

Diseño de Sistemas Electrónicos Digitales

# Sistema de grabación, tratamiento y reproducción de audio

Versión 4.2

Pablo Ituero y Fernando García Redondo

Nombre y apellidos de los miembros del grupo:

Cristina Conforto López

María Victoria Clérico Da Costa



*Departamento de Ingeniería Electrónica*

Diseño de Sistemas Electrónicos Digitales 2019  
*Sistema de grabación, tratamiento y reproducción de audio*

El bloque de filtrado está basado en el “Mini-project” “FIR-Filter Design” del curso IL2204 “DSP Design using HDL” del “Royal Institute of Technology” de Estocolmo, Suecia.

*Departamento de Ingeniería Electrónica*  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
España  
Teléfono: +34915495700 ext. 4207  
E-mail: pituero@die.upm.es

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Especificaciones mínimas</b>	<b>1</b>
2.1. Descripción de la estructura del sistema . . . . .	3
2.2. Uso de package . . . . .	3
<b>3. Planificación temporal</b>	<b>4</b>
<b>4. Evaluación</b>	<b>4</b>
<b>5. Bloque 1: Interfaz de audio</b>	<b>5</b>
5.1. Generador de enables y salida de reloj del micrófono . . . . .	6
5.2. Interfaz del micrófono . . . . .	8
5.2.1. Esquema de muestreo . . . . .	8
5.2.2. Diseño e implementación . . . . .	9
5.2.3. Estrategia de test . . . . .	12
5.3. Interfaz de la salida de audio . . . . .	12
5.3.1. Estrategia de test . . . . .	14
5.4. Integración de la interfaz de audio . . . . .	14
5.4.1. Estrategia de test . . . . .	15
5.5. Implementación física y test en placa . . . . .	15
<b>6. Bloque 2: Filtro FIR</b>	<b>17</b>
6.1. Filtros digitales . . . . .	17
6.2. Implementación hardware de filtros FIR . . . . .	18
6.3. Sistemas basados en rutas de datos . . . . .	19
6.4. Metodología de implementación de algoritmos de procesamiento de señal . . . . .	20
6.4.1. Asignación . . . . .	20
6.4.2. Planificación temporal . . . . .	21
6.4.3. Vinculación . . . . .	21
6.4.4. Implementación . . . . .	22
6.5. Notación en punto fijo . . . . .	24
6.6. Especificación del bloque . . . . .	26
6.7. Tareas prácticas . . . . .	27
6.7.1. Creación de la ruta de datos . . . . .	27
6.7.2. Creación del controlador . . . . .	32
6.7.3. Creación de un testbench avanzado . . . . .	34
<b>7. Bloque 3: Controlador y Memoria</b>	<b>36</b>
7.1. Memoria RAM . . . . .	36
7.2. Conversión entre codificaciones . . . . .	38
7.3. Controlador y sistema global . . . . .	39

<b>8. Mejoras opcionales</b>	<b>40</b>
8.1. Control de volumen logarítmico . . . . .	40
8.2. Eco y reverberación configurables . . . . .	40
8.3. Información de segundos restantes . . . . .	41
8.4. Looper . . . . .	41
<b>9. Apéndice 1</b>	<b>42</b>
<b>10. Apéndice 2</b>	<b>43</b>

## 1. Introducción

Este documento describe el proyecto final de la asignatura Diseño de Sistemas Electrónicos Digitales del plan de estudios GITST de la ETSI de Telecomunicación de la UPM.

El proyecto guía el diseño y la implementación de un sistema electrónico digital de complejidad media y está pensado para ocupar la segunda mitad de los de las horas de laboratorio totales de la asignatura.

En cuanto a los objetivos docentes, el proyecto pretende asentar y profundizar en las metodologías de diseño combinacional y secuencial, en el diseño de máquinas de estados finitos y de máquinas de estados finitos con ruta de datos asociadas, la metodología de síntesis de alto nivel y en cuestiones de temporización.

En concreto se propone un sistema que, utilizando las interfaces de entrada y salida de audio de la placa con la que han estado trabajando los alumnos en la primera mitad de las horas prácticas de laboratorio, adquiere, almacena, procesa y reproduce sonidos.

## 2. Especificaciones mínimas

El sistema tiene las siguientes especificaciones globales mínimas:

- El sistema se implementa sobre la placa Nexys 4DDR utilizando el flujo de trabajo de Vivado.
- El sistema recibe la información de audio del micrófono integrado en la placa.
- El sistema reproduce el audio a través de la salida mono de audio integrada en la placa.
- El sistema se controla mediante tres botones (BTNL, BTNC y BTNR) y dos switches (SW0 y SW1).
- El sistema funciona a una frecuencia de reloj de 12 MHz, que se genera a partir del reloj de 100 MHz disponible en la placa.
- El sistema tiene un reset global procedente del botón BTNU.
- El audio se muestrea y se reproduce a una frecuencia de 20 kHz.
- El sistema se describe en VHDL y la entidad global tiene la siguiente declaración:

```
entity dsed_audio is  
  Port (  
    clk_100Mhz : in std_logic;  
    reset: in std_logic;  
    --Control ports  
    BTNL: in STD_LOGIC;  
    BTNC: in STD_LOGIC;  
    BTNR: in STD_LOGIC;
```

```

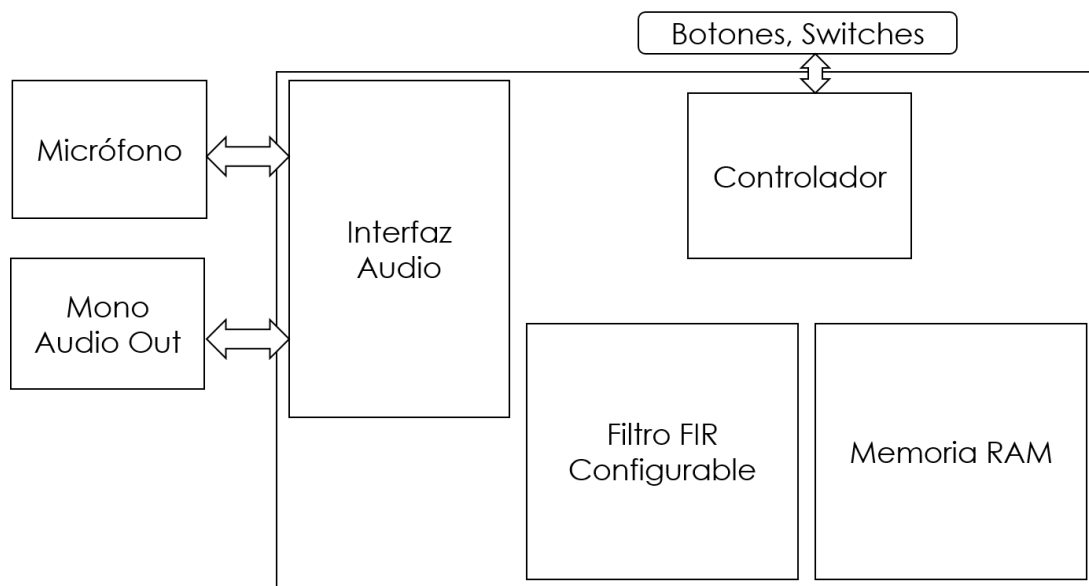
    SW0:      in STD_LOGIC;
    SW1:      in STD_LOGIC;
    --To/From the microphone
    micro_clk : out STD_LOGIC;
    micro_data : in STD_LOGIC;
    micro_LR  : out STD_LOGIC;
    --To/From the mini-jack
    jack_sd   : out STD_LOGIC;
    jack_pwm  : out STD_LOGIC
);
end dsed_audio;

```

El funcionamiento es el siguiente:

- El sistema parte de una memoria vacía de audio.
- Cuando se presiona BTNL y durante el tiempo que éste esté presionado el sistema graba el audio.
- Cada vez que se vuelve a presionar BTNL el nuevo audio se añade al final del audio que estaba previamente grabado.
- Cuando se presiona BTNC se borra todo el audio grabado.
- Cuando se presiona BTNR el sistema debe realizar acciones en función de la información de los switches:
  - Si ambos switches están a '0' el sistema reproducirá todo el audio grabado.
  - Si SW0 está a '1' y SW1 está a '0' el sistema reproducirá el audio almacenado al revés.
  - Si SW0 está a '0' y SW1 está a '1' el sistema reproducirá el audio filtrado por un filtro paso bajo.
  - Si SW0 está a '1' y SW1 está a '1' el sistema reproducirá el audio filtrado por un filtro paso alto.

## 2.1. Descripción de la estructura del sistema



El sistema está compuesto por cuatro bloques principales:

- La interfaz de audio tiene dos funciones principales: En primer lugar es la encargada de la digitalización de las señales PDM provenientes del micrófono. Por otro lado es el bloque encargado de interactuar con la salida de audio proporcionándole una señal PWM. Este bloque se va a implementar siguiendo una metodología de máquina de estados finitos con ruta de datos asociada.
- El filtro FIR se encarga del procesamiento digital de la señal de audio para las funcionalidades de filtro paso alto y filtro paso bajo. Este bloque se va a implementar siguiendo la metodología de síntesis de alto nivel.
- La memoria RAM almacena las muestras de audio que se han grabado previamente. Este bloque se va a generar con el asistente arquitectural de Vivado.
- El controlador es el encargado de orquestar toda la actuación del sistema proporcionando señales de control a los distintos bloques para ejecutar las órdenes del usuario del sistema. En este bloque el estilo de diseño es libre.

## 2.2. Uso de package

El código emplea un package propio denominado `package_dsed`. El objetivo es guardar todas las constantes y tipos de datos que vayan a ser utilizados por varios bloques en una librería común, de tal manera que el código se haga más legible, evitando el uso de expresiones numéricas que no se sabe de dónde aparecen.

A continuación se proporciona el código correspondiente a la declaración del package:

```
package package_dsed is
```

```
constant sample_size: integer := 8;

end package_dsed;
```

La idea es ir añadiendo líneas a esta declaración en función de las necesidades del diseño. Para hacer uso de este package, hay que incluir la siguiente línea en la cabecera de nuestro código:

```
use work.package_dsed.all;
```

### 3. Planificación temporal

El proyecto está pensado para realizarse en parejas en la segunda mitad de las sesiones de laboratorio de la asignatura, esto equivale aproximadamente a 6 sesiones de 2-3 horas con el apoyo del profesor más otras 15 horas de trabajo no guiado.

El proyecto se ha dividido en hitos que se corresponden con los bloques principales de la estructura del sistema:

- Semanas 1-2. Interfaz de audio.
- Semanas 3-4. Filtro FIR.
- Semanas 5-6. Controlador y memoria.

Este documento está pensado como un cuaderno y guía de laboratorio donde ir apuntando las decisiones de diseño y los resultados de la implementación.

### 4. Evaluación

La evaluación del proyecto tendrá en cuenta los siguientes elementos:

- Una pequeña demostración en la que se mostrará el funcionamiento de la implementación en la placa, así como el resultado de distintos testbenches del sistema.
- La calidad de las decisiones de diseño reflejadas en la copia de cada pareja de este documento.
- La calidad del código VHDL. Es importante que cada pareja aplique criterios de buena legibilidad en su código (uso de comentarios explicativos, uso sistemático de prefijos y sufijos en nombres de puertos, señales y variables, etc).
- La calidad de las mejoras, que se evaluarán mediante los tres criterios anteriores.



## 5. Bloque 1: Interfaz de audio

La interfaz de audio va a tener dos funciones principales: Por un lado, en el momento de la grabación, va a recibir la información del micrófono, codificada en PDM y transformarla en una palabra digital de 8 bits a una frecuencia de muestreo de 20 kHz. Por otro lado, en el momento de la reproducción del audio, va a transformar una palabra de 8 bits en un pulso de anchura variable (codificación PWM) a una velocidad de 20000 muestras por segundo.

Tiene la siguiente declaración de entidad en VHDL:

```
entity audio_interface is
  Port ( clk_12megas : in STD_LOGIC;
         reset       : in STD_LOGIC;
         --Recording ports
         --To/From the controller
         record_enable: in STD_LOGIC;
         sample_out: out STD_LOGIC_VECTOR (sample_size-1 downto 0);
         sample_out_ready: out STD_LOGIC;
         --To/From the microphone
         micro_clk : out STD_LOGIC;
         micro_data : in STD_LOGIC;
         micro_LR : out STD_LOGIC;
         --Playing ports
         --To/From the controller
         play_enable: in STD_LOGIC;
         sample_in: in std_logic_vector(sample_size-1 downto 0);
         sample_request: out std_logic;
         --To/From the mini-jack
         jack_sd : out STD_LOGIC;
         jack_pwm : out STD_LOGIC);
end audio_interface;
```

Descripción de cada puerto:

- clk\_12megas: Reloj global de la arquitectura a 12 MHz.
- reset: Reset global del sistema.
- record\_enable: Señal de control de la grabación. Cuando esté a '1', la digitalización de la información del micrófono funcionará.
- sample\_out: Dato de 8 bits (número positivo sin signo) correspondiente a la señal digitalizada obtenida del micrófono.
- sample\_out\_ready: Señal de control que proporciona un pulso activo de un periodo de reloj de duración cada vez que se proporciona un nuevo dato digitalizado.
- micro\_clk: Salida del reloj del micrófono. Un reloj de 3 MHz obtenido a partir de nuestro reloj de 12 MHz.

- `micro_data`: Entrada de la señal PDM proveniente del micrófono.
- `micro_LR`: Salida de control del micrófono que determina si las muestras se toman en el flanco de subida o de bajada del reloj. Dejaremos este valor estable en '1', correspondiente al flanco de subida.
- `play_enable`: Señal de control de la reproducción de audio. Cuando esté a '1', se procederá a la generación de la señal PWM hacia la salida de audio mono.
- `sample_in`: Dato de 8 bits correspondiente a la señal que hay que reproducir.
- `sample_request`: Señal de control que proporciona un pulso activo de un periodo de reloj de duración cada vez que se requiere un nuevo dato en `sample_in`.
- `jack_sd`: Información de control para los operacionales de la etapa de audio mono. Dejaremos este valor estable en '1'.
- `jack_pwm`: La señal PWM generada a partir del dato en `sample_in`.

A nivel estructural, en este bloque se pueden distinguir tres componentes:

- Interfaz del micrófono. Encargado de gestionar los “recording ports”, excepto el `micro_clk`.
- Interfaz de la salida de audio. Encargado de gestionar los “playing ports”.
- Generador de enables y salida de reloj del micrófono. Encargado de generar las señales enable que controlan las frecuencias de muestreo y de conversión de datos, así como la señal de reloj que alimenta al micrófono.

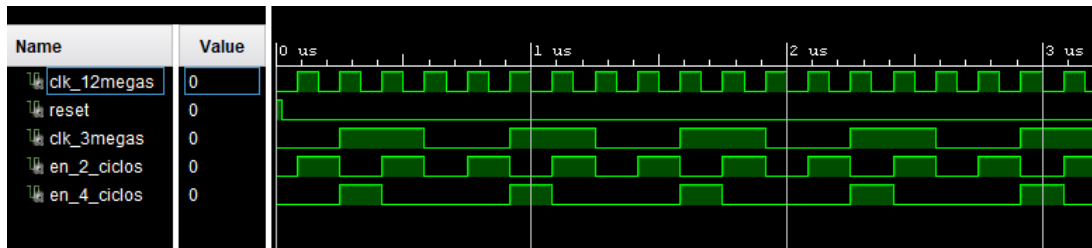
A continuación se describe cada uno de estos módulos y se guía el proceso de diseño.

### 5.1. Generador de enables y salida de reloj del micrófono

Este bloque recibe la señal del reloj global de 12 MHz y proporciona a sus salidas señales que van a ser utilizadas para temporizar el resto de módulos de la interfaz de audio. La entidad del módulo se define de la siguiente manera:

```
entity en_4_cycles is
  Port ( clk_12megas : in STD_LOGIC;
         reset       : in STD_LOGIC;
         clk_3megas  : out STD_LOGIC;
         en_2_cycles : out STD_LOGIC;
         en_4_cycles : out STD_LOGIC);
end en_4_cycles;
```

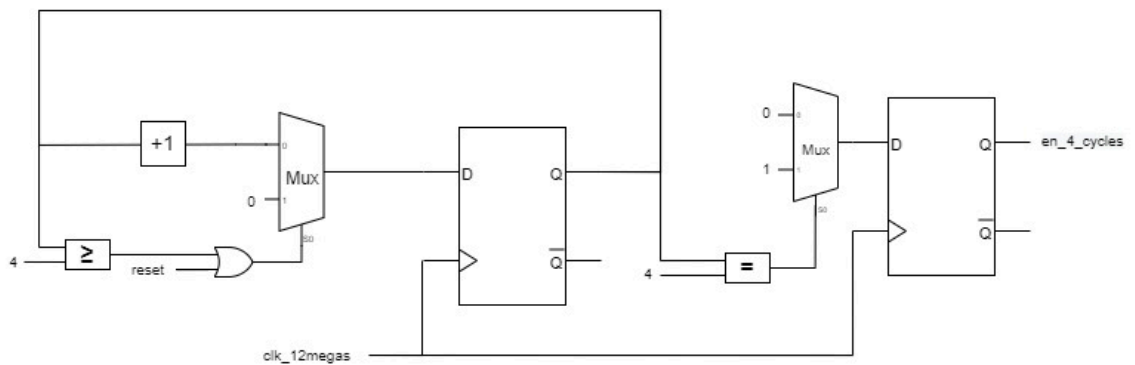
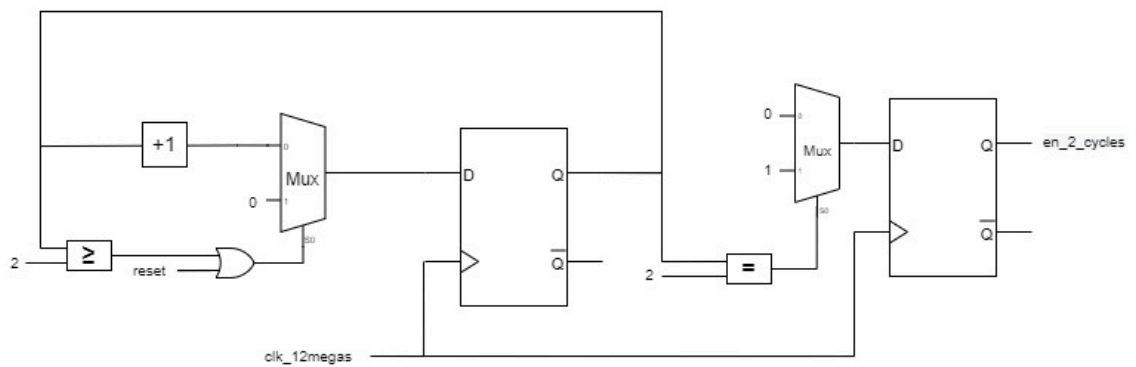
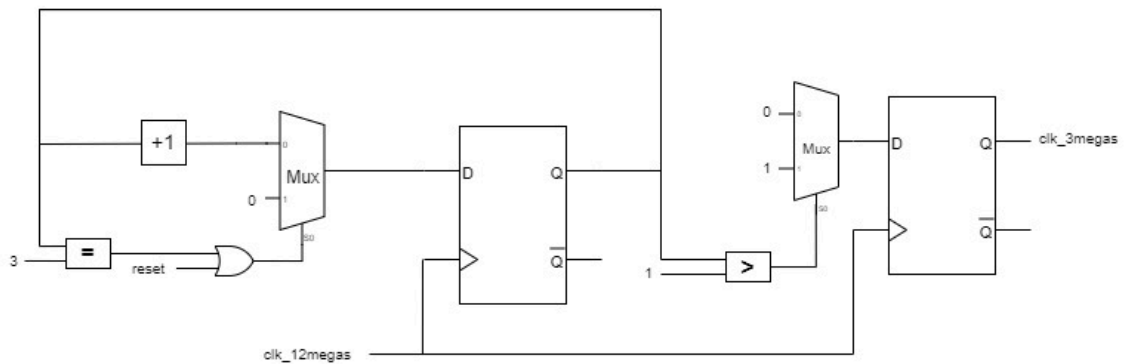
La salida `clk_3megas` es utilizada por el micrófono y es un reloj de 3 MHz con un duty cycle del 50 %. La salida `en_2_cycles` es utilizada por la interfaz de salida de audio y proporciona una señal activa durante un ciclo de reloj cada dos ciclos (equivalente a un reloj de 6 MHz). La salida `en_4_cycles` es utilizada por la interfaz del micrófono y proporciona una señal activa durante un ciclo de reloj cada cuatro ciclos. La siguiente figura muestra el funcionamiento esperado.



### Tarea 1.1:



Diseña un circuito que sea capaz de generar las señales especificadas. Dibuja el esquemático correspondiente a tu diseño en el espacio inferior.



**Tarea 1.2:**

Implementa tu diseño en VHDL.

**Tarea 1.3:**

Genera un testbench que verifique la funcionalidad de tu diseño.

## 5.2. Interfaz del micrófono

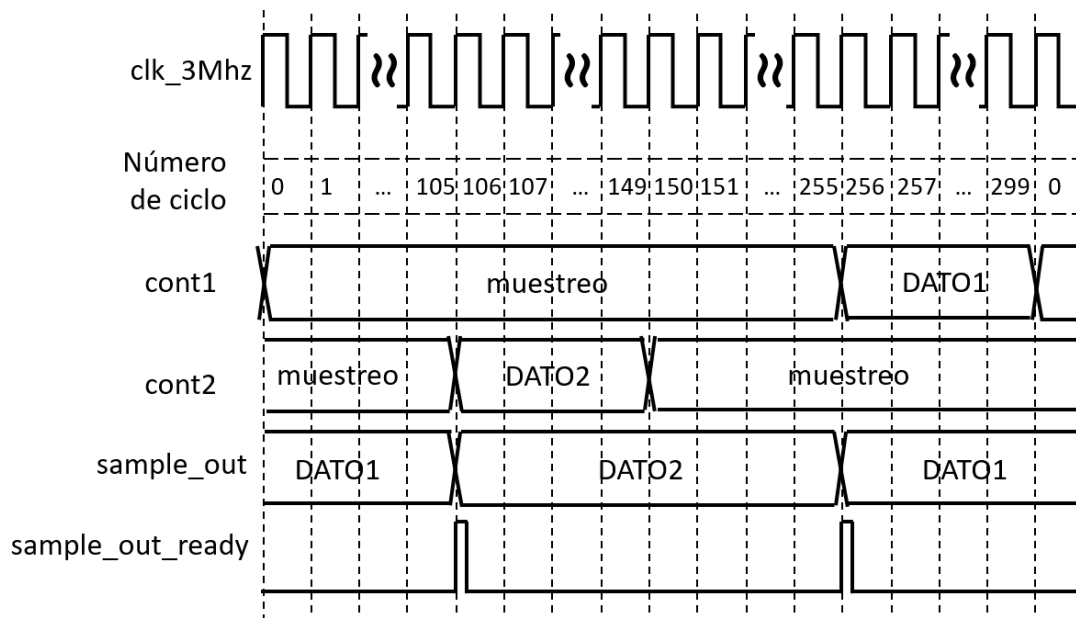
Para diseñar este módulo, es necesario conocer bien la interfaz que proporciona el micrófono omnidireccional de la placa Nexys4 DDR, la modulación de densidad de pulso (PDM) y la temporización de la interfaz del micrófono. Para ello se recomienda la lectura de la sección 15 del manual “Nexys4 DDR FPGA Board Reference Manual”.

### 5.2.1. Esquema de muestreo

El sistema va a proporcionar una frecuencia de 3 MHz en `micro_clk` (333 ns de periodo) y necesita tomar una muestra cada  $50\ \mu\text{s}$  ( $f_{\text{sampling}} = 20\ \text{kHz}$ ), es decir, una muestra cada 150 periodos de `micro_clk`. Se va a utilizar un esquema de dos contadores similar al explicado en la figura 28 del manual de la placa.

El sistema va a trabajar con datos de 8 bits, es decir va a contar el número de unos que hay a lo largo de 256 muestras.

La siguiente imagen muestra el esquema de muestreo del sistema:



Según se muestra en la figura, hay un contador general de módulo 300 que numera los ciclos del 0 al 299. Los 300 ciclos se corresponden con  $100\ \mu\text{s}$ , es decir el doble del periodo de muestreo. El primer contador muestrea entre los ciclos 0 y 255 y proporciona la señal digitalizada estable entre los ciclos 256 y 299. El segundo contador muestrea entre los ciclos 150 y 105 y proporciona

la señal digitalizada estable entre los ciclos 106 y 149. La salida sample\_out en el ciclo 105 se actualiza con el valor digitalizado por el contador 2 y en el ciclo 256 con el valor digitalizado por el contador 1, es decir se actualiza cada 150 ciclos o cada 50  $\mu$ s, la tasa de muestreo deseada. La salida sample\_out\_ready produce un pulso activo de un periodo del reloj general del sistema, de 12 MHz, cuando los nuevos datos digitalizados están disponibles.

### 5.2.2. Diseño e implementación

El diseño de la interfaz del micrófono se va a realizar empleando la metodología de FSM: a partir de un pseudocódigo se va a generar un gráfico ASMD, este gráfico servirá como base para la descripción del módulo VHDL. Se recomienda revisar los capítulos 11 y 12 del libro “RTL Hardware Design Using VHDL” del profesor Pong P. Chu y las diapositivas de clase para familiarizarse con esta metodología. La entidad del módulo se define de la siguiente manera:

```
entity FSM_microphone is
  Port ( clk_12megas : in STD_LOGIC;
         reset : in STD_LOGIC;
         enable_4_cycles : in STD_LOGIC;
         micro_data : in STD_LOGIC;
         sample_out : out STD_LOGIC_VECTOR (sample_size-1 downto 0);
         sample_out_ready : out STD_LOGIC);
end FSM_microphone;
```

La señal enable\_4\_cycles es una señal de enable que se activa durante un periodo de reloj cada cuatro periodos. Proviene del generador de enables y permite trabajar a la interfaz del micrófono de manera efectiva a una velocidad de 3 MHz. El resto de puertos ya se ha descrito anteriormente.

Desde el esquema de muestreo, podemos describir el algoritmo de digitalización mediante el siguiente pseudo-código:

```
if (reset = 1)
  cuenta = 0
  dato1 = 0
  dato2 = 0
  primer_ciclo = 0
else
  if(0 <= cuenta <= 105 OR 150 <= cuenta <= 255)
    cuenta = cuenta + 1
    if(micro_data = 1)
      dato1 = dato1 + 1
      dato2 = dato2 + 1
    elsif(106 <= cuenta <= 149)
      cuenta = cuenta + 1
      if(micro_data = 1)
        dato1 = dato1 + 1
      if(primer_ciclo = 1 and cuenta = 106)
        sample_out = dato2
```

```

        dato2 = 0
        sample_out_ready = enable_4_cycles
    else
        sample_out_ready = 0
else
    if(cuenta = 299)
        cuenta = 0
        primer_ciclo = 1
    else
        cuenta = cuenta + 1
    if(micro_data = 1)
        dato2 = dato2 + 1
    if(cuenta = 256)
        sample_out = dato1
        dato1 = 0
        sample_out_ready = enable_4_cycles
    else
        sample_out_ready = 0

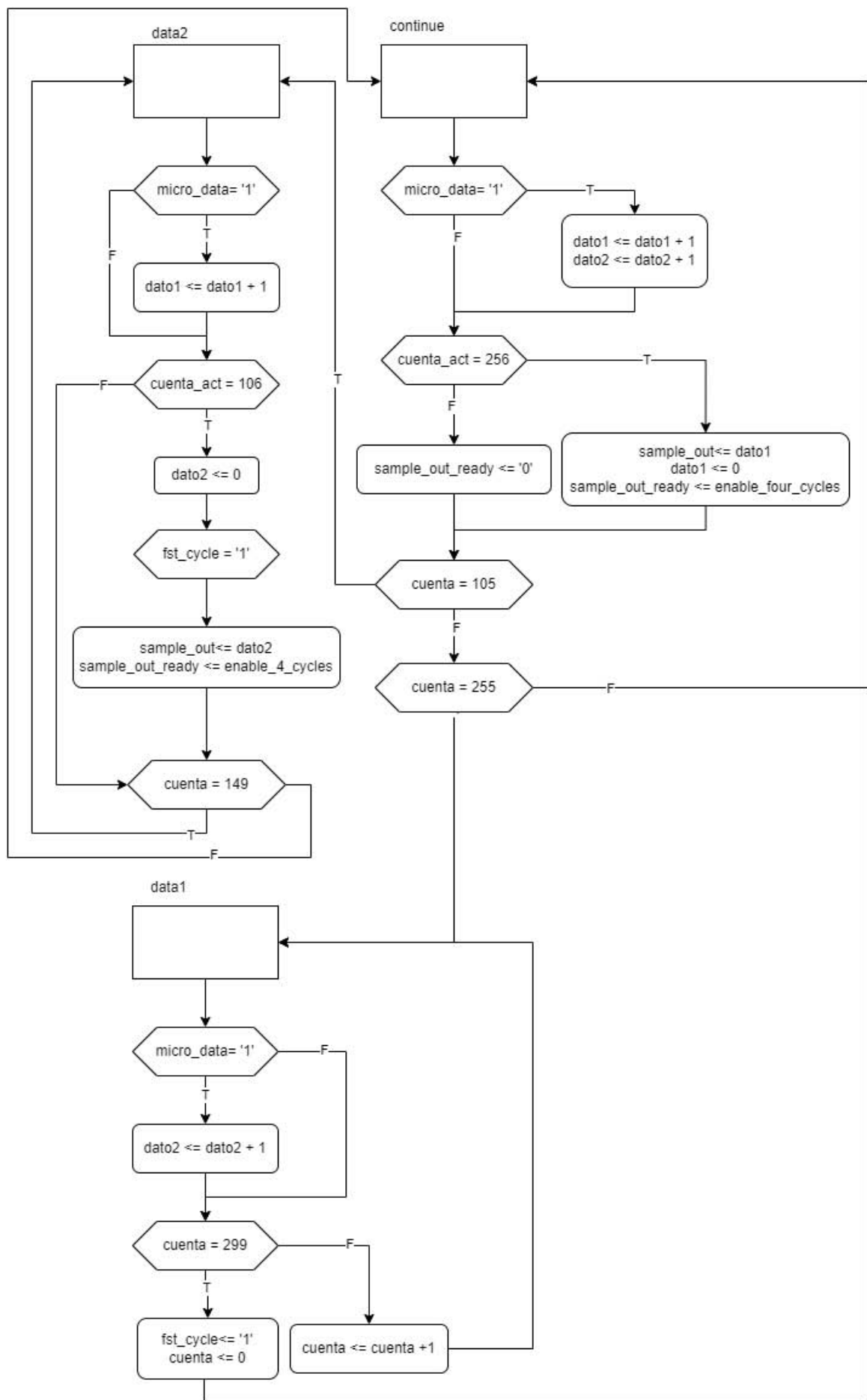
```

Trata de comprender el pseudo-código, si tienes dificultades, contacta con el profesor de la asignatura.

#### **Tarea 1.4:**



Realiza el diagrama ASMD que describa la misma funcionalidad que el pseudo-código anterior.



**Tarea 1.5:**

Implementa el diagrama anterior en un fichero VHDL.

### 5.2.3. Estrategia de test

Antes de poder oír si el resultado de nuestra digitalización es correcto, necesitamos comprobar mediante testbenches que nuestro sistema funciona como esperamos. Podemos en un primer lugar comprobar que la máquina de estados recorre los estados como esperamos, generando las señales necesarias para reiniciar los contadores. Puedes instanciar el generador de enables en tu testbench para tener disponible la señal `enable_4_cycles`.

**Tarea 1.6:**

Realiza un testbench que tenga la señal `micro_data` fija a '1' para comprobar que las transiciones de estados, la selección de los datos de salida y la activación de `sample_out_ready` se produce correctamente.

En una segunda fase podemos comprobar que la digitalización se hace correctamente, para ello podemos introducir señales pseudo-aleatorias en la señal `micro_data` y calcular el resultado esperado a mano. Podemos construir estas señales pseudo-aleatorias con sentencias del tipo:

```
a <= not a after 1300 ns;
b <= not b after 2100 ns;
c <= not c after 3700 ns;
micro_data <= a xor b xor c;
```

**Tarea 1.7:**

Realiza un testbench que introduzca una señal pseudo-aleatoria en `micro_data` y comprueba que la digitalización se realiza correctamente.

## 5.3. Interfaz de la salida de audio

Para diseñar este módulo, es necesario conocer bien la interfaz que proporciona la salida de audio mono de la placa Nexys4 DDR y la modulación de anchura de pulso (PWM). Para ello se recomienda la lectura de la sección 16 del manual “Nexys4 DDR FPGA Board Reference Manual”.

Como los datos se han muestreado a 20 kmuestras/s, la tasa de generación de pulsos tiene que ser la misma: un pulso cada 50  $\mu$ s. Para la generación de la señal PWM se propone basarse en la sección 9.2.5 del libro “RTL Hardware Design Using VHDL” del profesor Pong P. Chu. En el esquema del libro, el valor de salida de un contador se compara con la palabra digital que se quiere convertir, si el valor del contador es más pequeño, la salida PWM se pone a '0' y a '1' en el caso contrario. En el caso de nuestro sistema, el contador va a aumentar su salida cada dos ciclos del reloj global, es decir, a una frecuencia de 6 MHz (166 ns de periodo). Es decir, que durante el periodo de muestreo de 50  $\mu$ s, el contador va contar de 0 a 299. Como nuestro dato digital el de 8 bits, el máximo valor representado es 255, por lo tanto todos datos



La entidad del bloque está declarada de la siguiente forma:

La señal en `_2_cycles` es una señal que se activa cada dos ciclos y es la que nos permite trabajar de manera efectiva a la mitad de la frecuencia. Cada vez que el módulo haya terminado una cuenta, esto es que haya llegado a 299 y vaya a pasar a 0, tiene que poner un pulso activo en `sample_request` de duración un sólo periodo del reloj general para solicitar una nueva muestra a la entrada.



The timing diagram shows the signals over 10 clock cycles. The clock signal (clk) is a periodic square wave. The enable signal (enable\_2\_cycles) is active for the first two clock cycles. The output signal (en\_4\_cycles) is active for the first four clock cycles. The diagram illustrates the correct timing of the counter's output relative to the enable signal.



13

### 5.3.1. Estrategia de test

Antes de probar el módulo en la placa, necesitamos asegurarnos mediante simulaciones de que el funcionamiento es el esperado. En concreto, tenemos que comprobar que el contador cuente cada dos ciclos, que la cuenta se reinicia al llegar a 299 y que la señales pwm\_pulse y sample\_request son las esperadas. Para ello podemos verificar el funcionamiento introduciendo los valores extremos ("0000 0000" y "1111 1111") y algún valor aleatorio intermedio. Puedes instanciar el generador de enables en tu testbench para tener disponible la señal enable\_2\_cycles.

#### Tarea 1.10:



Realiza un testbench que verifique el funcionamiento de la interfaz de la salida de audio.

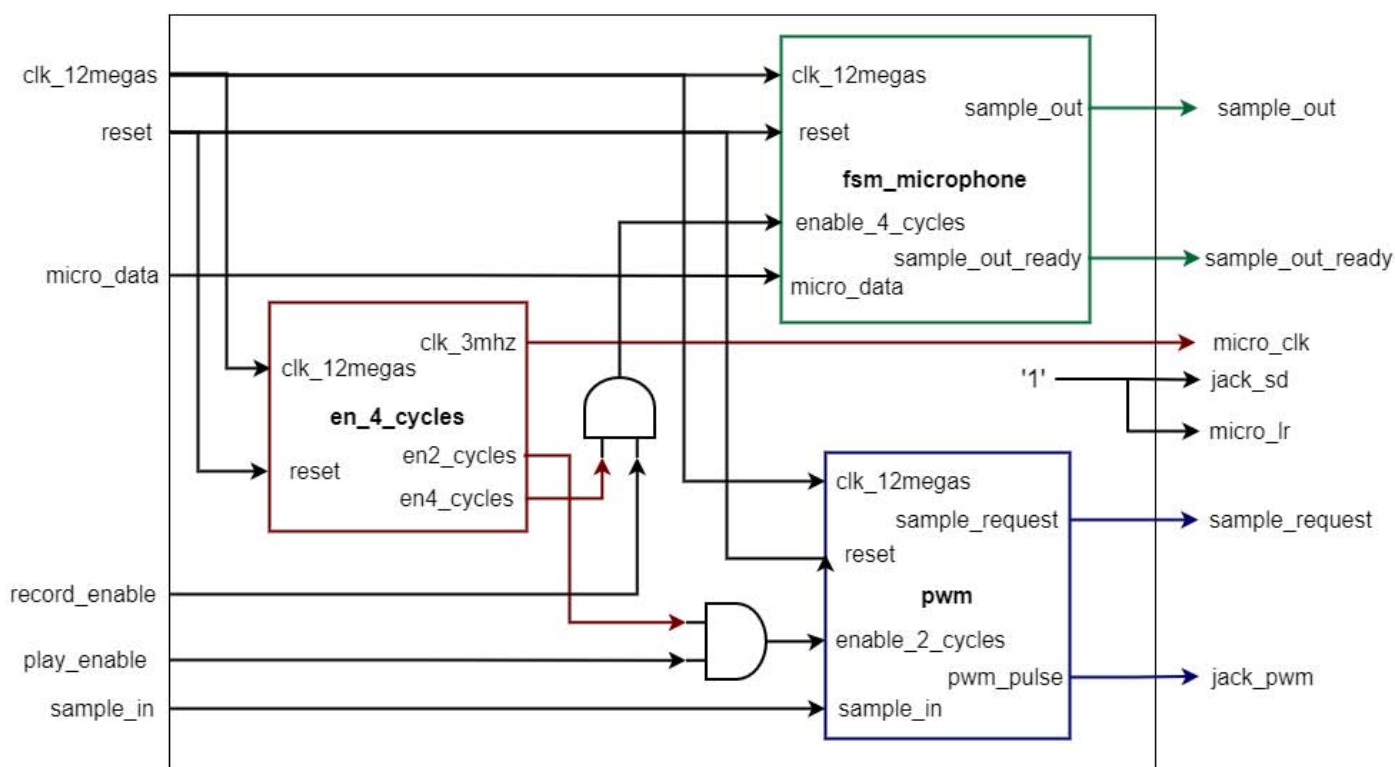
### 5.4. Integración de la interfaz de audio

Una vez implementados los tres módulos anteriores, el siguiente paso del diseño consiste en la instanciación de cada uno de estos bloques en un único módulo que formará la interfaz de audio completa.

#### Tarea 1.11:



Dibuja el esquemático a nivel bloque de la interfaz de audio completa. Ten en cuenta que record\_enable y play\_enable especifican cuándo están activas las interfaces del micrófono y de la salida de audio, respectivamente. Del mismo modo, tienes que asignar un '1' tanto a micro\_LR, como a jack\_sd.



#### Tarea 1.12:



Implementa en VHDL la interfaz de audio completa. Para ello utiliza un estilo de código estructural que instancie cada uno de los tres bloques desarrollados anteriormente.

#### 5.4.1. Estrategia de test

Para verificar la funcionalidad del bloque completo, puedes reutilizar los estímulos empleados en los testbenches anteriores.

#### Tarea 1.13:



Diseña un testbench que verifique la funcionalidad de la interfaz de audio completa.

### 5.5. Implementación física y test en placa

Una vez verificada la funcionalidad del bloque completo mediante un testbench, vas a realizar la implementación física del bloque en la placa. Para poder comprobar que el sistema efectivamente digitaliza bien la señal del micrófono y transforma bien la palabra digital en un pulso PWM, el test en placa va a consistir en hacer que lo que se grabe por el micrófono salga por la salida de audio.

Para lograr esto, necesitas un pequeño controlador que genere la señal de 12 MHz a partir del reloj de 100 MHz de la placa, mantenga `record_enable` y `play_enable` a '1' y que introduzca la palabra digitalizada por la interfaz del micrófono (`sample_out`) en la interfaz de la salida de audio (`sample_in`). No necesitan ningún tipo de sincronización especial, mientras que `sample_in` esté estable durante 50  $\mu s$  (no importa si cambia cuando el contador se pone a 0 o no). Este controlador tiene la siguiente declaración de entidad:

**entity** controlador **is**

**Port** (

```
    clk_100Mhz : in std_logic;  
    reset: in std_logic;  
    --To/From the microphone  
    micro_clk : out STD_LOGIC;  
    micro_data : in STD_LOGIC;  
    micro_LR : out STD_LOGIC;  
    --To/From the mini-jack  
    jack_sd : out STD_LOGIC;  
    jack_pwm : out STD_LOGIC
```

);

**end** controlador;

#### Tarea 1.14:



Implementa en VHDL el controlador. Utiliza estilo estructural. Necesitas emplear el asistente arquitectural de Vivado para generar el reloj de 12 MHz a partir del reloj de 100 MHz.

**Tarea 1.15:**

Diseña un testbench que verifique la funcionalidad del controlador. Puedes utilizar los estímulos empleados en testbenches anteriores.

**Tarea 1.16:**

Escribe el fichero de restricciones .xdc. Sintetiza y realiza la implementación física del diseño. Genera el fichero .bit y programa la FPGA. Comprueba el funcionamiento correcto conectando unos auriculares a la salida de audio de la placa. Si la salida de audio es muy ruidosa, puedes jugar con el valor de micro\_LR y ponerlo a '0' en lugar de a '1'.

Guarda en un fichero de texto todos los mensajes de warning que hayan aparecido en el proceso anterior.

Avisa al profesor para comprobar el funcionamiento.

Puedes aprovechar para incluir pequeñas funcionalidades adicionales al controlador. Por ejemplo, puedes hacer un indicador de intensidad de señal grabada conectando 8 LEDs a la palabra digitalizada. También puedes hacer que el sistema sólo funcione cuando se aprieta uno de los botones.

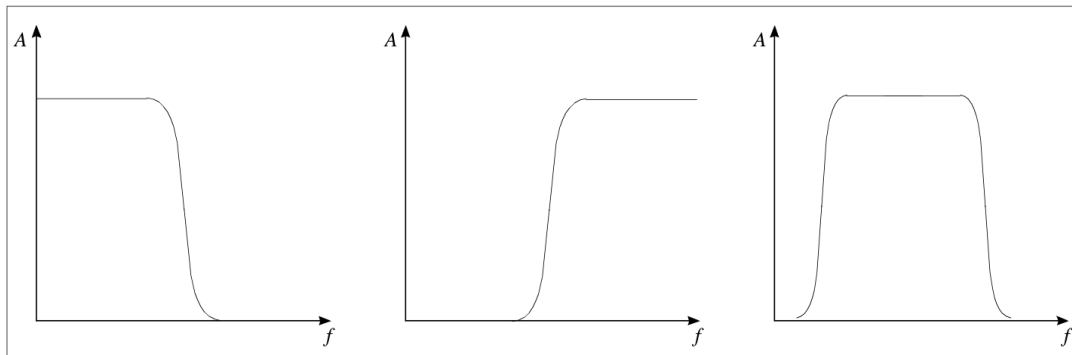
## 6. Bloque 2: Filtro FIR

Este bloque implementa un filtro FIR empleando VHDL y una arquitectura basada en una ruta de datos controlada por una máquina de estados finitos. El diseño de este bloque profundiza en conceptos de cuantificación, implementación de algoritmos, arquitecturas segmentadas y test-benches de complejidad media.

*Crédito:* Este bloque está basado en el “Mini-project” “FIR-Filter Design” del curso IL2204 “DSP Design usign HDL” del “Royal Institute of Technology” de Estocolmo, Suecia.

### 6.1. Filtros digitales

Hablamos de filtros en el contexto de procesamiento digital de señales para referirnos a circuitos que permiten pasar señales dentro de un determinado rango de frecuencias, mientras que bloquean a las señales que caigan fuera de este rango. El rango de frecuencias que el filtro permite pasar se conoce como banda de paso y el rango de frecuencias que no puede pasar se conoce como banda rechazada. Se pueden clasificar los filtros con respecto a la posición de las bandas de paso y rechazada: Tenemos filtros paso bajo, paso alto y paso banda, sus funciones de transferencia se ilustran en la siguiente figura.



Una manera común de expresar la relación de la salida del filtro  $y[n]$ , donde  $n$  es el número de muestra, en función de la entrada  $x[n]$  de un filtro, es la siguiente:

$$y[n] = \sum_{m=0}^{N-1} \alpha[m]x[n-m] - \sum_{m=1}^{N-1} \beta[m]y[n-m] \quad (1)$$

El primer término de la ecuación relaciona la salida del filtro con entradas pasadas. El segundo término relaciona la salida del filtro con salidas pasadas. Podemos distinguir dos tipos de filtros:

- Filtros de repuesta al impulso infinita (IIR) en los que están presentes los dos términos de la ecuación 1. También son conocidos como filtros de respuesta infinita, ya que el segundo término describe un comportamiento recursivo (la salida es función de la salida).
- Filtros de respuesta al impulso finita (FIR) en los que sólo está presente el primer término de la ecuación 1. La señal de salida de un filtro FIR es una suma ponderada de la señal de entrada. La respuesta al impulso de un filtro FIR tiene una longitud de  $N$  datos de salida.

Podemos destacar las siguientes propiedades de los filtros FIR:

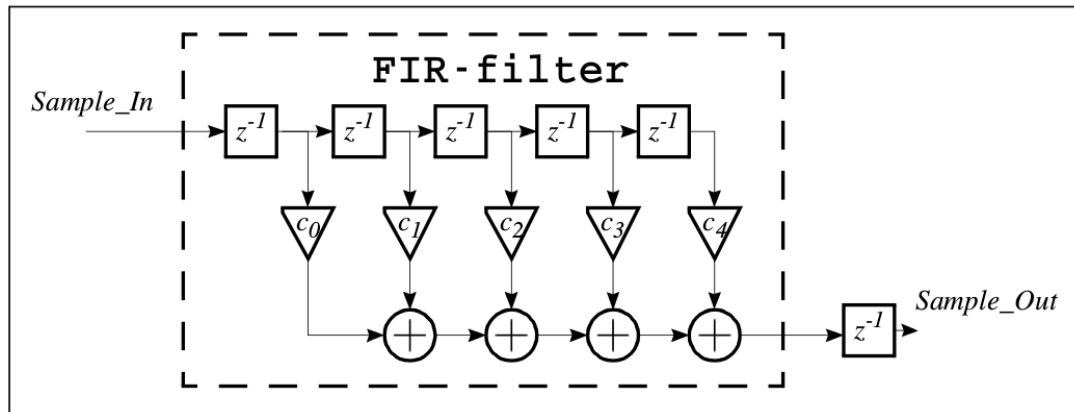
- La respuesta al impulso unidad de un filtro FIR es la secuencia de sus coeficientes  $\alpha[m]$ . Esto nos proporciona una manera sencilla de comprobar el funcionamiento del filtro. Lo único que tenemos que hacer es introducir una delta unidad ( $x(0)=1$ ,  $x(n)=0$  para  $n$  distinto de 0, también conocida como delta de Dirac) y obtendremos la secuencia de los coeficientes.
- Si todos los coeficientes se multiplican por una constante, se cambia la ganancia del filtro, no sus características.
- La ganancia en continua del filtro equivale a la suma de todos sus coeficientes.

## 6.2. Implementación hardware de filtros FIR

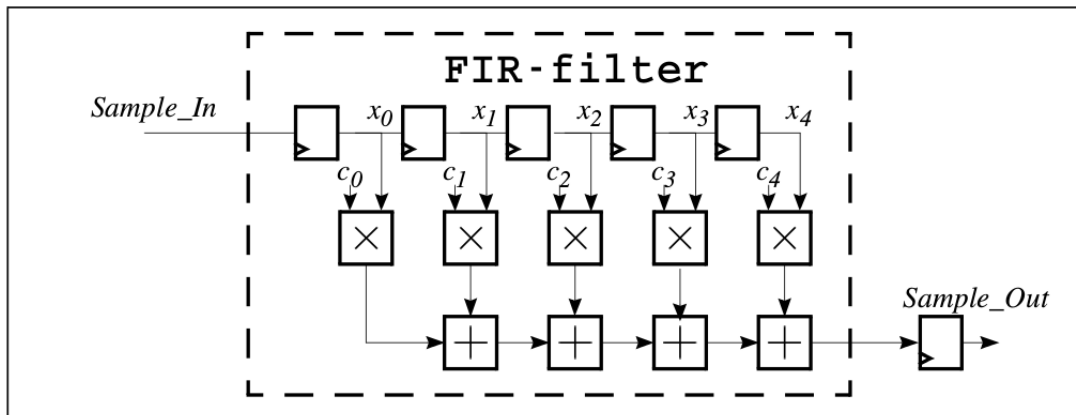
La transformada Z de un filtro FIR viene dada por la siguiente expresión

$$H_{FIR}(z) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n z^{-n} \quad (2)$$

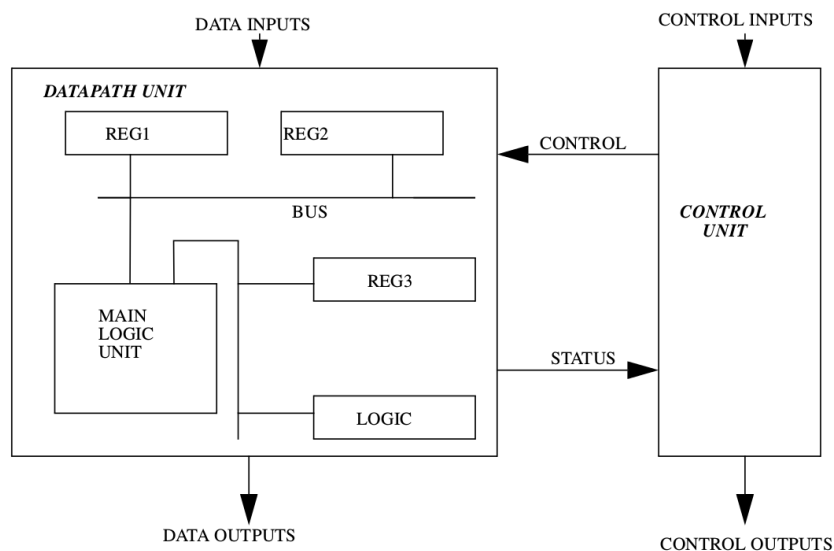
Donde  $z^{-n}$  en la ecuación corresponde a líneas de retardo y  $c_n$  son los coeficientes que ponderan las muestras de entrada, equivalentes a las  $\alpha[m]$  de la ecuación 1. En la ecuación anterior  $N$  es el orden del filtro, que también se corresponde como el número de etapas del filtro. El diagrama del flujo de señal de un filtro FIR de 5 etapas se muestra en la siguiente figura. Observa que la última línea de retardo (el registro a la salida) no forma parte de la ecuación anterior.



Las  $z^{-n}$ , correspondientes a los retardos, se implementan empleando registros. Para aplicar los coeficientes a cada muestra se emplean multiplicadores. Las sumas parciales se hacen a través de sumadores. La siguiente figura muestra la implementación directa de un filtro FIR de 5 etapas.



### 6.3. Sistemas basados en rutas de datos



La mayoría de los sistemas digitales se basa en una ruta de datos y un controlador (normalmente en forma de una máquina de estados finitos). La ruta de datos consiste en unidades de almacenamiento (como flipflops, registros y memorias) y unidades combinacionales (como ALUs, multiplexores, desplazadores, comparadores, etc.) conectados mediante buses (líneas de varias interconexiones). Los valores guardados en las unidades de almacenamiento se leen después del flanco de subida (o de bajada) de reloj, se procesan en las unidades combinacionales y se guardan en las unidades de almacenamiento en el siguiente flanco de reloj. Por otro lado, el controlador proporciona información de control y recibe información de estado de la ruta de datos. Normalmente se implementa a través de una máquina de estados finitos controlada por entradas y salidas del mundo exterior. La primera etapa en el diseño de un sistema basado en una ruta de datos es la descripción algorítmica de la especificación funcional de un sistema digital. A partir de esta descripción algorítmica se construye la ruta de datos.

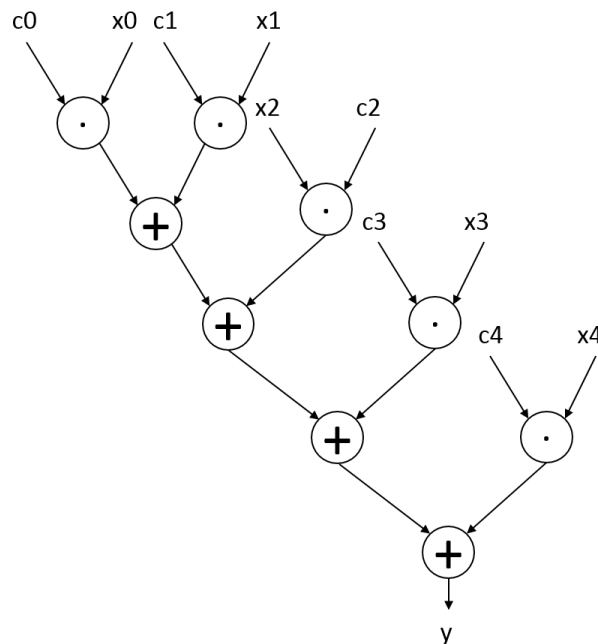
## 6.4. Metodología de implementación de algoritmos de procesamiento de señal

El proceso general de implementación de algoritmos para procesamiento digital de señales se suele dividir en las siguientes etapas:

- Asignación
- Planificación temporal
- Vinculación
- Implementación

El proceso no es estrictamente lineal, sino que puede que tengamos que retroceder alguna etapa para realizar alguna optimización concreta, o puede que podamos tomar decisiones sobre etapas posteriores sin haber finalizado algún paso intermedio.

Para ilustrar cada una de estas etapas, vamos a emplear el caso del filtro FIR de cinco etapas visto en las secciones anteriores que se puede representar por el siguiente grafo o diagrama de flujo.



### 6.4.1. Asignación

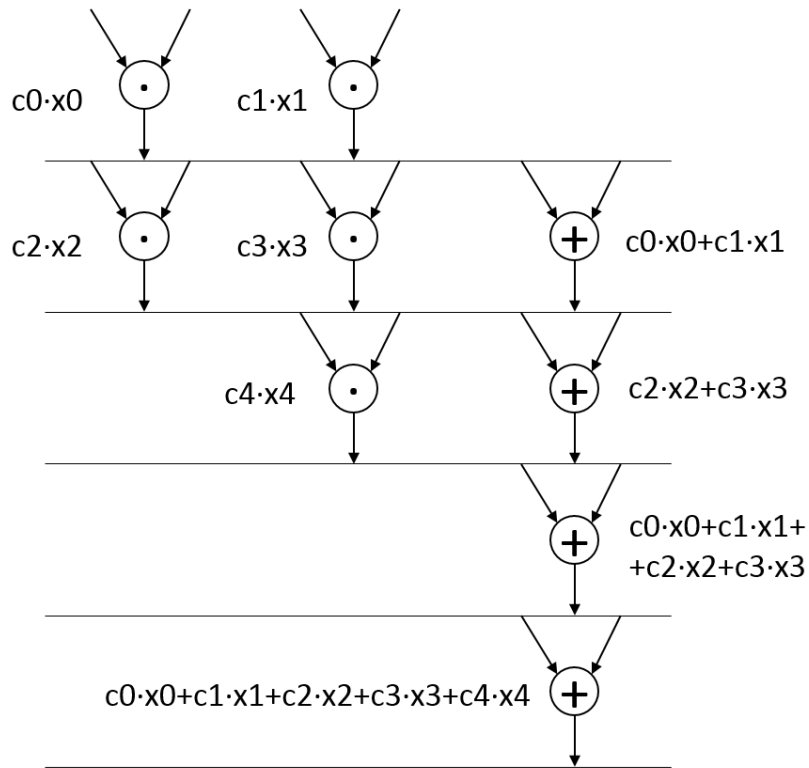
Designamos asignación a la selección del número y tipo de unidades hardware que van a implementar las funciones descritas por el diagrama de flujo del algoritmo. En el caso del filtro FIR de cinco etapas, podríamos decidir implementarlo con un multiplicador y un sumador, dos multiplicadores y un sumador, dos medios multiplicadores y dos sumadores, etc. En función del número y tipo de unidades que se escojan se obtendrán unos valores distintos de área, throughput y latencia, con lo cual hay que tener en cuenta las restricciones del sistema para tomar esta decisión.



### 6.4.2. Planificación temporal

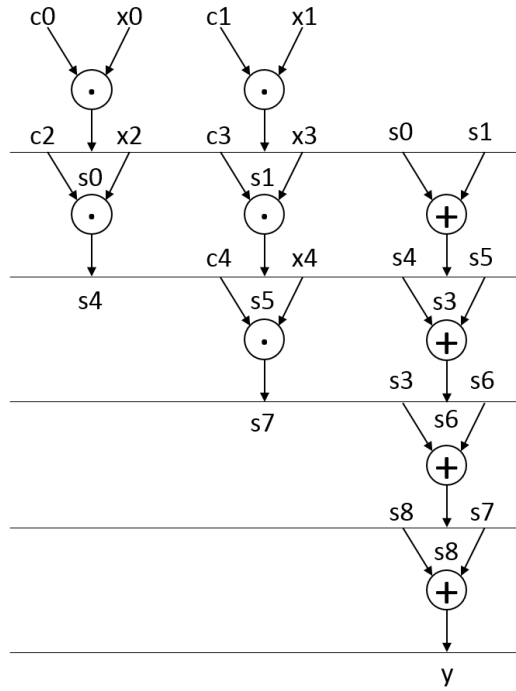
Durante esta fase, se distribuyen las operaciones del diagrama de flujo en el tiempo teniendo en cuenta que no se pueden exceder el número de unidades disponibles. En este momento se puede jugar con las propiedades distributivas de los operandos suma y multiplicación para reordenar el diagrama de flujo y obtener estructuras más interesantes desde el punto de vista hardware.

Fijando una asignación de dos multiplicadores y un sumador, la siguiente figura muestra la planificación temporal del diagrama de flujo del filtro FIR. Cada línea horizontal separa las operaciones que se producen durante un ciclo de control del siguiente. En este caso, para reducir la latencia del algoritmo, en lugar de hacer  $((c_0 \cdot x_0 + c_1 \cdot x_1) + (c_2 \cdot x_2) + (c_3 \cdot x_3))$ , que desaprovecharía la opción de utilizar dos multiplicadores simultáneamente, se ha propuesto  $((c_0 \cdot x_0 + c_1 \cdot x_1) + (c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3))$ .



### 6.4.3. Vinculación

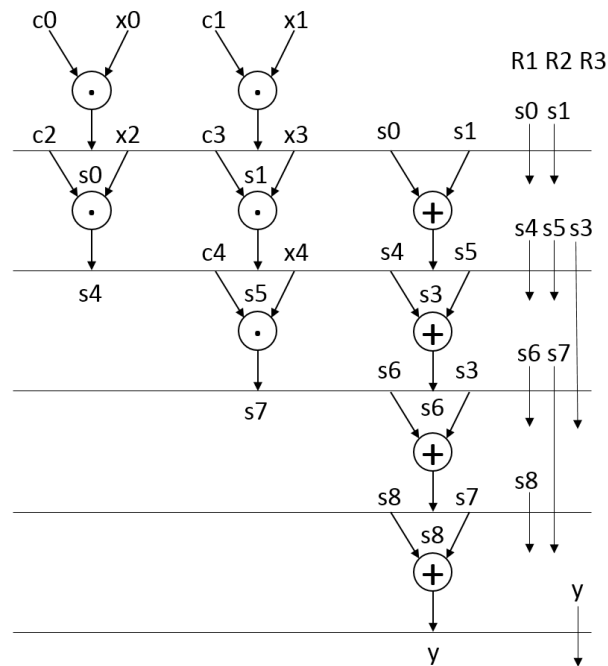
Cada unidad concreta se asocia a una operación concreta en cada unidad de tiempo. También se especifica a qué puerto concreto se conecta cada operando. Las señales internas se nombran para facilitar los procedimientos de las siguientes fases. La siguiente figura muestra el resultado de esta fase para el filtro FIR.



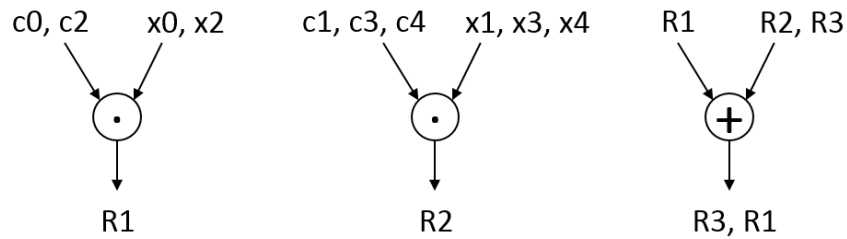
#### 6.4.4. Implementación

Esta es la fase final del diseño y es en la que se obtiene como resultado una estructura hardware que podemos implementar, por ejemplo, en una FPGA. Esta etapa se puede subdividir en distintas tareas: Análisis del tiempo de vida de las variables, minimización del número de registros y multiplexores y creación de la estructura hardware.

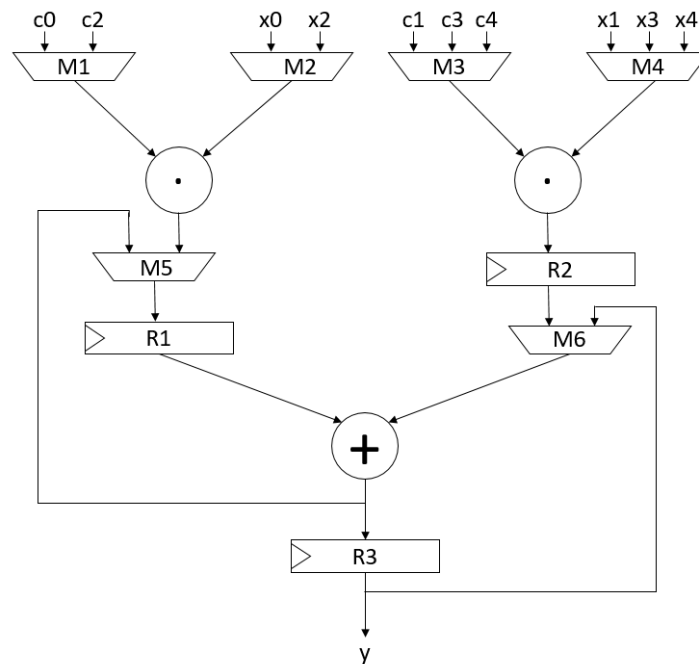
En el análisis del tiempo de vida de las variables se estudia la necesidad de almacenamiento interno (registros) de la estructura que vamos a generar. A partir del diagrama generado después de la vinculación, podemos analizar los momentos en que se producen las señales internas y los momentos en que se consumen, obteniendo así su tiempo de vida. En la siguiente figura se ha representado mediante una flecha el tiempo de vida de las distintas variables. El máximo número de flechas paralelas, tres en el ejemplo, establece el número de registros necesarios. Una vez establecido el número de registros necesarios, R1, R2 y R3, podemos asignar cada variable a un registro para cada momento. En el ejemplo, en el registro R0 se irán guardando s0, s4, s6 y s8 según se desenvuelve el algoritmo.



Cada entrada de cada operador y registro recibe distintos datos a lo largo del tiempo, es por ello que tenemos que asignar multiplexores que controlen qué entrada se conecta en cada momento. La siguiente figura estudia las posibles conexiones que pueden necesitar los módulos aritméticos del filtro FIR.



Finalmente, con toda la información que hemos ido ganando en las distintas etapas, ya podemos realizar una estructura hardware que sea capaz de realizar el algoritmo de procesamiento digital con las unidades que hemos elegido en la etapa de asignación. La siguiente estructura muestra la implementación del filtro FIR de cinco etapas con dos multiplicadores y un sumador.



Hasta aquí llegan los pasos para la creación de la ruta de datos, como es lógico, se espera que un controlador externo se encargue de proporcionar las señales de control de los multiplexores y los load de los registros en el momento apropiado. Para implementar el controlador, viene muy bien un cronograma que especifique en cada instante de tiempo qué señal tiene que dejar pasar cada multiplexor y qué señal tiene que tener guardada cada registro. La siguiente figura muestra el cronograma para el ejemplo del filtro FIR. En cada instante se especifica qué señal tiene que dejar pasar cada multiplexor y la señal de control asociada entre paréntesis, así como los datos guardados en los registros para cada instante de tiempo.

	t1	t2	t3	t4	t5	t6
M1	C0 (0)	C2 (1)				
M2	X0 (0)	X2 (1)				
M3	c1 (00)	c3 (01)	c4 (10)			
M4	x1 (00)	x3 (01)	x4 (10)			
M5	s0 (1)	s4 (1)	s6 (0)	s8 (0)		
M6		s1 (0)	s5 (0)	s3 (1)	s7 (0)	
R1		s0	s4	s6	s8	
R2		s1	s5	s7	s7	
R3			s3	s3		y

## 6.5. Notación en punto fijo

En este bloque vamos a trabajar con números representados en notación en punto fijo. Se puede establecer una analogía entre los números decimales en punto fijo y los binarios en punto

fijo. Un número binario en punto fijo tiene el siguiente aspecto: “10001110.101”. El punto de un número binario en punto fijo se pone a la derecha de cifra que representa  $2^0$ . Las cifras a la izquierda del punto se interpretan como un binario sin punto y las cifras a la derecha representan la parte decimal o fraccionaria. La siguiente figura muestra dos ejemplos de notación en punto fijo empleando complemento a dos. Observa la figura y asegúrate de entender el procedimiento de conversión entre binario en punto fijo y base 10.

0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	= 110,34765625 <sub>dec</sub>
s	$2^6$	$2^5$	$2^4$	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$	$2^{-1}$	$2^{-2}$	$2^{-3}$	$2^{-4}$	$2^{-5}$	$2^{-6}$	$2^{-7}$	$2^{-8}$	
1	0	0	0	1	0	0	0									= -1,875 <sub>dec</sub>
s	$2^0$	$2^{-1}$	$2^{-2}$	$2^{-3}$	$2^{-4}$	$2^{-5}$	$2^{-6}$									

Para este bloque vamos a utilizar la siguiente notación para representar los tamaños de números en punto fijo:  $\langle a.b \rangle$  donde a es el número de bits que representan la parte entera y b es el número de bits necesarios para representar la parte decimal. Por ejemplo el número superior de la anterior figura necesita 16 bits, y su tamaño estaría representado por  $\langle 8,8 \rangle$ . Con esta notación nos es útil para establecer los tamaños resultantes de las operaciones de multiplicación y suma: Multiplicación: Si  $\langle 3,4 \rangle$  se multiplica con  $\langle 5,6 \rangle$  el resultado será  $\langle 3+5,4+6 \rangle = \langle 8,10 \rangle$ . Si a la salida tenemos que proporcionar un dato de 10 bits, truncamos el resultado y obtenemos  $\langle 8,2 \rangle$  (o  $\langle 7,3 \rangle$  si sabemos que el resultado final de acumular estos números no va a producir un desbordamiento). Suma: Si  $\langle 3,4 \rangle$  se suma a  $\langle 5,6 \rangle$  el resultado será  $\langle \max(3,5) + 1, \max(4,6) \rangle = \langle 6,6 \rangle$ . El +1 en la parte entera tiene en cuenta posibles desbordamientos (acarreo de salida).

### Tarea 2.1:



¿Cuál es el rango de un número de 8 bits en punto fijo  $\langle 1,7 \rangle$  en complemento a dos?  
¿Cuál es su precisión?

Máximo valor representable = 0.1111111 = 0.9921875

Mínimo valor representable = 1.0000000 = -1

Precisión = 1-0.9921875 = 0.0078125

Rango = [-1, 0.9921875]

## 6.6. Especificación del bloque

En este bloque vamos a implementar un filtro FIR de 5 etapas, cuya interfaz se describe en la siguiente entidad de VHDL:

```
entity fir_filter is
  Port ( clk : in  STD_LOGIC;
        Reset : in  STD_LOGIC;
        Sample_In : in  signed (sample_size-1 downto 0);
        Sample_In_enable : in  STD_LOGIC;
        filter_select: in STD_LOGIC; --0 lowpass, 1 highpass
        Sample_Out : out  signed (sample_size-1 downto 0);
        Sample_Out_ready : out STD_LOGIC);
end fir_filter;
```

- Tanto Sample\_In, Sample\_Out, como los coeficientes del filtro se tienen que codificar con palabras de 8 bits en complemento a dos  $<1,7>$ .
- Sample\_In.enable es una entrada de control que informa de cuándo se ha actualizado el valor de Sample\_In con un pulso activo durante un ciclo de reloj.
- filter\_select es una entrada de control que selecciona el filtrado que se va a realizar: '0' para el filtro de paso bajo, '1' para el filtro de paso alto.
- Sample\_Out\_ready es una salida de control que informa de cuándo se ha actualizado el valor de Sample\_Out con un pulso activo durante un ciclo de reloj.
- El filtro paso bajo utiliza los siguientes coeficientes:  $c_0 = c_4 = +0.039$ ,  $c_1 = c_3 = +0.2422$ ,  $c_2 = +0.4453$ .
- El filtro paso alto utiliza los siguientes coeficientes:  $c_0 = c_4 = -0.0078$ ,  $c_1 = c_3 = -0.2031$ ,  $c_2 = +0.6015$ .
- La implementación del filtro emplea una estructura de ruta de datos controlada por un controlador.
- La ruta de datos sólo emplea un multiplicador en pipeline y un sumador.

## 6.7. Tareas prácticas

### 6.7.1. Creación de la ruta de datos

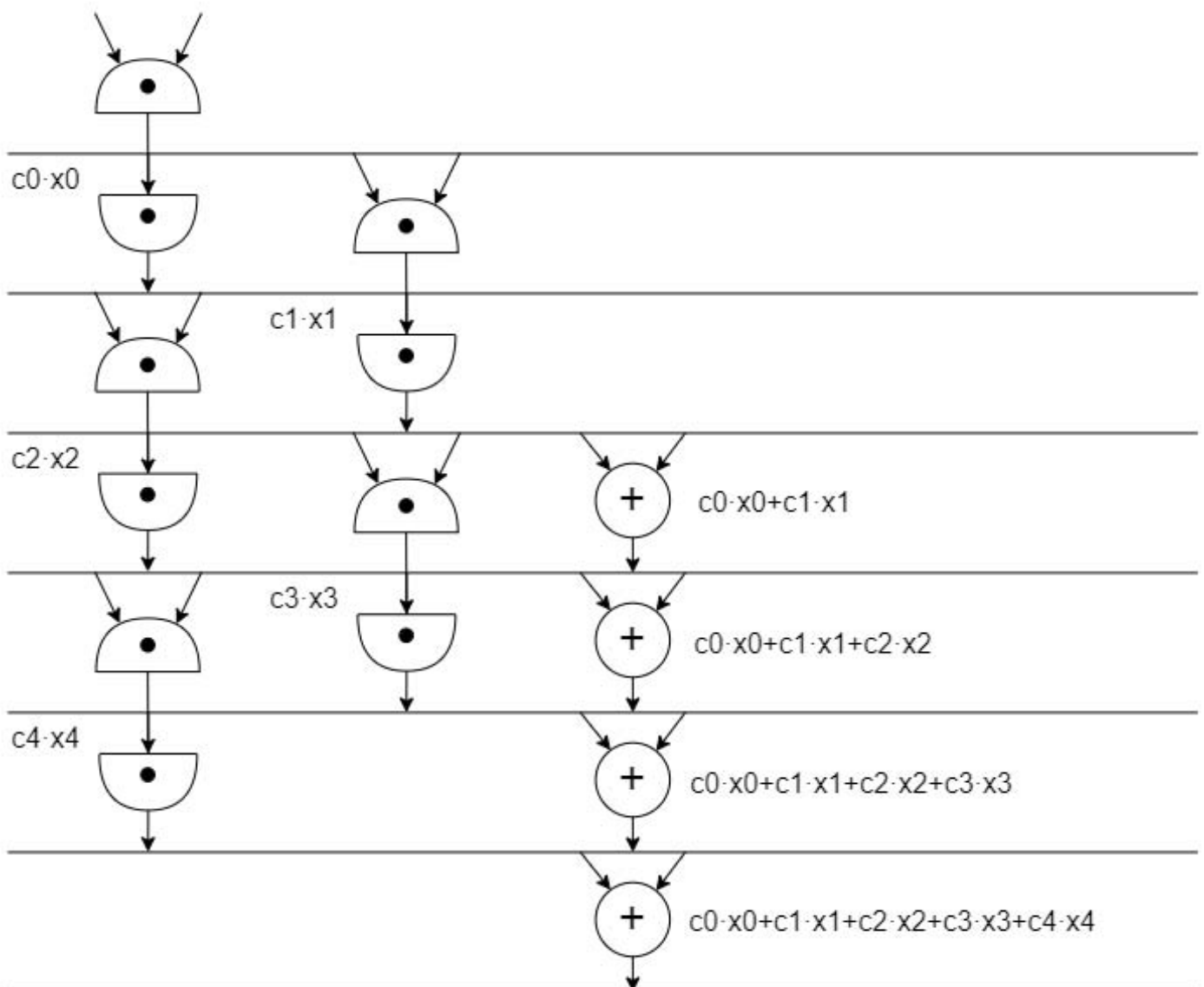
#### Tarea 2.2:



Realiza sobre papel la implementación de un filtro FIR de 5 etapas con la siguiente asignación: Dos medios multiplicadores y un sumador. Realiza todos los pasos descritos en la sección 6.4.

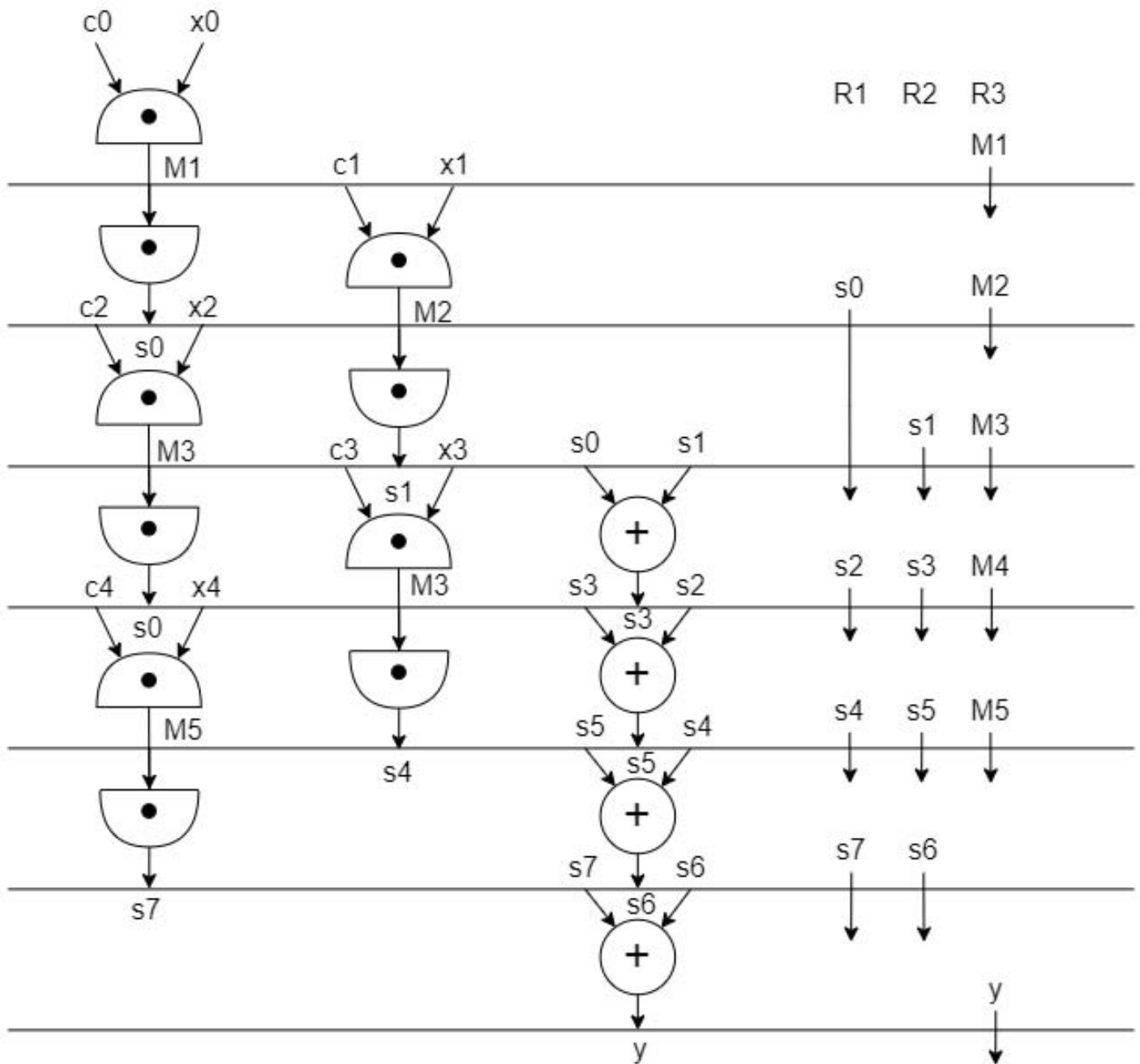


#### Planificación temporal:





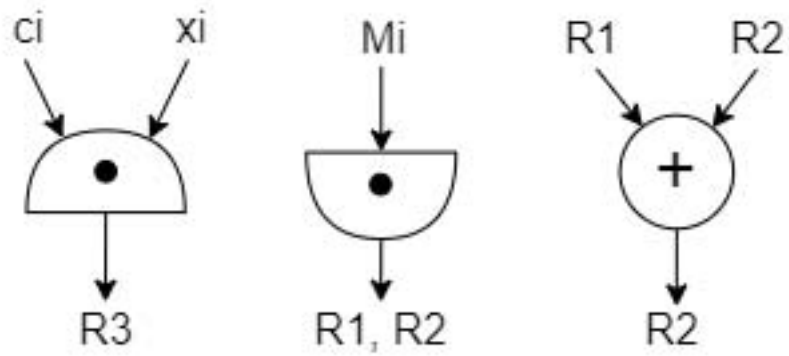
Vinculación, análisis de tiempo de vida de variables y asignación de registros:



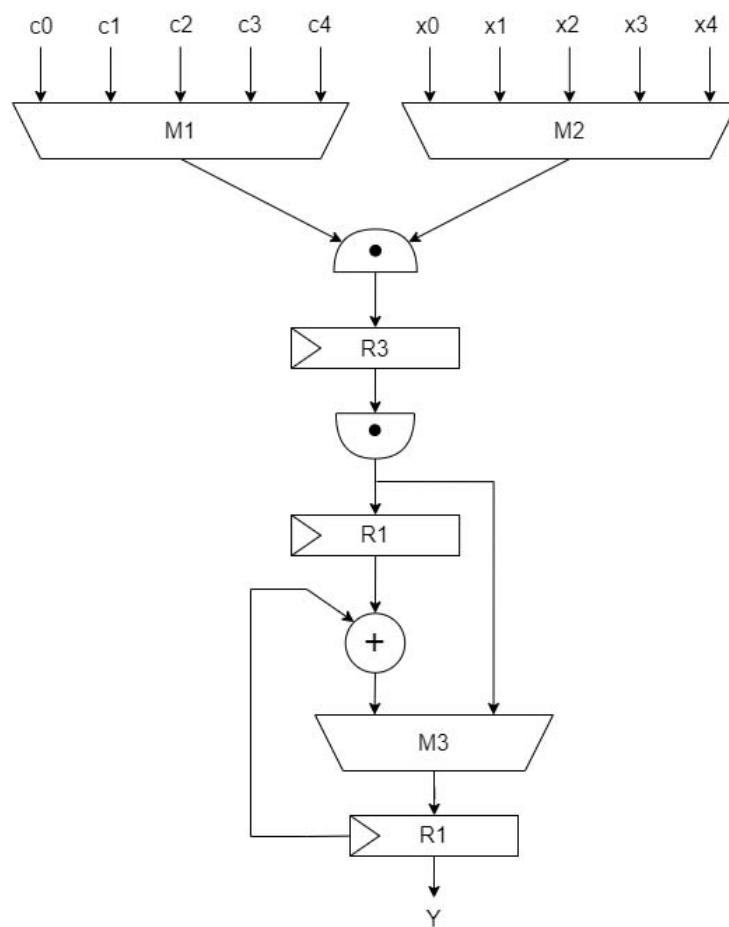




Análisis de conexiones para la extracción de multiplexores:



Implementación:





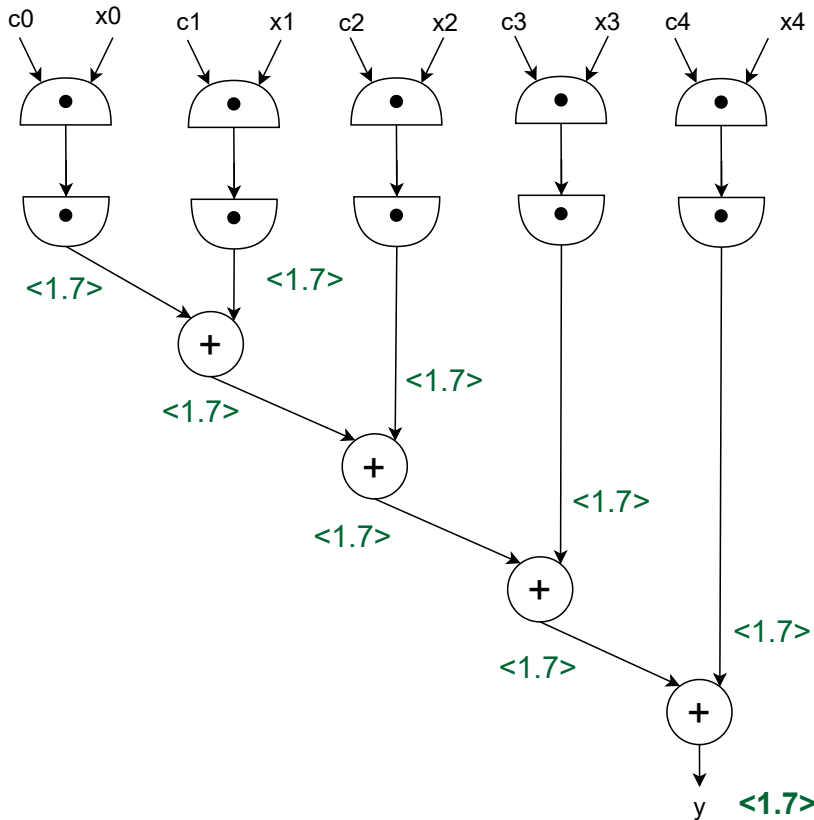
Cronograma:

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
M1	c0	c1	c2	c3	c4		
M2	x0	x1	x2	x3	x4		
M3			s1(0)	s3(1)	s5(1)	s6(1)	
R1							
R2			s2	s3	s5	s6	y
R3		M1	M2	M3	M4		

### Tarea 2.3:



Realiza un análisis de cuantificación de las señales, de manera que especifiques cuántos bits vas a emplear en cada señal y en qué posición va a estar el punto decimal. Emplea la notación y las metodologías presentadas en clase.



Conociendo el valor de los distintos coeficientes del filtro y los valores máximo y mínimo posibles de la señal de entrada, podemos estimar cuál es la representación necesaria para que la señal de salida tenga la resolución necesaria.

Si hubiésemos procedido empleando las ecuaciones estandarizadas nos saldría que la señal de salida necesita una resolución que emplea muchos más bits.

### Tarea 2.4:



Escribe modelos VHDL para todos los componentes que se emplean en tu ruta de datos. Los operadores aritméticos (suma y multiplicación) no necesitan describirse en un estilo estructural. Para conseguir el medio multiplicador, añade un registro extra a la salida de un multiplicador completo, de esta forma se comportará como un multiplicador perfectamente segmentado. La herramienta de síntesis se encargará de mover este registro al interior del multiplicador de manera óptima. Comprueba el funcionamiento correcto de tus componentes creando los correspondientes testbenches.

### Tarea 2.5:



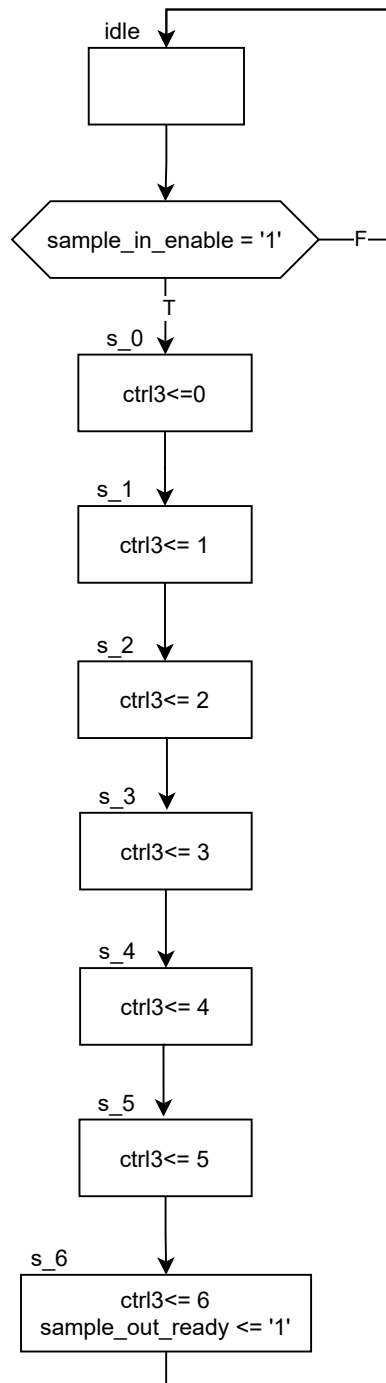
Escribe un modelo estructural de la ruta de datos completa en VHDL. Crea un testbench para la ruta de datos.

### 6.7.2. Creación del controlador

#### Tarea 2.6:



Dibuja el diagrama de estados que describe el controlador de tu filtro FIR. Sigue la metodología de implementación de máquinas de estados finitos vista en clase.



**Tarea 2.7:**

Escribe el código VHDL correspondiente a tu controlador.

**Tarea 2.8:**

Escribe el código VHDL estructural correspondiente a tu filtro completo.

**Tarea 2.9:**

Escribe el código VHDL correspondiente a un testbench que introduzca un único impulso a la entrada de valor +0.5. ¿Qué secuencia esperas en Sample\_Out si en Sample\_In la secuencia es (0, 0, 0, 0, X, 0, 0, 0, 0)? Considera que X es el mayor/menor número positivo/negativo (cuatro casos) que se puede representar. Ten en cuenta la cuantificación de tus señales. Asegúrate de que tu diseño proporciona los valores esperados.

1 - 0  
2 - 0.0195  
3 - 0.1211  
4 - 0.22265  
5 - 0.1211  
6 - 0.0195

**Tarea 2.10:**

Escribe el código VHDL correspondiente a un testbench que introduzca en la entrada la siguiente secuencia (0, 0.5, 0, 0.125, 0, 0, 0, 0, ...). ¿Qué secuencia esperas en Sample\_Out para esta secuencia de entrada? Asegúrate de que tu diseño proporciona los valores esperados.

1 - 0  
2 - 0.0195  
3 - 0.1211  
4 - 0.227525  
5 - 0.151375  
6 - 0.0751625  
7 - 0.030275  
8 - 0.004875

### 6.7.3. Creación de un testbench avanzado

Si tuviéramos que hacer pruebas más exhaustivas para comprobar el funcionamiento de nuestro filtro, el empleo de los testbenches que hemos usado hasta ahora dejaría de ser práctico, principalmente por dos razones:

- Cada vez que necesitamos probar una secuencia de entrada nueva, tenemos que modificar y recompilar el testbench.
- Para comprobar que la secuencia de salida que obtenemos es la correcta, tenemos que haberla calculado a mano previamente y, después de ejecutar el testbench, tenemos que comprobar uno a uno que los datos son correctos.

Para solucionar estos problemas podemos echar mano de las opciones de escritura y lectura de ficheros de VHDL. Los ficheros a los que se accede desde un código VHDL pueden o bien contener datos de un único tipo (`std_logic_vector`, `integer`, `singed`, etc.) o bien pueden ser de tipo TEXT. Nosotros nos vamos a ocupar únicamente de este último tipo de archivos, los que contienen datos de tipo TEXT, que son ficheros ASCII. Los ficheros de tipo TEXT se leen línea a línea empleando `READLINE`, que guarda la línea que corresponda en una señal o variable de tipo `LINE`. Los fichero de tipo TEXT se escriben línea a línea empleando `WRITELINE`. Para extraer los datos contenidos en una señal/variable de tipo `LINE` se emplea `READ`, y la operación opuesta (escritura en un tipo `LINE`) se hace a través de `WRITE`. Tanto `READ` como `WRITE` funcionan con `bit`, `bit_vector`, `boolean`, `character`, `integer`, `real`, `string` y `time`.

Matlab escribe y lee los datos en notación decimal, legible por nosotros. Por lo tanto tenemos que convertir los datos del fichero que leamos desde entero (**integer**) a binario (**signed**). Para ello vamos a emplear la siguiente función del paquete `IEEE.NUMERIC_STD`:

- `my_signed <= to_signed(int_number,8)` donde `int_number` es el **integer** que queremos convertir, 8 es el número de bits que queremos que tenga nuestro vector y `my_signed` es el **signed** al que se le asigna la conversión.

De la misma forma, para escribir en el fichero, tenemos que convertir nuestros datos, que son **signed** a **integer**. Para ello emplearemos la siguiente función:

- `my_int <= to_integer(signed_number)` donde `signed_number` es el **signed** que queremos convertir, y `my_int` es el **integer** al que se le asigna la conversión.

A la hora de hacer la conversión entre **signed** y **integer** y viceversa, el programa no es capaz de trabajar con la representación `< 1,7 >` o con cualquier otra en punto fijo, siempre va a considerar la notación `< 8,0 >`, es decir, sin coma decimal. Esto implica que los datos del fichero estarán entre +127 y -128.

En el apéndice 1 puedes encontrar un ejemplo de testbench que lee de un fichero TEXT para que te hagas una idea de cómo funciona.

### Tarea 2.11:

Escribe el código VHDL correspondiente a un testbench que lea las muestras de un fichero y escriba los resultados en otro.



- Llama al fichero que contiene los datos de entrada “sample\_in.dat”; llama al fichero de salida “sample\_out.dat”.
- Rellena el fichero de entrada con una secuencia que introduzca un único impulso. Cada línea del fichero se corresponde con un dato.

### Tarea 2.12:

Utiliza el fichero “haha.wav” en Matlab para crear un fichero de entrada para tu testbench. En el apéndice 2 se detallan las secuencias que tienes que emplear en Matlab para:



- Cargar un fichero de audio en Matlab y crear otro fichero con el formato necesario para tu testbench.
- Utilizar la función *filter* de Matlab para obtener la respuesta de un filtro FIR con precisión real.
- Cargar y escuchar la salida que ha producido tu testbench en Matlab.

### Tarea 2.13:



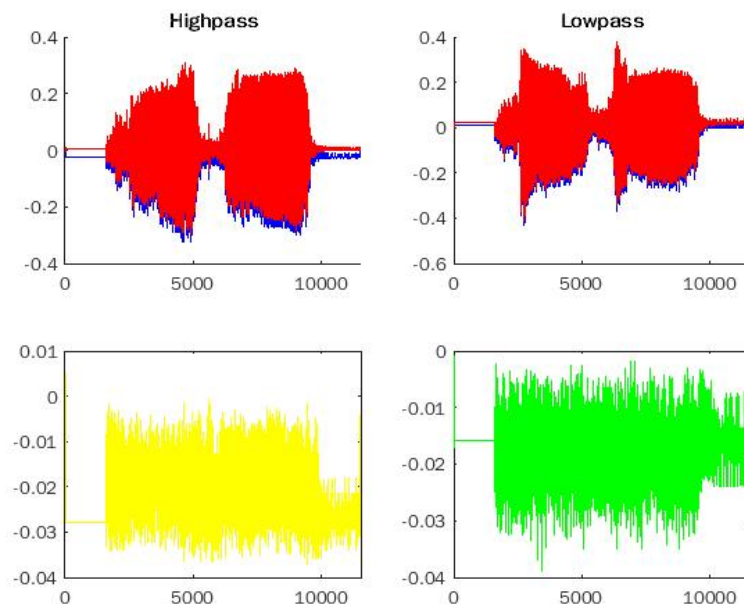
Emplea tu testbench para procesar el fichero de entrada que te ha proporcionado Matlab. Escribe los datos filtrados en el fichero “sample\_out.dat”, que importarás posteriormente en Matlab.

### Tarea 2.14:



Importa tu fichero “sample\_out.dat” en Matlab. Compara los resultados del testbench con los valores con precisión real proporcionados por la función *filter* de Matlab. Haz un gráfico del error de tus resultados (resta tus resultados de los datos con precisión real).

Utiliza la función *sound* de Matlab para escuchar la forma de onda original. Compárala después con tu sonido filtrado y observa si hay alguna diferencia entre el filtro con precisión real y tu filtro.



## 7. Bloque 3: Controlador y Memoria

En este tercer bloque se va a terminar de dar forma al sistema de audio. En concreto, se va a añadir al diseño un core IP que va a encapsular una memoria RAM donde almacenar las muestras de audio, se va a diseñar un controlador que orqueste todas las operaciones del sistema y se va a integrar todos los elementos.

El diseño del controlador está completamente abierto y se proporciona al estudiante la posibilidad de practicar las habilidades adquiridas a lo largo del curso, diseñando el sistema desde cero teniendo en cuenta el conjunto de especificaciones que lo definen.

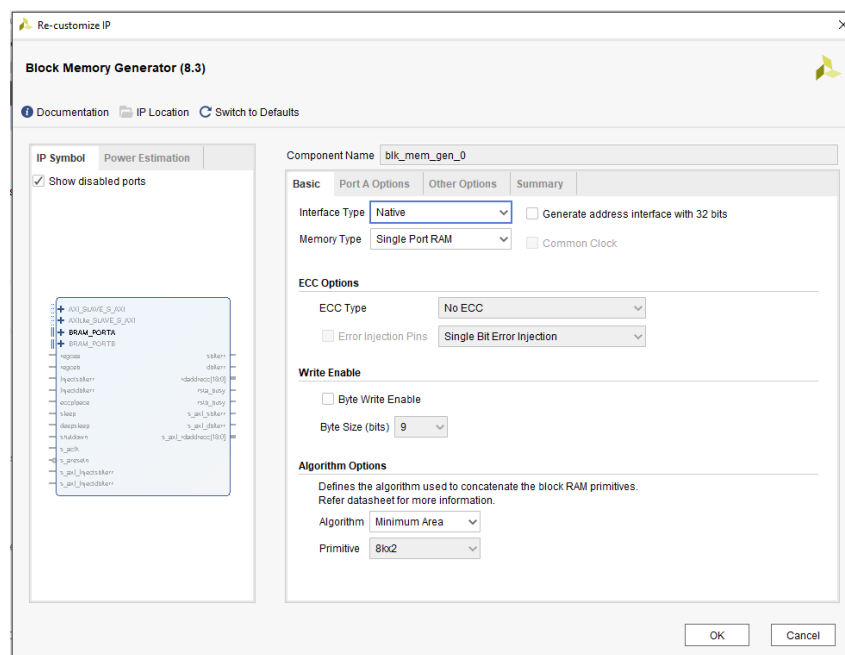
### 7.1. Memoria RAM

Las muestras grabadas se van a almacenar en una memoria RAM. Las características de la memoria son las siguientes:

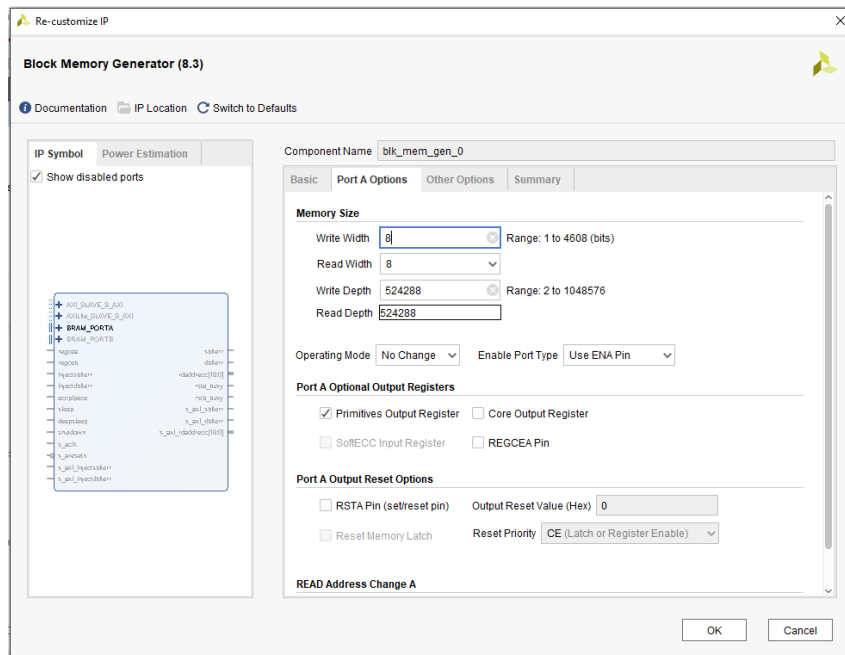
- Tamaño de cada palabra almacenada: 8 bits.
- Tamaño del bus de direcciones: 19 bits.
- Número de palabras almacenadas.  $2^{19} = 524288$ .
- Tamaño en bits de la memoria:  $2^{19} * 8 = 4194304$ .

Para instanciar esta memoria en nuestro diseño se va a emplear el “IP Catalog” del Vivado, donde hay que buscar la siguiente opción: “Memories and Storage Elements”, “RAMs and ROMs and BRAM”, Block Memory Generator.

La siguientes dos imágenes muestran la manera de configurar el asistente para encapsular la memoria que se requiere.





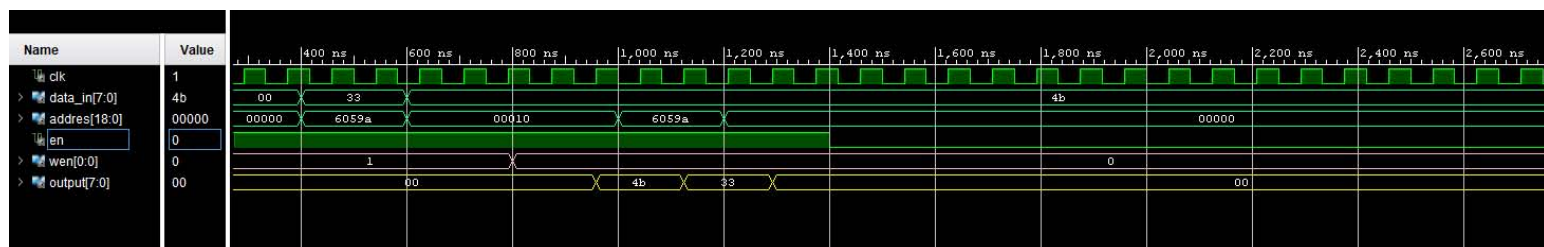


### Tarea 3.1:



Crea un testbench que trabaje a la frecuencia del sistema para comprobar y entender el funcionamiento de la memoria encapsulada. Anota a continuación la función de cada puerto y la temporización de la memoria (un pequeño cronograma que incluya una escritura y una lectura).

- clka: reloj del sistema
- ena: enable de todo el módulo síncrono
- wena: write enable, síncrono con el enable del módulo
- addra: dirección de memoria para lectura (ena=1, wena=0) o escritura (ena=1, wena=1).
- dina: dato de entrada que se lee y archiva en caso de escritura
- douta: dato de salida en caso de lectura



**Tarea 3.2:**

Determina cuánto tiempo de grabación va a poder estar almacenado en la memoria.

$$f_{\text{sampling}} = 3\text{MHz}/150 = 20\text{KHz}$$

La memoria RAM tiene  $2^{19} = 524288$  valores disponibles

$$\text{Se puede almacenar: } T = 524288 / (20\text{KHz}) = 26.2199 \text{ s}$$

## 7.2. Conversión entre codificaciones

En el Bloque 1 se obtienen datos de la interfaz del micrófono que utilizan una codificación binaria de 8 bits. Esta misma codificación se emplea en la interfaz de salida de audio. En el bloque 2, sin embargo, el filtro FIR necesita utilizar una representación en complemento a dos para poder usar coeficientes tanto negativos como positivos. Además, los datos están normalizados, de tal manera que el máximo valor con el que trabaja es 1, con lo que emplea un esquema de cuantificación  $< 1,7 >$  en complemento a dos.

Sin embargo, estos dos bloques van a estar trabajando con las mismas muestras (las obtenidas por el micrófono) y, por lo tanto, tenemos que buscar un mecanismo para convertir entre una codificación y otra.

La primera transformación que necesitamos hacer es convertir muestras en notación binaria a muestras en notación en complemento a dos y viceversa. La representación binaria tiene un rango de  $[0 \rightarrow 2^8 - 1]$  mientras que la representación en complemento a dos tiene un rango de  $[-2^7 \rightarrow 2^7 - 1]$ , la correspondencia de las muestras de una representación a otra es directa, es decir al elemento menor de una representación le corresponde el elemento menor de la otra ( $00000000_b$  se corresponde con  $10000000_{2c}$ ), el siguiente con el siguiente y así sucesivamente hasta el mayor ( $11111111_2$  se corresponde con  $01111111_{2c}$ ).

**Tarea 3.3:**

Determina qué operación es necesaria para hacer la transformación de las muestras de binaria a complemento a dos y de complemento a dos a binaria.

Para transformar a complemento a dos únicamente hay que negar el primer bit de la palabra y el resto se mantienen.

La siguiente transformación consiste en pasar de un esquema  $< 8,0 >$  a un esquema  $< 1,7 >$ . Pero, ¿es realmente necesario realizar algún cambio en nuestros datos? El lugar donde colocamos el punto decimal es una abstracción que nos permite calcular el valor en base 10 equivalente y con él ajustar el valor de los coeficientes del filtro, pero el hardware se va a ser idéntico sin importar el lugar del punto decimal. Por lo tanto, esta segunda transformación no es necesaria, la primera sí.

### 7.3. Controlador y sistema global

El controlador es el único módulo del proyecto donde el proceso de diseño no está guiado y es la última pieza del puzzle para construir el sistema global. A partir de las especificaciones dadas en la sección 2 y conociendo las funcionalidades y las interfaces de los distintos bloques, decide cómo vas a implementar la funcionalidad del controlador. En concreto, decide que estilo de diseño vas a utilizar (máquina de estados, máquina de estados con ruta de datos asociada, un sistema con distintos elementos secuenciales, etc.), divide el diseño de tal manera que lo puedas ir implementando de manera progresiva añadiendo funciones nuevas cuando estén aseguradas las anteriores, planifica cómo vas a comprobar el funcionamiento de cada especificación y haz una planificación temporal.



#### **Tarea 3.4:**

Añade a continuación todas las hojas necesarias para describir tu diseño y la planificación para llevarlo a cabo. Puedes incluir diagramas esquemáticos, cronogramas explicativos, un plan de pruebas, una planificación temporal y todo lo que consideres necesario para explicar las decisiones que has tomado.

Avisa al profesor antes de comenzar con el diseño para obtener el visto bueno.



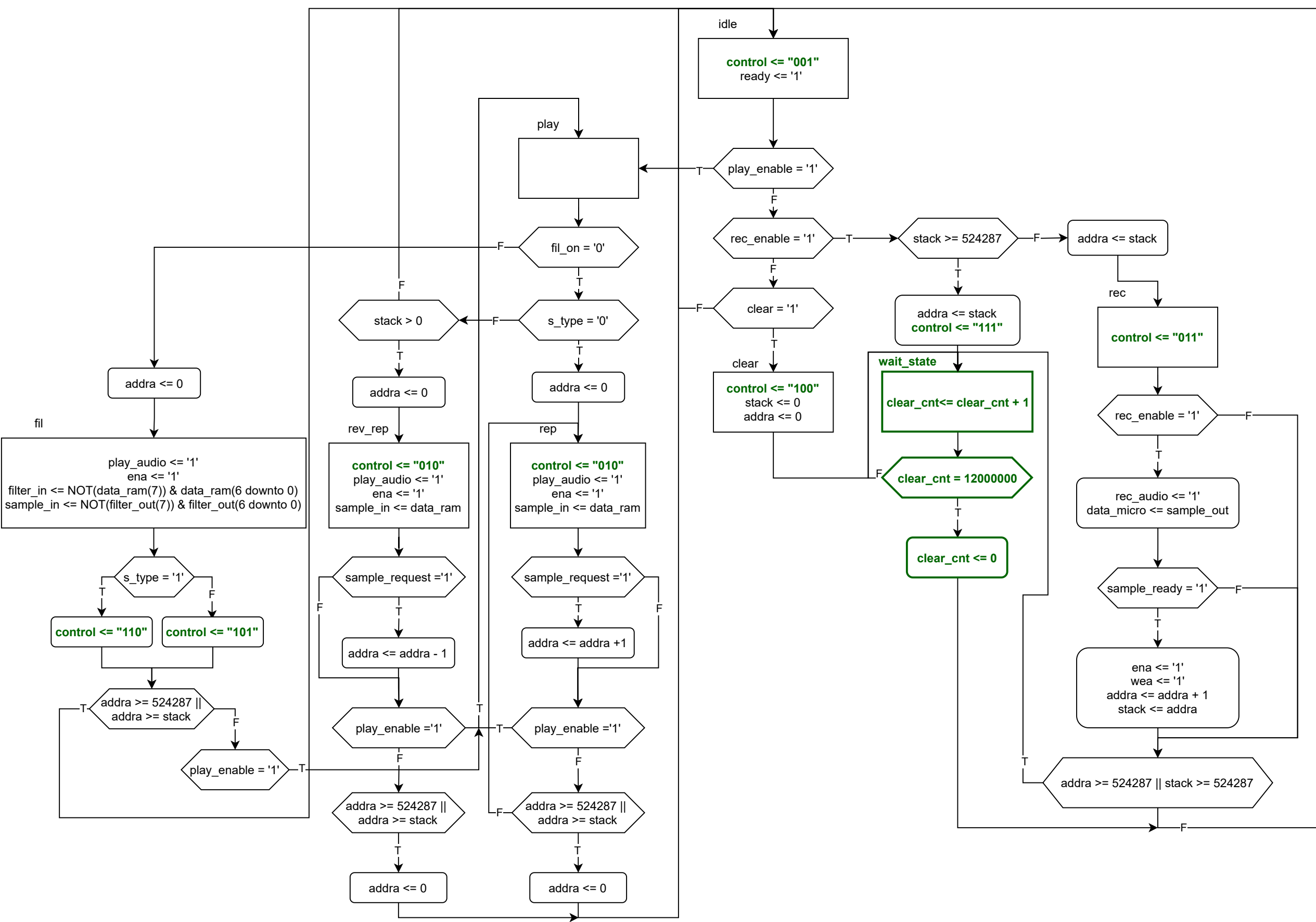
#### **Tarea 3.5:**

Avisa al profesor cuando tengas todas las especificaciones mínimas del sistema global cubiertas.



#### **Tarea 3.6:**

Sube al Moodle un fichero .vhd con todas las fuentes de tu proyecto.



Añadimos además de las salidas del controlador básico una señal ready que se asigna al LED15 para identificar el estado idle.

Para desarrollar el controlador global desarrollamos una máquina de estados FSM cuyos estados son:

- IDLE : estado de reposo mientras no se pulsan botones.
- REC : mientras *rec\_enable* sea '1' se permanece en este estado donde se habilita el *audio\_interface* recogiendo el *micro\_data* y escribiendo *sample\_out* en la RAM incrementando el puntero de direcciones de memoria *addra\_reg*. En este estado también se almacena la dirección del último registro escrito (*stack\_reg*) en la memoria para la próxima vez que se grabe a partir de esa dirección.
- CLEAR : se inicializan los punteros *stack\_reg* y *addra\_reg* a 0 para volver a grabar.
- PLAY: es un estado intermedio para gestionar las distintas modalidades de reproducción, solo se pasa por este estado durante un ciclo de reloj una vez se ponga a '1' la señal *play\_enable*. Para todos los estados que parten de este, se toma la muestra del output de la memoria y se pasa (con filtrado o sin filtrado) al *audio\_interface* como *sample\_in* para su reproducción;
  - REP : reproducción en orden incrementando la dirección de memoria *addra\_reg* partiendo de cero, reproduce hasta que se alcance la máxima dirección de memoria o la última dirección donde se escribió , es decir, cuando se haya reproducido todo lo grabado previamente.
  - REV : reproducción al revés, se parte de la última dirección escrita almacenada *stack\_reg* y se decrementa hasta llegar a cero.
  - FIL : dependiendo de la disposición del SW0 estando el SW1=1 se utiliza un tipo de filtrado u otro. Incrementando *addra\_reg* se van sacando los datos de la memoria, y pasandolos como input al bloque del filtro FIR. La salida se pasa a el *audio\_interface* con cada flanco de subida de la señal *sample\_out\_ready* del filtro. Análogamente al estado REP se reproduce hasta que se alcance la máxima dirección de memoria o la última dirección de grabación.

Extras debido a las mejoras:

- WAIT\_STATE: este estado fue creado con el único propósito de representar señales de control durante un segundo como consecuencia de la mejora “**Señales de control en el display**”. En el diseño básico sin este estado, todas las ramas que se dirijan a este estado se dirigirán directamente a idle y como puede observarse, la señal que se modifica en este estado (*clear\_cnt*) no influye en el funcionamiento del esquema básico si no que son meramente parte de esta mencionada mejora.
- Señales de color verde: al igual que el *wait\_state*, la señal *s\_control* es una señal auxiliar para el bloque **Señales de control en el display** y su función no está relacionada con el funcionamiento base.

Para que el código fuera más amigable y fácil de entender, hemos reasignado el nombre de las entradas, cuya equivalencia con las propuestas es:

BTNL = *rec\_enable*  
BTNU = *reset*  
BTNC = *clear*  
BTNR = *play\_enable*  
SW1 = *fil\_on*  
SW0 = *s\_type*

## 8. Mejoras opcionales

Una vez conseguidas las especificaciones básicas, los alumnos interesados pueden ampliar el diseño con mejoras. Las mejoras pueden ser propuestas por los propios alumnos o basarse en la lista que se proporciona a continuación. Las mejoras se evaluarán en función de su nivel de dificultad, sumarán a la nota general del proyecto y se tendrán en cuenta para la asignación de las matrículas de honor del curso.

### 8.1. Control de volumen logarítmico

Especificaciones mínimas:

- Al sistema se le incorporan dos botones de control, uno correspondiente a subir volumen y otro correspondiente a bajar volumen.
- El sistema muestra en todo momento el nivel de volumen en dos displays de 7 segmentos.
- El sistema tiene 21 niveles de volumen, el 0 correspondiente a silencio, el 10 correspondiente al volumen original y el 20 correspondiente a 8 veces el volumen original.
- El control de volumen es logarítmico para adaptarse a la percepción del oído humano. En concreto el factor por el que se multiplica el volumen vendrá dado por la siguiente fórmula:

$$factor = \frac{7^{\frac{nivel}{10}} - 1}{7 - 1} \quad (3)$$

donde nivel es el nivel de volumen actual.

- El control de volumen es independiente al resto del sistema y puede funcionar en cualquier momento, por ejemplo mientras se está reproduciendo o grabando.

### 8.2. Eco y reverberación configurables

Especificaciones mínimas:

- Al sistema se le incorporan dos botones de control, uno correspondiente a aumentar el eco/reverberación y otro correspondiente a reducirlo.
- El sistema muestra en todo momento el nivel de eco/reverberación en dos displays de 7 segmentos.
- El sistema tiene 21 niveles de eco/reverberación, el 0 correspondiente a la ausencia de efecto y cada nivel va aumentando  $100\mu s$ , de tal manera que el retardo de la segunda muestra viene dado por:

$$retardo = nivel * 100\mu s \quad (4)$$

- La segunda muestra será igual a la primera con una reducción de volumen del 25 %;

### 8.3. Información de segundos restantes

Especificaciones mínimas:

- El sistema muestra en dos displays de 7 segmentos la cantidad de segundos restantes en la memoria de grabación.
- En los últimos tres segundos se emite un pitido breve ( $250\mu s$ ) en la salida de audio y cuando la memoria está vacía se emite el pitido constantemente.

### 8.4. Looper

Especificaciones mínimas:

- El sistema se le incorpora un switch de control para encender el modo looper y un led de salida a modo de metrónomo.
- En el modo looper, al pulsar el botón de reproducción:
  - El sistema primero reproduce cuatro pitidos breves ( $250\mu s$ ) separados 1s para avisar del comienzo y marcar el ritmo inicial. A la vez que suenan los pitidos breves, se activará el led metrónomo.
  - Seguidamente el sistema reproducirá todo lo almacenado en la memoria de principio a fin en bucle, es decir, cuando llegue a la dirección final volverá a la inicial indefinidamente. Durante el tiempo de la reproducción el led metrónomo se encenderá brevemente cada segundo sincronizado con el principio de la grabación.
  - El bucle se detiene cuanto se pulse de nuevo el botón de reproducción.
  - Si la memoria está vacía, sonarán los cuatro pitidos iniciales y el sistema se quedará sin reproducir nada, pero con los leds parpadeando hasta que se vuelva a pulsar el botón de reproducción.
- En el modo looper, el botón de grabación sólo tiene efecto mientras se está reproduciendo. La funcionalidad es la siguiente:
  - Al pulsar el botón lo que se registre en el micrófono se mezclará con lo que está sonando en ese momento (el valor digitalizado se suma al valor almacenado en la memoria y se guarda el resultado de la suma en la misma posición de memoria).
  - Si se mantiene el botón de grabación pulsado al llegar el final de la grabación anterior: Durante el tiempo que esté el botón pulsado se detiene la reproducción, los leds siguen parpadeando y lo que se recoja del micrófono se guarda en posiciones nuevas de la memoria. Al soltar el botón se reanuda la reproducción en bucle volviendo al principio.

#### **Tarea 3.7 (Opcional):**



Añade a continuación todas las hojas necesarias para describir las mejoras que hayas implementado.



## 1. Ecualizador con LEDS

Utilizando 15 de los 16 LEDS amarillos disponibles, disenamos un ecualizador de audio en el que dado el margen de la senal de salida del modulo del PWM, dividimos en intervalos de 6 posibles valores entre 96 y 174. Para valores superiores a 174 se encenderán todos los LEDS y para menores a 96, ninguno de ellos, teniendo un total de 15 posibles niveles de encendido, incrementando un led con cada escalón de cuantificación.

Para llevar a cabo este diseño creamos una entidad “*boometro.vhd*” con la siguiente declaración;

```
entity boometro is
  Port (
    clk : in std_logic;
    audio_in : in std_logic_vector(sample_size-1 downto 0);
    reset : in std_logic;
    enable : in std_logic;
    leds_out : out std_logic_vector(14 downto 0)
  );
end boometro;
```

Que funciona con el reloj del sistema, se conecta con una señal intermedia que recibe a *sample\_in*. Dado que la señal de audio varían más rápido de lo que podría apreciar la vista humana, hemos creado una señal *en\_500ms* que se activa durante un ciclo cada 300000 ciclos de reloj que junto con la senal *play\_audio* habilitan en encendido y apagado de los LEDS.

Cabe destacar que el ecualizador está cuantificado para los valores de la señal sin filtrar por lo que es mucho más sensible a las variaciones durante la reproducción sin filtrado. No obstante, se puede seguir apreciando sobre todo con el filtrado paso bajo la variación de los LEDS aunque sin ocupar todo el margen dinámico, que al tener los mismos escalones de cuantificación, baja la precisión.

## 2. Señales de control en el display

Utilizando el display de 7 segmentos y 8 dígitos, hemos creado un bloque para representar señales de control dependiendo de lo que se está ejecutando en la placa en ese momento. Por simplicidad hemos escogido palabras de control que fuesen representativas y visualmente reconocibles dado el formato del display.

La declaracion de la entidad “*display\_controller*” es la siguiente.

```
entity display_controller is
  Port (
    clk : in std_logic;
    rst : in std_logic;
    control : in std_logic_vector(2 downto 0);
    on_display : in std_logic;
    an : out std_logic_vector(7 downto 0);
    display : out std_logic_vector(6 downto 0)
  );
end display_controller
```

Para desarrollar esta tarea y asignar los valores de la señales de salida, nos hemos documentado con [Manual de usuario Nexys4 DDR](#) de Moodle y los documentos del laboratorio 5.

Dado que solo se puede encender un único ánodo a la vez, creamos una máquina de estados para ir variando de letra y ánodo con cada estado cada 64000 ciclos de reloj (aproximadamente cada 5 milisegundos), volviendo a la primera letra tras representar la última, creando así, la sensación de que están todos encendidos al mismo tiempo y sea legible la palabra de control

Utilizando una señal de control de 3 bits *s\_control* que se incorporó al esquema global, que se modifica dentro de la máquina de estados del controlador global

Señal de control	Estado	Palabra
001	idle	READY
010	rep when SW0=0 & SW1=0    SW0=1 && SW1=0	PLAY
011	rec	RECORD
100	clr	CLEAR
101	rep when SW1=1 & SW0=0	FIL LP
110	rep when SW1=1 & SW=0	FIL HP
111	wait when full memory	FULL

### 3. Personalización del diseño

A manera de adaptar el diseño global a nuestro criterio personal incorporamos unos cambios en el funcionamiento básico;

- Estado de espera *wait\_state*; creamos este estado que al entrar se permanece durante 1 segundo, para poder representar dos señales de control que considerábamos relevantes.

FULL : cuando se está grabando y se llega a la dirección máxima de la memoria o cuando ya se ha alcanzado esta dirección y hemos vuelto al estado *idle*, buscábamos informarle al usuario que la memoria estaba llena y que procediera a hacer un clear de la memoria, por ello se pasa a este estado de espera retornando al estado idle tras 1 segundo.

CLEAR : una vez pulsado el botón de clear, para avisar al usuario que el borrado de memoria ha sido efectivo representamos esta señal durante 1 segundo a través del *wait\_state*.

Dado que *wait\_state* sirve tanto para el borrado y el llenado de la memoria, introducimos un registro para la señal de *s\_control\_reg* para poder mantener este valor con el cambio de estado.

- Reproducir de nuevo; consideramos que podría ser de utilidad poder interrumpir la reproducción para empezar desde cero, por ello introducimos un *if statement* en la reproducción al derecho y al revés y con filtrado para volver

al estado de control de las reproducciones, estado *play*, en el caso de que se quiera empezar de nuevo sin tener que escuchar todo lo grabado, o cambiar la modalidad de reproducción.

- Cambio del filtrado durante la misma reproducción; dado que creamos un único estado para la reproducción con filtro, hemos decidido diseñarlo de manera de que mientras se reproduce se pueda cambiar el tipo de filtrado de paso bajo a paso alto y viceversa sin necesidad de empezar desde cero, y así poder tener una interacción más dinámica con ambos filtros.

## 9. Apéndice 1

Ejemplo de testbench que lee de un fichero de texto. Recuerda meter la ruta completa del fichero que quieras leer o escribir.

```
LIBRARY ieee;
USE ieee.std_logic_1164.ALL;
use ieee.numeric_std.all;
use std.textio.all;

ENTITY ejemplo_tb IS
END ejemplo_tb;

ARCHITECTURE behavior OF ejemplo_tb IS
    -- Clock signal declaration
    signal clk : std_logic := '1';

    -- Declaration of the reading signal
    signal Sample_In : signed(7 downto 0) := (others => '0');

    -- Clock period definitions
    constant clk_period : time := 10 ns;

BEGIN

    -- Clock statement
    clk <= not clk after clk_period/2;

    read_process : PROCESS (clk)
        FILE in_file : text OPEN read_mode IS "sample_in.dat";
        VARIABLE in_line : line;
        VARIABLE in_int : integer;
        VARIABLE in_read_ok : BOOLEAN;
    BEGIN
        if (clk'event and clk = '1') then
            if NOT endfile(in_file) then
                ReadLine(in_file,in_line);
                Read(in_line, in_int, in_read_ok);
                sample_in <= to_signed(in_int, 8); -- 8 = the bit width
            else
                assert false report "Simulation Finished" severity failure;
            end if;
        end if;
    end process;

END;
```

## 10. Apéndice 2

Comandos Matlab que se emplean en el bloque 2.

Carga de un fichero .wav en Matlab y creación de otro fichero con el formato que emplea el testbench.

```
[data, fs] = audioread('haha.wav');  
file = fopen('sample_in.dat','w');  
fprintf(file, '%d\n', round(data.*127));
```

Utilización de la función *filter* de Matlab para obtener la respuesta de un filtro FIR con precisión real.

```
test = filter([0.5, -0.5, 1.0, -0.5, 0.5],[1, 0, 0, 0, 0], data);  
sound(test);
```

Recuerda modificar este comando con los coeficientes de los filtros que vayas a utilizar.

Carga y escucha de un fichero con el formato de salida del testbench. Atención, es importante no olvidar la división por 127 para no destruir los altavoces.

```
vhdlout=load('sample_out.dat')/127;  
sound(vhdlout);
```