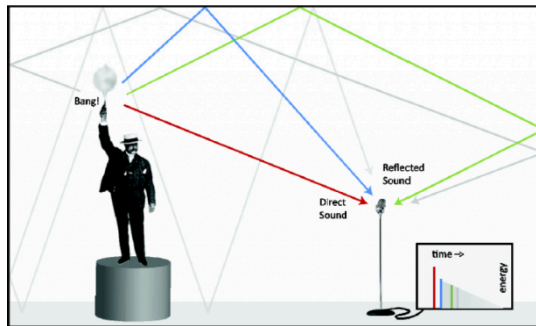
**IMPORTANTE:** Dado que se van a utilizar varios tipos de respuestas al impulso, se recomienda utilizar `if` para no “machacar” el código anterior.

```
if tipoh == 1:
    "código generación h tipo 1"
elif tipoh == 2:
    "código generación h tipo 2"
elif tipoh == 3:
    "código generación h tipo 3"
elif tipoh == 4:
    "código generación h tipo 4"
elif tipoh == 5:
    "código generación h tipo 5"
```

## EJERCICIO 1: Respuesta al impulso simulada

Como puede verse en la siguiente figura, la propagación del sonido desde el emisor hasta el receptor sufre distintos rebotes. Esos rebotes son captados por el receptor, normalmente un micrófono o ecualizador, en distintos instantes de tiempo y tienen distintas amplitudes. Es decir, podemos escribir la respuesta al impulso

como la suma de deltas desplazadas y atenuadas, 
$$h(n) = \sum_{k=0}^N a_k \delta(n - k)$$



El siguiente código lee un fichero de audio, crea una respuesta al impulso y obtiene la señal “captada”. Dado que se trata de un sistema LTI, la señal “captada” (salida del sistema) es la suma de convolución entre la emitida y la respuesta al impulso del sistema.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.io.wavfile import read, write
from scipy import signal
import sounddevice as sd

fs, x = read('hola_22050.wav')
amplitude = np.iinfo(np.int16).max
x = x/amplitude

"=====
" Convolución de señales "
tipoh = 1

Lx = len(x)
nx = np.arange(0,Lx)/fs
if tipoh == 1:
    "código generación h tipo 1"
    Lh = Lx
    h = (nx==0.2) + (nx==0.4)

nh = np.arange(0,Lh)/fs
```

```
y = signal.convolve(x,h)
Ly = len(y)
ny = np.arange(0,Ly)/fs

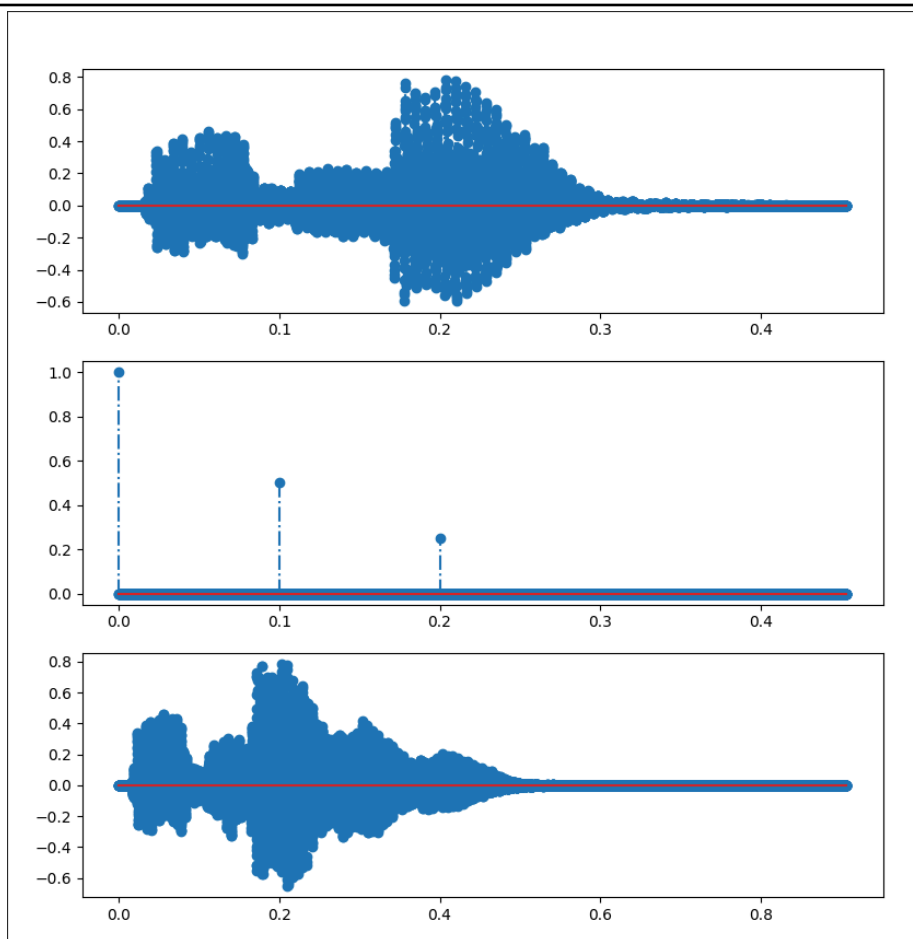
plt.subplot(311)
plt.stem(nx, x, '-.')
plt.subplot(312)
plt.stem(nh, h, '-.')
plt.subplot(313)
plt.stem(ny, y, '-.')
plt.show()
```

Cambie el código para un sistema con un camino directo ( $n = 0$ ) y dos rebotes (atenuados):  $h(n) = \delta(n) + 0.5 \delta(n - 0.1) + 0.25 \delta(n - 0.2)$

**Copie cómo ha generado esa respuesta al impulso.**

```
elif tipoh == 2:
    Lh = Lx
    h = (nx==0) + 0.5*(nx==0.1) + 0.25*(nx==0.2)
```

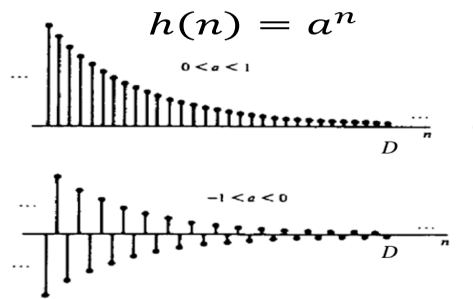
**Copie aquí la figura que obtiene (señal de entrada, respuesta al impulso y señal de salida).**



**Observe las figuras y escuche los sonidos (x e y). ¿Qué efecto introduce el sistema?**

El sistema introduce mediante la convolución un efecto de eco o reverberación. Estos efectos se introducen en  $t = 0.1$  con  $A = 0.5$  y en  $t = 2$  con  $A = 0.25$

El modelo más común de respuesta al impulso es aquel donde existe un camino directo (generalmente en  $n = 0$ ) y una atenuación gradual para los instantes posteriores. En este caso, la respuesta al impulso es una exponencial decreciente  $h(n) = a^n$ . La siguiente gráfica muestra la forma de esta exponencial según el valor de  $a$ :



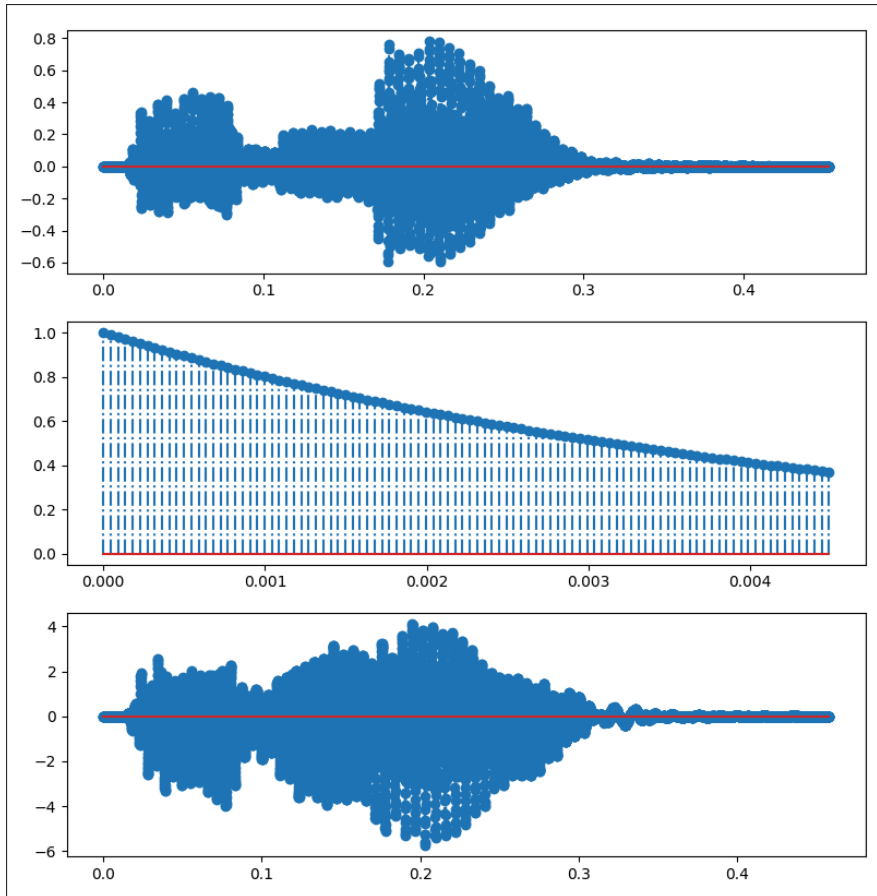
Para generar ese canal, utilice el siguiente código:

```
elif tipoh == 2:  
    "código generación h tipo 2"  
    a = 0.99  
    Lh = 100  
    nh = np.arange(0,Lh)  
    h = a ** nh  
    rebotes = sum(abs(h)>0.001)
```

La variable *rebotes* indica el número de valores que consideramos importantes.

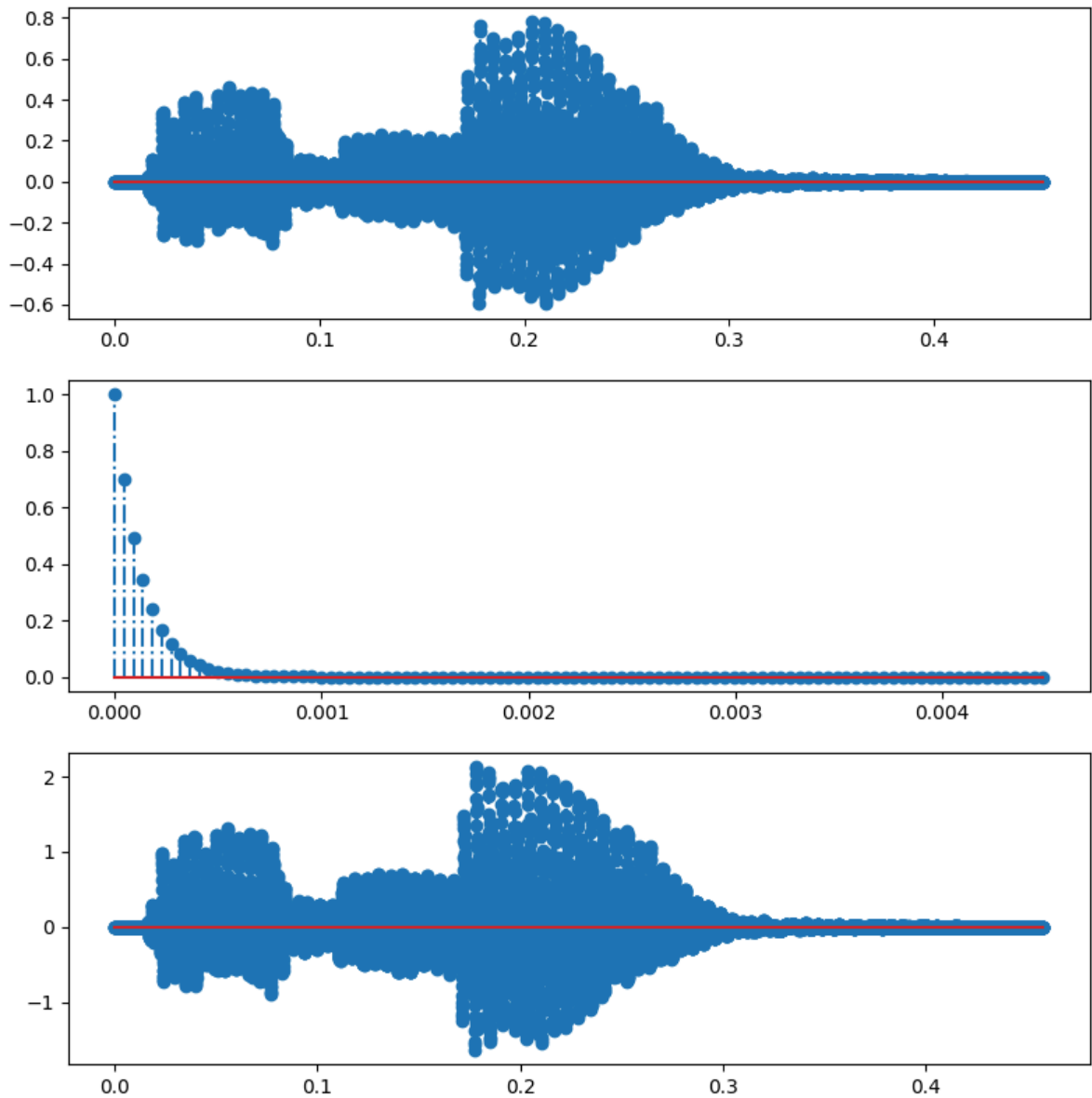
**Prueba 1:**  $a = 0.99$

- **Indique el número de rebotes de la señal.**  
La señal tiene 100 rebotes con  $a = 0.99$
- **Copie aquí la figura que obtiene (señal de entrada, respuesta al impulso y señal de salida).**



### Prueba 2: Elija otro valor de $\alpha$

- Indique el valor ha utilizado para el parámetro  $\alpha$  y el número de rebotes de la señal.  
Con  $\alpha = 0.7$  la señal tiene 20 rebotes
- Copie aquí la figura que obtiene (señal de entrada, respuesta al impulso y señal de salida).



### ¿Qué efecto tiene el valor del parámetro $\alpha$ en la duración o forma de la exponencial decreciente?

Valores de  $\alpha$  próximos a 1 de generan exponenciales decrecientes suaves con muchos rebotes y valores más bajos (como 0.7) producen caídas más bruscas con muchos menos rebotes

### Escuche los sonidos y observe las figuras, después compare los sonidos y razone los resultados.

Los sonidos más próximos a 1 son más graves y los más alejados (aunque sólo sea un poco), suenan mucho más similares al sonido original.

---

## EJERCICIO 2: Respuesta al impulso real

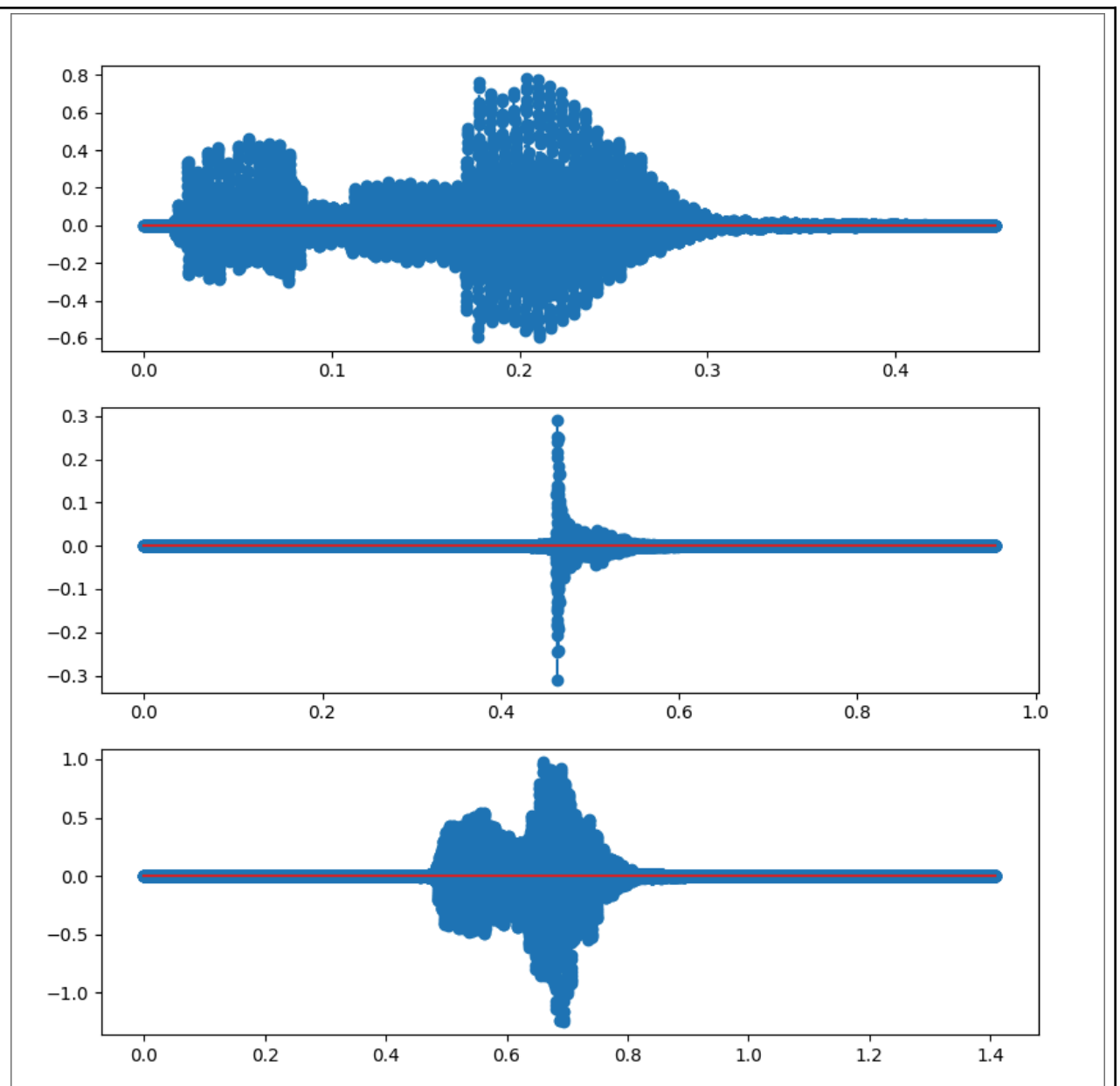
El fichero golpe.wav contiene la respuesta a un golpe seco grabada en una estancia con reverberación y el fichero golpe\_eco.wav contiene la respuesta al impulso grabada en una estancia con reverberación y eco.

Añada este tipo de canal utilizando lo siguiente:

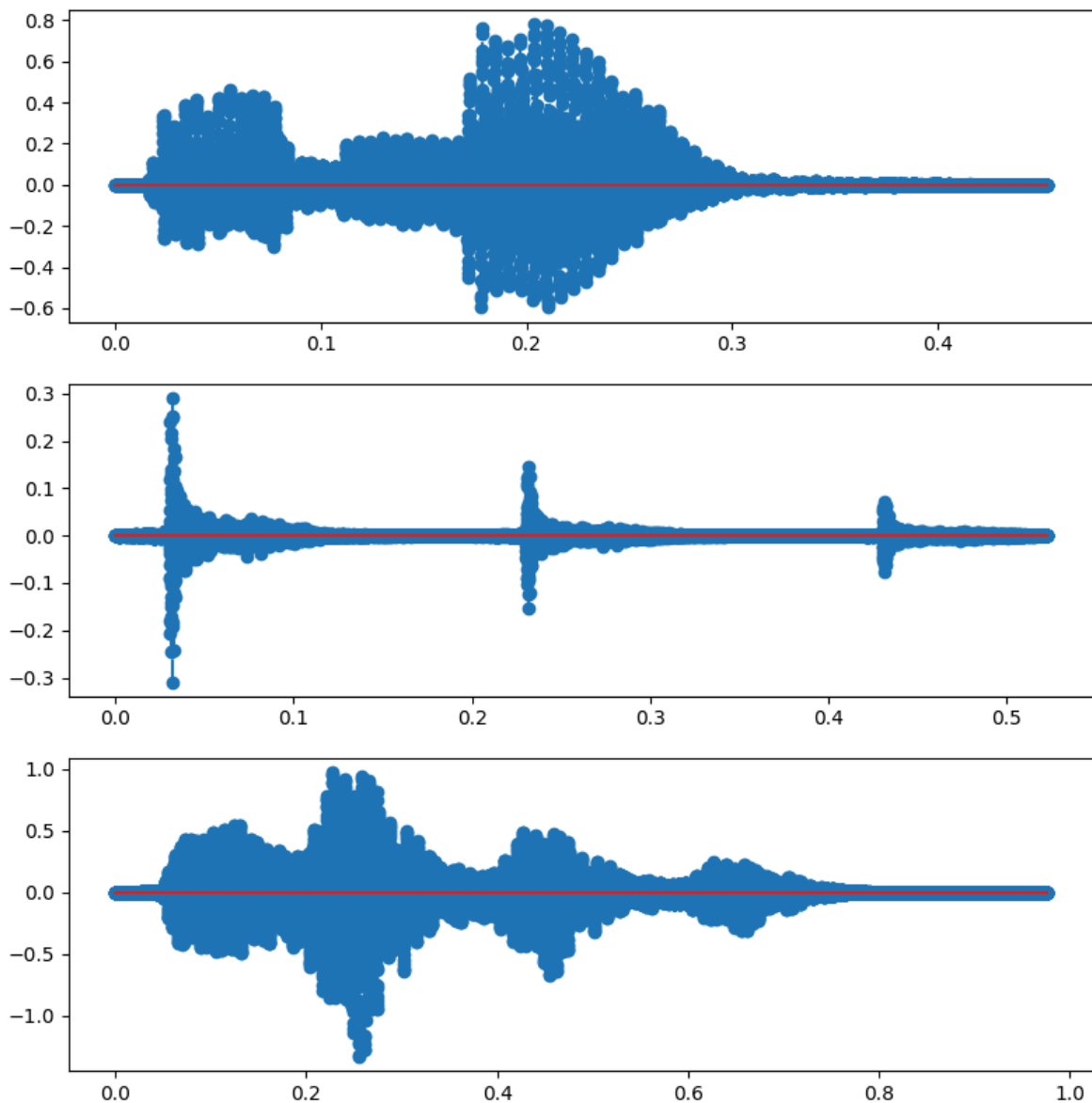
```
elif tipoh == 3:
    "código generación h tipo 3"
    fh, h = read('golpe.wav')
    h = h/amplitude
    Lh = len(h)
elif tipoh == 4:
    "código generación h tipo 4"
    fh, h = read('golpe_eco.wav')
    h = h/amplitude
    Lh = len(h)
```

**Prueba 1 (habitación con reverberación). Copie aquí la figura que obtiene (señal de entrada, respuesta al impulso y señal de salida).**





**Prueba 2 (habitación con reverberación y eco). Copie aquí la figura que obtiene (señal de entrada, respuesta al impulso y señal de salida).**



### Compare los sonidos y razone los resultados.

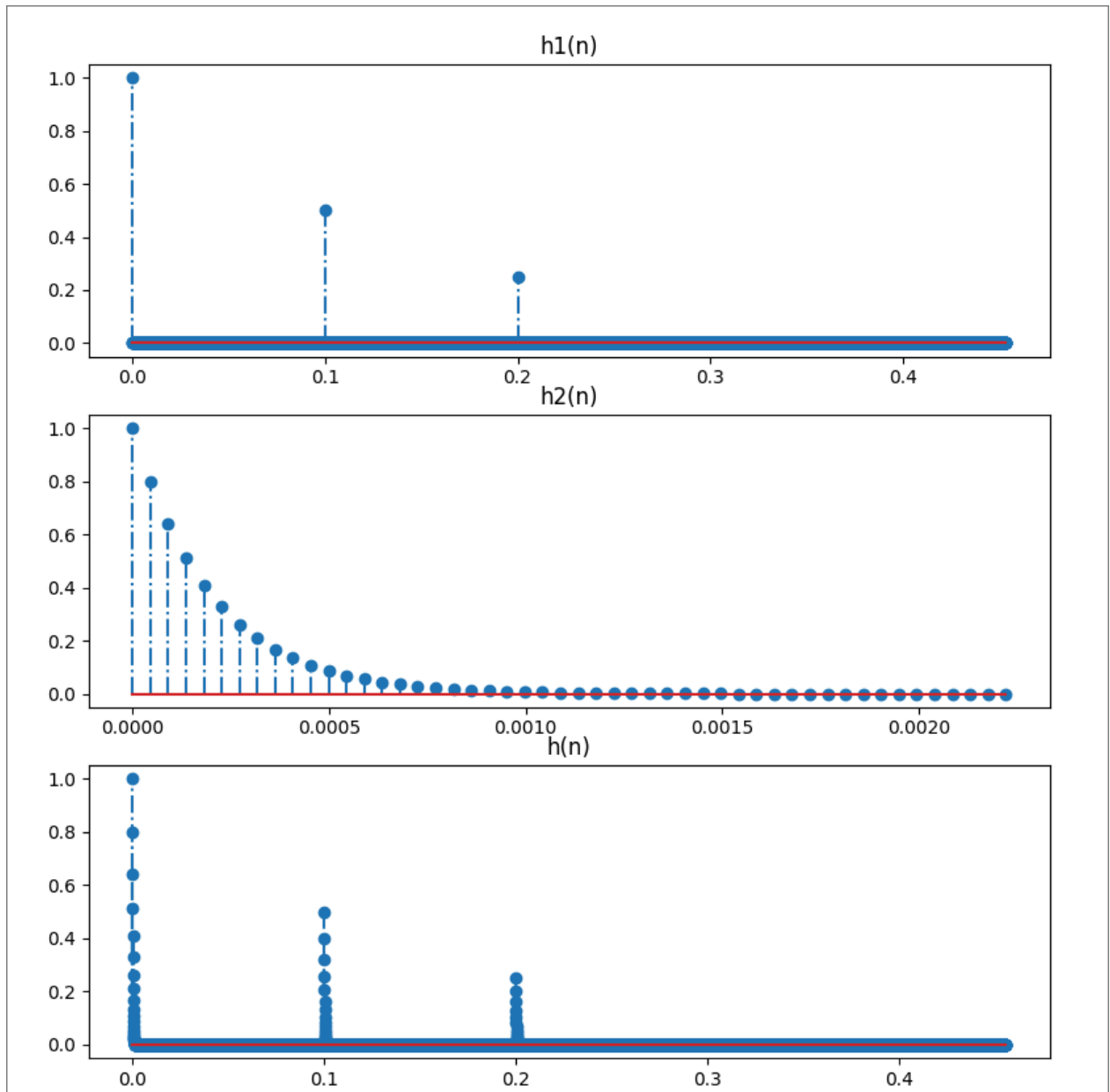
pasa En la prueba 1 es fácilmente identificable la reverberación, ya que el sonido está más extendido y estirado y así se puede ver en la gráfica. En la prueba 2 esto es incluso más notable ya que se puede distinguir en la gráfica la repeticiones de loa aumentos de amplitud de la salida, mostrando los momentos en los que es más visible el eco.

## EJERCICIO 3: Conexión serie de sistemas LTI

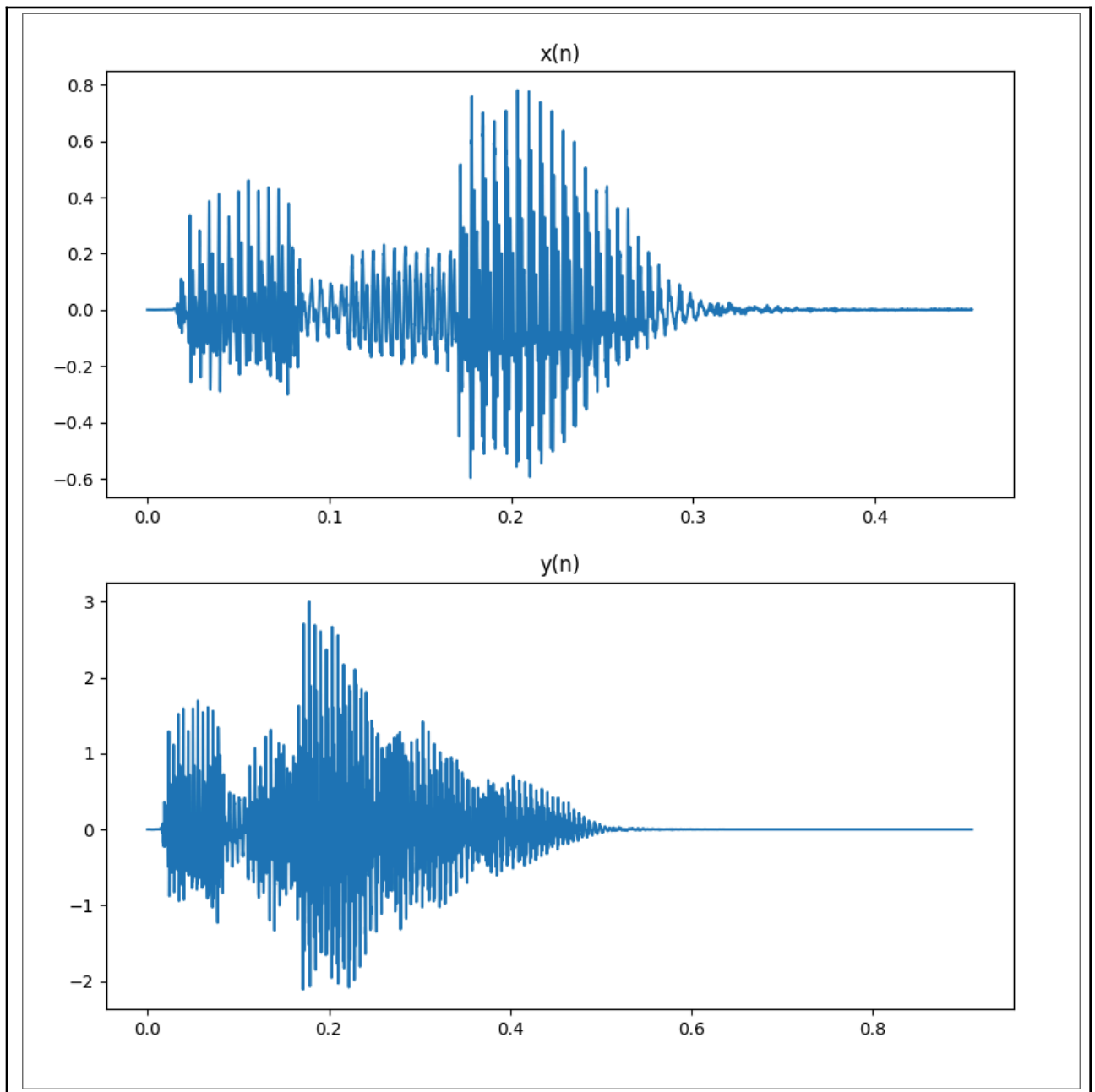
Cuando una señal pasa por dos sistemas LTI conectados en serie, se obtiene la misma salida que si se considera un único sistema LTI con respuesta  $h(n) = h_1(n) * h_2(n)$ .

Realice la conexión en serie de dos respuestas al impulso de ejercicios anteriores para generar un sistema LTI que “simule” un sistema con eco y con reverberación.

**Copie una figura donde aparezca a  $h_1(n)$ ,  $h_2(n)$ ,  $h(n)$ .**



**Copie una figura donde aparezca la señal de entrada y la de salida.**



Para conocer un poco más sobre grabaciones de respuesta al impulso, te recomiendo consultar la página web:

<https://www.hispasonic.com/reportajes/expandiendo-espacio-sonoro-cientos-archivos-r-espuesta-impulsos-para-libre-descarga/41318>