

Introducción al Lenguaje VHDL y al Laboratorio Remoto de Sistemas FPGA

HISTORIAL DE REVISIONES

NÚMERO	FECHA	MODIFICACIONES	NOMBRE
v1.0.0	2022 Marzo 1		CA

Índice

1. Agradecimientos	1
2. Introducción	2
3. Apuntes VHDL	2
4. Tutorial light de Quartus Prime Lite	2
5. Carpeta de Trabajo	2
6. Ayuda rápida	3
7. Tutorial quartus → light.vhd (I)	3
7.1. Diseño	3
7.2. lenguaje vhdl	4
8. Errores en el proceso de Compilación	4
9. Tutorial quartus → light_de1soc.vhd (II)	4
9.1. Diseño	4
9.2. Fabricación en el laboratorio remoto	6
9.3. Ejercicios	6
10. Tutorial quartus → light_signal.vhd (III)	6
10.1. Diseño	6
10.2. Análisis: Herramienta RTL Viewer	7
10.3. Ejercicios	8
11. Tutorial quartus → light.vhd (IV) : Simulación Modelsim-Altera	8
11.1. Simulación	8
12. Edición VHDL mediante Quartus utilizando plantillas de ayuda	9
13. Tutorial quartus → light_esa.vhd (V)	9
13.1. Diseño	9
13.2. Análisis	10
13.3. Ejercicios	11
14. Tutorial quartus → light_if.vhd (VI)	11
14.1. Diseño	11
14.2. Análisis	13
14.3. Ejercicios	13

15. Tutorial quartus → light_with.vhd (VII)	13
15.1. Diseño	13
15.2. Análisis	14
15.3. Ejercicios	14
16. Tutorial quartus → light_case.vhd (VIII)	14
16.1. Diseño	14
16.2. Análisis	15
16.3. Ejercicios	15
17. Multiplexor	16
17.1. mux2x1: arquitectura RTL	16
17.2. Análisis	16
17.3. mux4x1: arquitectura Behavioral	17
17.4. Análisis	17
17.5. mux4x1: arquitectura Estructural	19
17.5.1. Compilación en Quartus	21
18. Decodificador	22
18.1. Decoder Hex/Display_7_segmentos	22
19. Valores INDETERMINADOS X en la entrada y en la salida	23
19.1. Codificador con Prioridad	23
20. Diseños VHDL NO sintetizables en circuitos electrónicos	25
20.1. Introducción	25
20.2. Hello World	25
21. Flip-Flop	26
21.1. Memorias	26
21.2. VHDL: Flip Flop D con entradas asíncronas en lógica negativa	26
21.2.1. diseño	26
21.2.2. Implementación de unidades de MEMORIA	27
21.3. FF-D	27
22. Operación suma y multiplicación	29
23. Contador Síncrono	30
24. Cerradura Electrónica	30
25. Registros	33

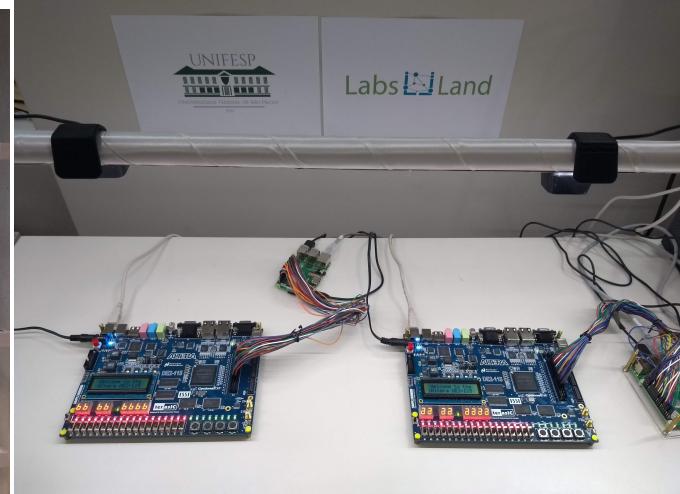
26. VHDL: Lenguaje para la Descripción de Hardware (Circuitos Digitales)	33
26.1. Documentación	33
26.2. Introducción	33
26.3. Circuito Digital "gate_and.vhdl"	34
26.4. Estructura del Programa: Librería-Entidad-Arquitectura	35
26.5. señal digital binaria	35
26.6. standard logic (std_logic): std_logic_1164	36
26.7. std_logic_vector : downto , to	37
26.8. Librería standard: paquetes STANDARD, TEXTIO	38
27. Sentencias Concurrentes	41
27.1. Ejemplo: Unidad de diseño "matricula.vhd"	41
27.2. Significado	41
28. Sentencias Secuenciales	42
28.1. Proceso/Process()	42
28.2. Ejemplo_1: matricula.vhd	42
28.3. Ejemplo_2: matricula.vhd	43
A. Herramienta Quartus	45
A.1. Instalación del software: Suite Quartus Prime Lite	45
A.1.1. En el PC personal	45
A.1.2. Quartus Prime Preinstalado en el Escritorio Virtual UPNA	45
A.1.3. Mac OS X	45
A.2. Editar un fichero VHDL	46
A.2.1. Operación básica	46
A.2.2. Insertar Plantillas de Sentencias VHDL	47
A.3. Crear un Proyecto a partir de un fichero vhd	47
B. Kit DE1-SoC	48
C. Laboratorio Remoto de Sistemas FPGA	49
C.1. Acceso	49
C.2. Objetivos	49
C.3. Paciencia	49
C.4. IDE VHDL Web del Laboratorio Remoto	49
C.5. Errores con el compilador del laboratorio remoto	51
C.6. Síntesis en el laboratorio remoto	53
C.7. Fabricación del Circuito Digital	54
C.8. Interfaz Web de Visualización de la Tarjeta y Manejo de Switches y Botones	55

D. Identificación de los puertos	56
E. Listado incompleto de sentencias concurrentes y secuenciales	58
F. VHDL: Hoja de Referencia Básica	60
G. Low-Carb VHDL Tutorial: Bryan Mealy	63
G.1. Examples Code	63
G.1.1. my_nand3	63
G.1.2. my_ckt_f3	63
G.1.3. my_ckt_f3	63
G.1.4. mux4_t1	64
G.1.5. my_ckt_f3	64
G.1.6. my_4t1_mux	64
H. Glosario	65

Cándido Aramburu <candido@unavarra.es>

1. Agradecimientos

El **Laboratorio Remoto de Sistemas FPGA** ha sido posible gracias a la colaboración de la Universidad Pública de Navarra, el Instituto Tecnológico de la Universidad Federa de Sao Paulo, a la empresa LabsLand y a la empresa Intel.



2. Introducción

- Estos apuntes sirven para iniciarse en el diseño y fabricación de circuitos electrónicos digitales mediante la descripción de los diseños en el lenguaje de descripción del Hardware VHDL y mediante la síntesis del código fuente con la herramienta de diseño "Quartus Prime Lite de Intel". El código fuente compilado se utiliza para programar los [dispositivos FPGA de Intel](#) disponibles tanto remotamente como localmente en los laboratorios de la UPNA.

3. Apuntes VHDL

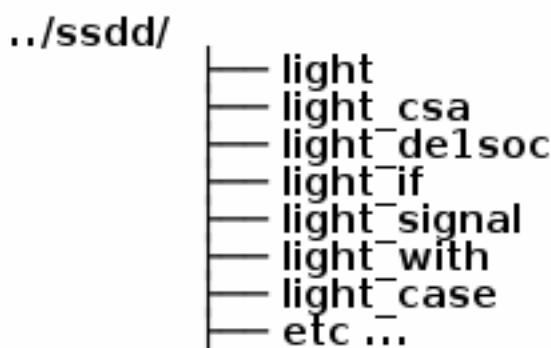
- Ir al apartado [VHDL: Lenguaje de Descripción Hardware \(Circuitos Digitales\)](#).

4. Tutorial light de Quartus Prime Lite

- Requisitos: Instalar Quartus Prime Lite y Device Installer (fichero cyclone V qdz) (Ver [Apéndice:Herramienta Quartus](#))
- Se va a utilizar el tutorial propio de Quartus como referencia para la práctica de la descripción VHDL como la utilización de "Quartus Prime Lite" y el "Laboratorio Remoto".
 - Quartus Prime Lite → Help → PDF tutorial → Users VHDL → "tutorial_quartusii_intro_vhdl.pdf" → imprimirlo y tomar notas sobre él mismo.
- Se van a realizar los siguientes diseños basados todos en el mismo circuito digital. La descripción del circuito se realizará mediante el lenguaje VHDL y se utilizará "Quartus Prime Lite" al igual que en tutorial_quartusii_intro_vhdl.pdf. La principal diferencia entre los distintos diseños es la arquitectura, donde se emplearán diferentes sentencias del lenguaje VHDL.
 1. light
 2. light_de1soc
 3. light_signal
 4. light_csa
 5. light_if
 6. light_with
 7. light_case
 8. light_sum

5. Carpeta de Trabajo

- En el disco del PC es necesario crear manualmente el árbol de carpetas donde se guardará cada proyecto de diseño realizado:



6. Ayuda rápida

- Es de gran ayuda disponer de una hoja de referencia con las principales sentencias del lenguaje VHDL como en el [Apéndice VHDL Sheet](#)

7. Tutorial quartus → light.vhd (I)

7.1. Diseño

- Descripción del circuito light mediante la Tabla de la Verdad: función **XOR**

x1	x2	f=x1 XOR x2
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

- Descripción del circuito light mediante una expresión matemática lógica
 - $f(x_1, x_2) = x_1 \oplus x_2 = x_1 \cdot \bar{x}_2 + \bar{x}_1 \cdot x_2$
 - $f(x_1, x_2) = x_1 \text{ xor } x_2 = x_1 * x_2'' + x_1'' * x_2$
- Descripción del circuito light mediante un esquema eléctrico o diagrama de bloques

Diagrama de Bloques

- CREAR EL PROYECTO "light" de Quartus Prime Lite:

- crear la CARPETA DEL USUARIO (no del sistema ni de las aplicaciones) **C:/..ssdd/light/** donde se guardará nuestro diseño quartus.
- abrir la herramienta de diseño Quartus Prime Lite
- crear proyecto: File → New project Wizard (creación y configuración guiada)
 - introduction → next
 - nombre proyecto: el mismo que el de la ENTIDAD vhdl: light
 - ubicación proyecto: ..ssdd/light/
 - nombre de la entidad top: light
 - empty project
 - add file → ninguno
 - board → DE1-SoC Board
 - simulation → modelsim-altera → format: vhdl
 - Salvar proyecto

- EDITAR el fichero vhd: File→ New → VHDL File → save as → nombre: light.vhd : **el mismo** que el de la entidad vhdl: light

- edición vhdl : copiar el código fuente del tutorial PDF "tutorial_quartusii_intro_vhdl.pdf" y pegarlo → corregir la edición ya que las copias desde un PDF no son literales → salvar
- Descripción del circuito light mediante el lenguaje VHDL

```

-- SSDD
-- Intel tutorial reference: light.pdf
-- Entity: ports
-- RTL architecture : signals, logic math expresion between ports :XOR
-- Candido Aramburu

library ieee;

```

```

use ieee.std_logic_1164.all;

ENTITY light IS
PORT(x1,x2 : IN std_logic ;
      f: OUT std_logic);
END light ;

ARCHITECTURE LogicFunction OF light IS
BEGIN
  f <= (x1 AND NOT x2) OR (NOT x1 AND x2)) ;
END LogicFunction ;

```

- añadir el módulo fuente light.vhd al proyecto light.
 - Project Navigator → Hierarchy → doble click en light.vhd → se abre el código fuente en el editor
 - cerrar quartus
- SINTESIS
- abrir quartus
 - abrir el proyecto light.qpf : File → Open Project → light.qpf
 - síntesis: Processing → Start Compilation

7.2. lenguaje vhdl

- Información sobre el lenguaje VHDL en el apartador [VHDL: Lenguaje de Descripción Hardware \(Circuitos Digitales\)](#)
- Cuestiones a tener en cuenta:
 - ¿qué es una entidad?, ¿ qué es una señal?, ¿qué es un puerto?, ¿qué es la arquitectura?
 - cuales son los valores posibles de una señal tipo std_logic del paquete std_logic_1164

8. Errores en el proceso de Compilación

- Errores al finalizar la compilación?
 - Ventana de Errores: View → Utility Windows → Messages → Pestaña processing (errores durante el procesado de compilación)
 - ir a la ventana Messages y buscar la línea ERROR para identificar el tipo de ERROR.
 - corregir el error y compilar ... repetir la depuración del código hasta que no haya errores de compilación.

9. Tutorial quartus → light_de1soc.vhd (II)

9.1. Diseño

- Se va a crear el nuevo proyecto light_de1soc con un nuevo módulo fuente light_de1soc.vhd
 - crear la carpeta nueva ..ssdd/light_de1soc.
 - copiar en la carpeta el ..ssdd/light_de1soc el módulo fuente ..ssdd/light/light.vhd y cambiar el nombre por light_de1soc.vhd
- Abrir Quartus Prime Lite.
 - File → Open → ssdd/light_de1soc/light_de1soc.vhd

Cambiar los nombres de los puertos para que sean los mismos que los del Kit DE1-SoC
puertos de entrada: bus de 2 switches con nombre SW
puerto de salida: bus de leds rojos con nombre LEDR
puertos de entrada: señal tipo "std_logic_vector (1 download 0)" y el de salida tipo "↔ std_logic_vector (0 download 0)"
entradas: señales con nombres lógicos SW(0) y SW(1) asociadas al cableado físico que ↔ conecta los switches 0 y 1 del Kit DE1-SoC a la entrada de la FPGA.
salidas: señal con el nombre lógico LEDR(0) asociado al cableado físico que conecta el ↔ led rojo del Kit DE1-SoC a una salida de la FPGA
arquitectura: relacionar lógicamente la señal digital de salida LEDR(0) con las señales ↔ digitales de entrada SW(0), SW(1)

- light_de1soc.vhd:

```
-- SSDD
-- Intel tutorial reference: light.pdf
-- Entity: ports
--- El puerto lógico SW(0) se conecta al switch 0 de la tarjeta FPGA
--- El puerto lógico SW(1) se conecta al switch 1 de la tarjeta FPGA
--- El puerto lógico LEDR(0) se conecta al led rojo 0 de la tarjeta FPGA
-- Función: el led se enciende sólo si uno de los switches de entrada está activo
-- RTL architecture : signals, logic math expresion between ports :XOR
-- Candido Aramburu

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

ENTITY light_de1soc IS
PORT(SW : IN std_logic_vector (1 downto 0) ;
      LEDR : OUT std_logic_vector (0 downto 0));
END light_de1soc ;

ARCHITECTURE LogicFunction OF light_de1soc IS
BEGIN
  LEDR(0) <= (SW(0) AND NOT SW(1)) OR (NOT SW(0) AND SW(1)) ;
END LogicFunction ;
```

- File → save → light_de1soc.vhd

- CREAR un nuevo PROYECTO

- File → New → Project → Wizard
 - Introduction → Next
 - Project Directory: ..\ssdd\light_de1soc\
 - Project Name: light_de1soc
 - top-level design entity name: light_de1soc
 - empty project
 - add file → ..\ssdd\light_de1soc\light_de1soc.vhd
 - board → DE1-SoC Board
 - simulation → modelsim-altera → format: vhdl
- Project Navigator → Hierarchy → doble click en light_de1soc → se abre el código fuente en el editor
- Project Navigator → Hierarchy → seleccionar fichero light.vhd → click dcha → eliminar el fichero light_primer.vhd del proyecto de quartus. No se elimina del disco.
- SINTESIS
 - Processing → Start Compilation

9.2. Fabricación en el laboratorio remoto

- Leer la información sobre la interfaz con el laboratorio remoto en el [Apéndice: Laboratorio Remoto](#)
- Conectarse al laboratorio remoto de FPGAs de la UPNA desde Miaulario.
 - UPNA → Miaulario → Herramientas → Laboratorio Remoto
- Una vez abierta la interfaz en el navegador:
 - crear el fichero con el código fuente light_de1soc.vhd

```
Eliminar todos los archivos del panel de archivos  
Crear el archivo vhd nuevo con el nombre light_de1soc
```

Editar o copiar el código fuente VHDL en área de edición.

```
En el panel de archivos seleccionar el fichero de diseño TOP de la jerarquía de ficheros ↪  
: light_de1soc.vhd
```

- SINTESIS
 - botón "Síntesis"
 - si ha habido errores, ir abajo, al final de los mensajes y buscar el mensaje del ERROR.
- PROGRAMAR la FPGA
 - botón "Enviar a la FPGA"
- VERIFICAR EL DISEÑO
 - utilizar los switches y botones virtuales para verificar el circuito digital fabricado en la fpga observando los leds y displays del KIT DE1-SoC.

9.3. Ejercicios

- ¿Qué señales son sensibles a que se ejecute la sentencia de asignación concurrente ?

10. Tutorial quartus → light_signal.vhd (III)

10.1. Diseño

- A partir del proyecto light_de1soc creamos el proyecto light_signal
 - crear la carpeta light_signal
 - copiar el módulo fuente light_de1soc.vhd en la carpeta ..//ssdd/light_signal/
 - cambiar el nombre del fichero light_de1soc.vhd por light_signal.vhd
- Abrir Quartus Prime Lite.
 - File → open → VHDL → light_signal.vhd
 - Código fuente: light_signal.vhd

```
-- SSDD
-- Intel tutorial reference: light
-- RTL architecture : logic math expresion
-- concurrent sentence : <=
-- Candido Aramburu

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

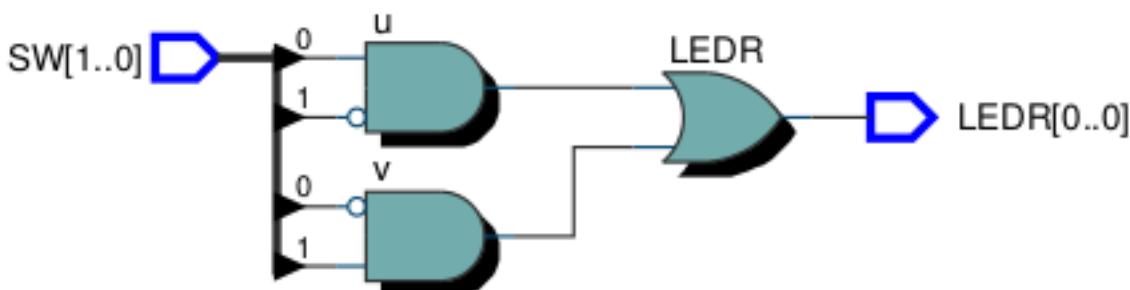
ENTITY light_signal IS
PORT(SW : IN std_logic_vector (1 downto 0) ;
      LEDR : OUT std_logic_vector (0 downto 0));
END light_signal ;

ARCHITECTURE LogicFunction OF light_signal IS
  signal u, v : std_logic ;
BEGIN
  LEDR(0) <= u OR v ;
  u <= SW(0) AND NOT SW(1);
  v <= NOT SW(0) AND SW(1);
END LogicFunction ;
```

- File → New → Project → Wizard
 - Introduction → Next
 - Project Directory: ..\light_signal\
 - Project Name: light_signal
 - top-level design entity name: light_signal
 - empty project
 - add file → ..\light_signal\light_signal.vhd
 - board → DE1-SoC Board
 - simulation → modelsim-altera → format: vhdl
- Project Navigator → Hierarchy → doble click en light_de1soc → se abre el código fuente en el editor

10.2. Análisis: Herramienta RTL Viewer

- Utilizar en cualquier proyecto el visor del circuito sintetizado: Quartus → Tools → Netlist Viewer → RTL viewer
 - Se visualiza un esquema eléctrico que no es literalmente la descripción del módulo fuente sino una descripción equivalente.



- interpretar los nombres lógicos del esquema netlist
 - interpretar los nombres de las señales internas
 - interpretar el símbolo que se utiliza para los puertos (señales externas)
- interpretar el símbolo de un bus de señales.

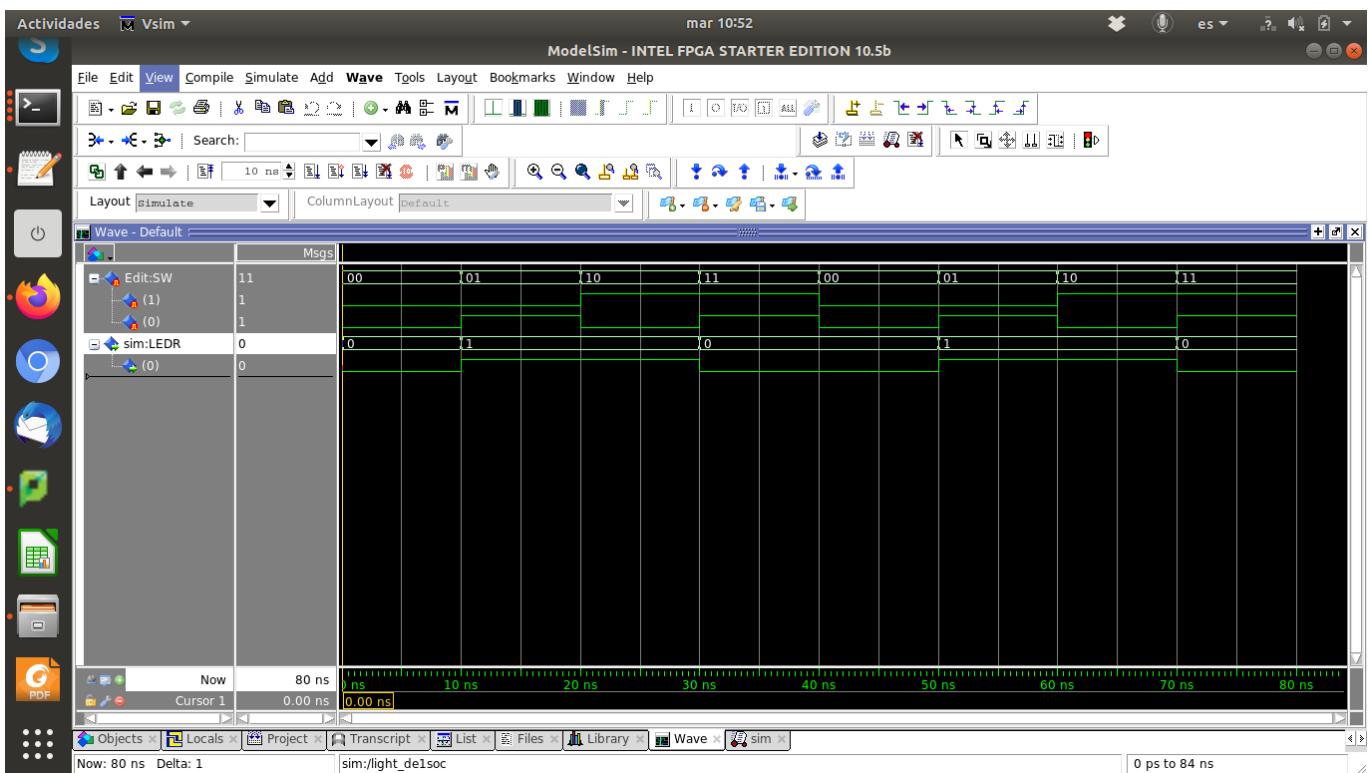
10.3. Ejercicios

- ¿Qué señales son sensibles a que se ejecute cada sentencia de asignación concurrente ?

11. Tutorial quartus → light.vhd (IV) : Simulación Modelsim-Altera

11.1. Simulación

- Simulación del diseño light_de1soc.
 - Abrir Quartus
 - Abrir el proyecto *light_de1soc.qpf* ubicado en la carpeta *./ssdd/light_de1soc* donde previamente he sintetizado el diseño *light_de1soc.vhd*
 - Configurar simulador Modelsim
 - Ha de estar instalado el simulador Modelsim
 - Quartus → Settings → Eda Tool Settings → Simulation → Tool Name: Modelsim-Altera
 - Quartus → Tools → options → general → eda tool options → modelsim-altera : seleccionar la carpeta donde esté instalado, por ejemplo → C:/intel_quartus/20.1/modelsim_ase/bin
 - generar fuentes del simulador
 - Processing → Start Compilation
 - Abrir el simulador Modelsim-Altera
 - Tools → Run Simulator Tool → RTL simulation → Abre el simulador Modelsim-Altera
- Modelsim Simulator
 - Ventana Transcript → mensajes del simulador y comandos del usuario. Interpretar lo realizado por el Simulador.
 - Ventana Library (View Library) → Work → Doble click en light → se carga el diseño que se va simular en la ventana Objects
 - Ventana Objects → seleccionar con el ratón la señal bus SW → click dcha, Modify → Apply Wave → Pattern: counter, start at 00, end at 80 ns, time unit ns, from 00 to 11, Period: 10ns, counter type binary, Direction: up , Repeat: Forever → Se añaden en la ventana Wave las señales seleccionadas
 - Ventana Wave → click dcha en el area del cronograma de las señales binarias → Zoom Range: 80ns
 - Ventana Objects → seleccionar con el ratón las señales de entrada salida LEDR(0) → Click dcha → Add Wave → se añade la señal de salida a la ventana Wave.
 - Ventana Wave: botones de la barra de herramientas → simular 80 ns, run , restart simulation, run.
 - Verificar que la señal de salida LEDR(0) es la esperada para los diferentes estímulos de entrada SW(0) y SW(1)
 - Ventana Transcript → mensajes del simulador y comandos del usuario. Interpretar lo realizado por el Simulador.



12. Edición VHDL mediante Quartus utilizando plantillas de ayuda

- Información en el apéndice

13. Tutorial quartus → light_csa.vhd (V)

13.1. Diseño

- Proyecto "light_csa"
 - El objetivo es describir literalmente la "Tabla de la Verdad" de la función del circuito.
 - Utilizamos la sentencia concurrente "Conditional Signal Assignment" (csa).
 - creo la carpeta ..\light_csa
 - copio el módulo fuente light_de1soc/light_de1soc.vhd en la carpeta ..\light_csa\light_csa.vhd con el nombre light_csa.vhd
- EDITO el módulo fuente ..\light_csa\light_csa.vhd
 - Abrir Quartus Prime Lite.
 - File → open → VHDL → light_csa.vhd
 - Cambiamos el nombre de la entidad → light_csa
 - Borramos el contenido de la arquitectura.
 - En la arquitectura la asignación a la señal LEDR(0) se edita mediante la herramienta *Insertar Plantilla* de la barra de herramientas del Editor.
 - Insert Template → VHDL → Constructs → Concurrent Statements → Conditional Signal Assignment (CSA)

```

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

ENTITY light_csa IS
PORT(SW : IN std_logic_vector (1 downto 0) ;
      LEDR : OUT std_logic_vector (0 downto 0));
END light_csa ;
ARCHITECTURE TablaVerdad OF light_csa IS
BEGIN
    <optional_label>: <target> <=
        <value> when <condition> else
        <value> when <condition> else
        <value> when <condition> else
        ...
        <value>;
END TablaVerdad ;

```

- Una vez insertada la plantilla la particularizo con las señales de mi diseño:

```

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

ENTITY light_csa IS
PORT(SW : IN std_logic_vector (1 downto 0) ;
      LEDR : OUT std_logic_vector (0 downto 0));
END light_csa ;

ARCHITECTURE TablaVerdad OF light_csa IS
BEGIN
    LEDR(0) <=
        '1' when SW(0)='0' AND SW(1)='1' else
        '1' when SW(0)='1' AND SW(1)='0' else
        '0'; -- CASO DEFAULT : NO es obligatorio

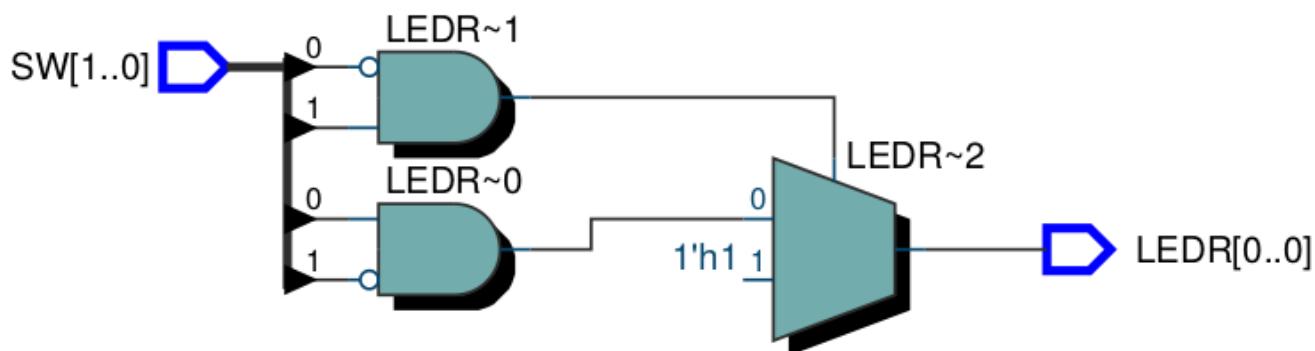
END TablaVerdad ;

```

- CREO el proyecto light_csa y le añado el fichero light_csa.vhd
- SINTETIZO : Processing → start compilation

13.2. Análisis

- VISUALIZACION: Tools→ Netlist Viewer → RTL viewer



- interpretar los nombres lógicos:

LEDR~0, LEDR~1, LEDR~2

- son los nombres de las señales a la salida de las tres puertas. Son señales internas del circuito que ha sido definidas por el propia aplicación Quartus.
- 1h1 → el primer dígito es el número bits y el último dígito es el valor en hexadecimal
- observamos que en el diagrama eléctrico utiliza un "multiplexor" digital. El esquema eléctrico es una descripción mediante componentes básicos digitales interconectados a diferencia de la descripción mediante la Tabla de la Verdad en el código VHDL.
 - La tabla de la verdad es una descripción funcional
 - Las puertas lógicas y otros bloques digitales interconectados es una descripción RTL (Register Transfer Level).

13.3. Ejercicios

- ¿Qué señales son sensibles a que se ejecute la sentencia de asignación condicional CAS ?
- ¿Qué ocurre si eliminamos el caso default? ¿Hay error de compilación? ¿Cómo ha cambiado el circuito netlist? ¿Por qué?

14. Tutorial quartus → light_if.vhd (VI)

14.1. Diseño

Diseño "light_if"

- El objetivo es describir literalmente la "Tabla de la Verdad" de la función del circuito.
- Utilizamos la sentencia secuencial "if elseif else endif" .
- creo la carpeta ..\light_if
- EDITO el módulo fuente ..\light_if\light_if.vhd
 - En la arquitectura la asignación a la señal LEDR(0) se edita mediante la herramienta *Insertar Plantilla* de la barra de herramientas del Editor.
 - Insert Template → VHDL → Constructs → Concurrent Statements → PROCESS

```
<optional_label>:
    process(reset, clk) is
        -- Declaration(s)
    begin
        if(reset = '1') then
            -- Asynchronous Sequential Statement(s) -> SOLO sentencias ←
            -- SECuenciales !!
        elsif(rising_edge(clk)) then
            -- Synchronous Sequential Statement(s) -> SOLO sentencias ←
            -- SECuenciales !!
        end if;
    end process;
```

- La plantilla ha insertado dos sentencias:
 - la sentencia concurrente PROCESS
 - la sentencia secuencial IF-ELSEIF-ELSE-END IF
- Particularizo las dos sentencias con las señales de mi diseño.

```
-- El proceso se ejecuta SI hay alguna variacion en las señales ARGUMENTO ( ←
-- señales SENSIBLES del proceso)
process(SW) is
    -- Declaration(s)
begin
    if(SW(0) == SW(1)) then
        LEDR(0) <= '0';
    else
        LEDR(0) <= '1';
    end if;
end process;
```

- Insert Template → VHDL → Constructs → Sequential Statements → if
 - NO es necesario volver a insertar la sentencia IF dentro del PROCESS.

```
if <expression> then
    -- Sequential Statement(s)
elsif <expression> then
    -- Sequential Statement(s)
else
    -- Sequential Statement(s);
end if;
```

- light_if.vhd:

```
-- SSDDI-2022
-- Intel tutorial reference: light.pdf
-- Diseño: Si uno de los switches SW(0) o SW(1) esta activo -> led rojo LEDR(0) encendido
-- Arquitectura: tipo funcional (Behavioral) -> Describe literalmente la tabla de la ←
-- verdad, no describe una expresión matemática.
-- Descripción del circuito mediante la sentencia secuencial IF.
-- Candido Aramburu

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

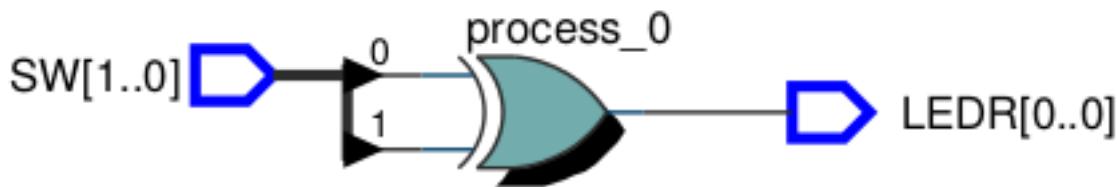
ENTITY light_if IS
PORT(SW : IN std_logic_vector (1 downto 0) ;
      LEDR : OUT std_logic_vector (0 downto 0));
END light_if ;

ARCHITECTURE TablaVerdad OF light_if IS
BEGIN
    -- El proceso se ejecuta SI hay alguna variacion en las señales ARGUMENTO ( ←
    -- señales SENSIBLES del proceso)
    process(SW) is
        -- Declaration(s)
    begin
        if(SW(0) = SW(1)) then
            LEDR(0) <= '0';
        else
            LEDR(0) <= '1';
        end if;
    end process;
END TablaVerdad;
```

- CREO el proyecto light_if y le añado el fichero light_if.vhd
- SINTETIZO : Processing → start compilation

14.2. Análisis

- VISUALIZACION: Tools → Netlist Viewer → RTL viewer



14.3. Ejercicios

- ¿Qué señales son sensibles a que se ejecute la sentencia PROCESS ?
- ¿Qué señales son sensibles a que se ejecute la sentencia IF-ELSEIF-ELSE ?
- ¿Qué tipos de valores de señal tienen como consecuencia que se cumpla condición ELSE?

15. Tutorial quartus → light_with.vhd (VII)

15.1. Diseño

- Diseño "light_with"
 - El objetivo es describir literalmente la "Tabla de la Verdad" de la función del circuito.
 - Utilizamos la sentencia concurrente "Conditional Signal Assignment" (csa).
 - creo la carpeta ..\light_with
 - EDITO el módulo fuente ..\light_with\light_with.vhd
 - En la arquitectura la asignación a la señal LEDR(0) se edita mediante la herramienta *Insertar Plantilla*
 - Template → VHDL → Constructs → Concurrent Statements - Selected Signal Assignments (ssa) → WITH

- Módulo fuente: light_with.vhd

```

-- SSDD
-- Intel tutorial reference: light
-- Behavioral architecture : Truth table function
-- concurrent sentence : with
-- Candido Aramburu

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

ENTITY light_with IS
PORT(SW : IN std_logic_vector (1 downto 0) ;
      LEDR : OUT std_logic_vector (0 downto 0));
END light_with ;

ARCHITECTURE LogicFunction OF light_with IS
BEGIN
    Truth_Table: with SW select

```

```

        LEDR(0) <= '1' when "00",
        '1' when "11",
        '0' when others; -- caso Default : SÍ ES OBLIGATORIO
END LogicFunction ;

```

- CREO el proyecto light_if y le añado el fichero light_if.vhd
- SINTETIZO : Processing → start compilation

15.2. Análisis

- VISUALIZACION: Tools→ Netlist Viewer → RTL viewer

15.3. Ejercicios

- ¿Qué señales son sensibles a que se ejecute la sentencia de asignación WITH-ELSE ?
- ¿Qué tipos de valores de señal tienen como consecuencia que se cumpla la condición DEFAULT?
- ¿Qué ocurre si eliminamos el caso default? ¿Hay error de compilación? ¿Cómo ha cambiado el circuito netlist? ¿Por qué?

16. Tutorial quartus → light_case.vhd (VIII)

16.1. Diseño

- Diseño "light_case"
 - El objetivo es describir literalmente la "Tabla de la Verdad" de la función del circuito.
 - Utilizamos la sentencia secuencial case.
 - creo la carpeta ..\light_case
 - EDITO el módulo fuente ..\light_case\light_case.vhd
 - En la arquitectura la asignación a la señal LEDR(0) se edita mediante la herramienta *Insertar Plantilla*
 - Insert Template → VHDL → Constructs → Concurrent Statements → PROCESS
 - Insert Template → VHDL → Constructs → Sequential Statements → CASE
- Módulo fuente: light_case.vhd

```

-- SSDDI-2022
-- Intel tutorial reference: light
-- Behavioral architecture : Truth table function
-- sequential sentence : case
-- Candido Aramburu

library std;
use std.standard.all;
use std.textio.all;

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

ENTITY light_case IS
PORT(SW : IN std_logic_vector (1 downto 0) ;
      LEDR : OUT std_logic_vector (0 downto 0));
END light_case;

```

```

ARCHITECTURE behavioral OF light_case IS
BEGIN
process (SW)
begin
  case SW is
    when "00" => LEDR <= "0";
    when "01" => LEDR <= "1";
    when "10" => LEDR <= "1";
    when "11" => LEDR <= "0";
    when others => LEDR <= "1"; -- caso DEFAULT: NO es obligatorio
  end case;
end process;

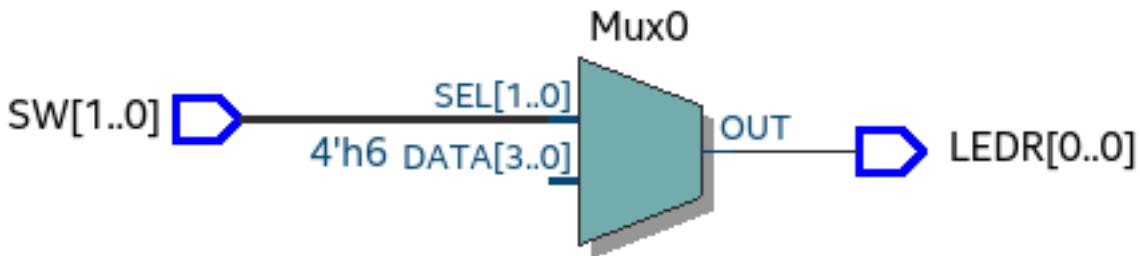
END behavioral ;

```

- CREO el proyecto light_case y le añado el fichero light_case.vhd
- SINTETIZO : Processing → start compilation

16.2. Análisis

- VISUALIZACION: Tools→ Netlist Viewer → RTL viewer



- interpretar los nombres lógicos
- interpretar el multiplexor
 - SEL[1,0] : el bit más significativo es SEL(1)
 - DATA[3..0]: el bit más significativo es DATA(3)
 - 4h6 → el primer dígito es el número bits (4) y el último dígito es el valor en hexadecimal (6) → 0110
 - ¿qué implementa el multiplexor?

16.3. Ejercicios

- Describe un tipo de señal que está definido en el paquete "standard" de la librería "std"
- ¿Qué ocurre si quitamos la declaración de la librería y del paquete standard y std?
- ¿Qué diferencia hay entre la librería "std" y la librería "ieee"?
- ¿Qué tipos de valores de señal tienen como consecuencia que se cumpla la condición DEFAULT?
- ¿Qué ocurre si eliminamos el caso default? ¿Hay error de compilación? ¿Cómo ha cambiado el circuito netlist?; Por qué?

17. Multiplexor

17.1. mux2x1: arquitectura RTL

- Multiplexor 2x1 con arquitectura RTL

- Unidad *mux2x1_rtl.vhd*

```
-- UPNA
-- SSDD I
-- mux2x1_rtl.vhdl
-- Multiplexor 2x1
-- identidad:
--         entrada de datos: Botones KEY(0), KEY(1)
--         entrada de control: Switches SW(0)
--         salida : Led Red LEDR(0)
-- arquitectura RTL : ecuación lógica del mux 2x1

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

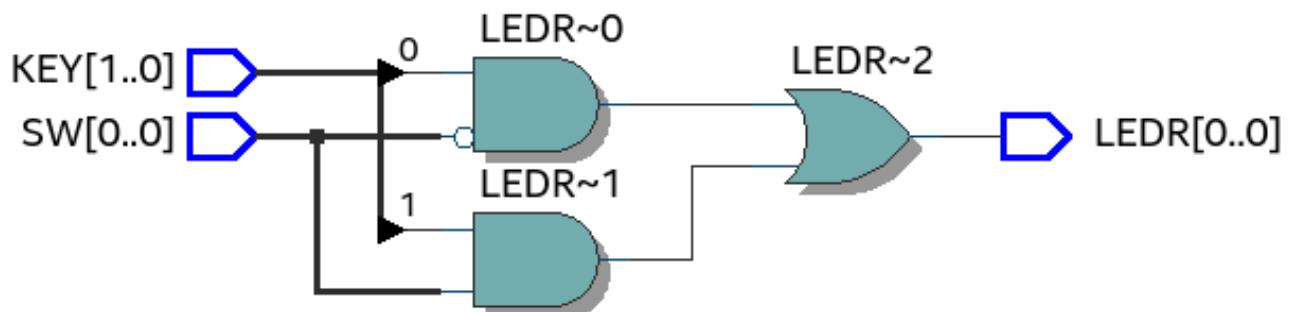
entity mux2x1_rtl is
    port (
        KEY: in std_logic_vector(1 downto 0);
        SW: in std_logic_vector(0 downto 0);
        LEDR: out std_logic_vector(0 downto 0)
    );
end mux2x1_rtl;

architecture rtl of mux2x1_rtl is
begin
    LEDR(0) <= (KEY(0) and (not SW(0))) or (KEY(1) and SW(0)) ;
end rtl;
```

- Verificar el buen funcionamiento del circuito en el laboratorio remoto.

17.2. Análisis

- VISUALIZACION: Tools→ Netlist Viewer → RTL viewer



17.3. mux4x1: arquitectura Behavioral

- Multiplexor 4x1 con arquitectura funcional o comportamental (behavioral)

- Unidad *mux4x1_beh.vhdl*

```
-- UPNA
-- SSDD I
-- mux4x1_beh.vhdl
-- Multiplexor 4x1
-- identidad:
--         entradas de datos: KEY(0), KEY(1), KEY(1), KEY(2)
--         entradas de control: SW(0), SW(1)
--         salida : LEDR(0)
-- arquitectura Funcional :
--         sentencia concurrente PROCESS y sentencia secuencial IF

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity mux4x1_beh is
    port (
        KEY: in std_logic_vector(3 downto 0);
        SW: in std_logic_vector(1 downto 0);
        LEDR: out std_logic_vector(0 downto 0)
    );
end mux4x1_beh;

architecture behavioral of mux4x1_beh is
begin
    multi4x1: process (KEY)
        begin
            if      (SW="00") then
                LEDR(0) <= KEY(0);
            elsif  (SW="01") then
                LEDR(0) <= KEY(1);
            elsif  (SW="10") then
                LEDR(0) <= KEY(2);
            elsif  (SW="11") then
                LEDR(0) <= KEY(3);
            else
                LEDR <= "0";
            end if;
        end process multi4x1;
end behavioral;
```



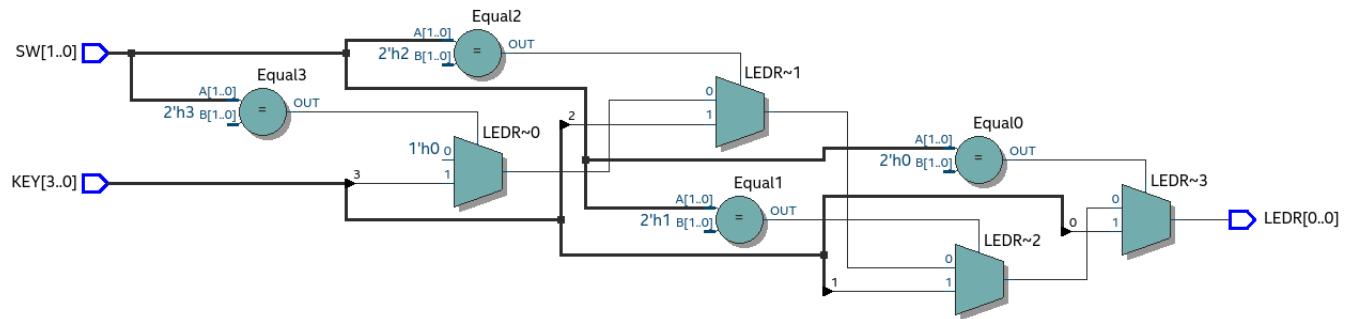
atención

Si se escribe LEDR en lugar de LEDR(0) da error.

- La selección "else" es necesaria ya que las señales std_logic pueden tener hasta 9 valores diferentes por lo que el bus de 2 hilos como SW admite 512 combinaciones, no sólamente las cuatro combinaciones 00,01,10,11.
- Verificar el buen funcionamiento del circuito en el laboratorio remoto.

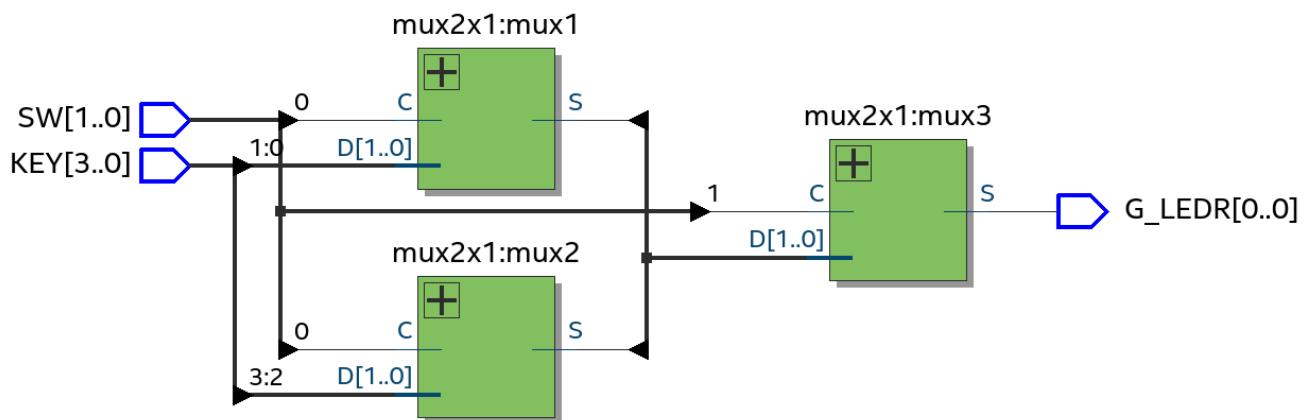
17.4. Análisis

- VISUALIZACION: Tools→ Netlist Viewer → RTL viewer

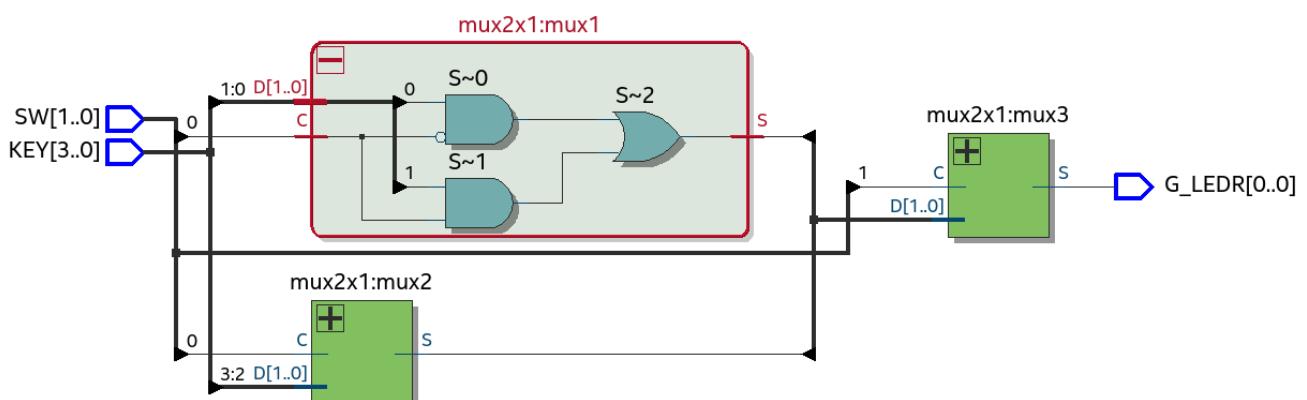


17.5. mux4x1: arquitectura Estructural

- En teoría se ha visto como extender multiplexores de un número elevado de entradas en función de multiplexores de menos entradas, lo cual se describe en VHDL mediante una arquitectura estructural.
- Diseñar un Multiplexor 4x1 en función de Multiplexores 2x1
 - Un multiplexor 4x1 se puede diseñar como la combinación de 3 multiplexores 2x1. En la entrada del circuito se utilizan 2 multiplexores 2x1 en paralelo y a la salida de estos dos multiplexores 2x1 se conecta el multiplexor 2x1 de salida. Es decir, 2 multiplexores de entrada y un multiplexor de salida.



- Esquema del componente *mux2x1*



- Son necesarios dos ficheros o programas VHDL relacionados jerárquicamente. La entidad *mux4x1_str* recurre a la entidad *mux2x1*.
- unidad *mux2x1.vhd* en el nivel bajo de la jerarquía.

```
-- UPNA
-- SSDD I
-- mux2x1.vhd
-- Multiplexor 2x1
-- identidad:
--     entrada de datos: D(0), D(1)
--     entrada de control: C
--     salida : S
-- arquitectura RTL : ecuación lógica del mux 2x1

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
```

```

entity mux2x1 is
  port (
    D: in std_logic_vector(1 downto 0);
    C: in std_logic;
    S: out std_logic
  );
end mux2x1;

architecture rtl of mux2x1 is
begin
  S <= (D(0) and (not C)) or (D(1) and C) ;
end rtl;

```

- Descripción estructural: describe cómo se conectan con hilos o buses los tres multiplexores mux2x1, es decir, se va a describir la estructura del circuito mux4x1_str en función de los 3 componentes mux2x1.

- Unidad *mux4x1_str.vhd* en el nivel top de la jerarquía.

```

-- UPNA
-- SSDD I
-- mux4x1_beh.vhdl
-- Multiplexor 4x1
-- identidad:
--       entradas de datos: KEY(0), KEY(1), KEY(1), KEY(2)
--       entradas de control: SW(0), SW(1)
--       salida : LEDR(0)
-- arquitectura Funcional :
--       sentencia concurrente PROCESS y sentencia secuencial IF

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity mux4x1_str is
  port (
    KEY: in std_logic_vector(3 downto 0);
    SW: in std_logic_vector(1 downto 0);
    LEDR: out std_logic_vector(0 downto 0)
  );
end mux4x1_str;

architecture estructural of mux4x1_str is
component mux2x1 is
  port (
    D: in std_logic_vector(1 downto 0);
    C: in std_logic;
    S: out std_logic
  );
end component;

  signal OUT1,OUT2,OUT3: std_logic;

begin
  mux1: mux2x1 port map ( D(0) => KEY(0),
                           D(1) => KEY(1),
                           C => SW(0),
                           S => OUT1);
  mux2: mux2x1 port map ( D(0) => KEY(2),
                           D(1) => KEY(3),
                           C => SW(0),
                           S => OUT2);

```

```
mux3: mux2x1 port map (
    D(0) => OUT1,
    D(1) => OUT2,
    C => SW(1),
    S => LEDR(0));
end estructural;
```

17.5.1. Compilación en Quartus

- Posibilidad de realizar la compilación con Quartus
 - Crear el proyecto mux4x1_str
 - File → New → VHDL file
 - copiar el código de la unidad **mux4x1_str** en el área de Edición VHDL
 - salvar el fichero con el nombre mux4x1_str y seleccionar "Add this file to project"
 - En la ventana de herramientas de la ventana de Edición click en el icono "Analyze current file" : no debe de haber errores de sintaxis
 - File → New → VHDL file
 - copiar el código de la unidad **mux2x1** en el área de Edición VHDL
 - salvar el fichero con el nombre mux2x1 y seleccionar "Add this file to project"
 - En la ventana de herramientas de la ventana de Edición click en el icono "Analyze current file" : no debe de haber errores de sintaxis
 - De las dos unidades que forman parte del diseño mux4x1_str es el **top** de la jerarquía ya que contiene a la otra unidad mux2x1.
 - El panel del navegador del proyecto "Project Navigator" lo ponemos en modo "Files". Seleccionamos el fichero top, click dcha, **Set as top-level entity**
 - En el panel de navegación seleccionar la FPGA Cyclone, click derecha, Settings → Files : se tienen que listar los dos ficheros del proyecto, si falta alguno hay que añadirlo desde esa misma ventana. Los ficheros deben de estar listados en orden de jerarquía.

18. Decodificador

18.1. Decoder Hex/Display_7_segmentos

- Circuito de visualización de dígitos hexadecimales en el display de 7 segmentos

decodificador 7 segmentos

- Diseño jerárquico formado por la unidad top *decodificador_hexadecimal.vhdl* con arquitectura estructural que recurre a la unidad *dec7seg* con arquitectura funcional para conectarla a los periféricos, los switches SW y el display 0 de 7 segmentos HEX0.
- unidad de diseño en el nivel bajo (bottom) de la jerarquía : *dec7seg.vhdl*

```
-- decodificador hex -> 7 segmentos
-- lógica positiva
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all; --STANDARD

entity dec7seg is port(
    hex_digit : in std_logic_vector(3 downto 0);
    segment_7dis : out std_logic_vector(6 downto 0)
);
end dec7seg;

architecture arch_dec of dec7seg is
    signal segment_data : std_logic_vector(6 downto 0); -- 7 segmentos ó leds : g-f- <-
        e-d-c-b-a
begin
    process (hex_digit)
    begin
        case hex_digit is
            when "0000"=> segment_data <="0111111"; -- display 7 <-
                segmentos con lógica positiva
            when "0001"=> segment_data <="0000110";
            when "0010"=> segment_data <="1011011";
            when "0011"=> segment_data <="1001111";
            when "0100"=> segment_data <="1100110";
            when "0101"=> segment_data <="1101101";
            when "0110"=> segment_data <="1111101";
            when "0111"=> segment_data <="0000111";
            when "1000"=> segment_data <="1111111";
            when "1001"=> segment_data <="1101111";
            when "1010"=> segment_data <="1110111";
            when "1011"=> segment_data <="1111100";
            when "1100"=> segment_data <="0111001";
            when "1101"=> segment_data <="1011110";
            when "1110"=> segment_data <="1111001";
            when "1111"=> segment_data <="1110001";
            when others=> segment_data <="0000000";
        end case;
    end process;
    segment_7dis <= not segment_data; -- El display 7 segmentos de la <-
        tarjeta DE1-SoC funciona con lógica negativa
end arch_dec;
```

- unidad de diseño *decodificador_hexadecimal.vhdl* en el nivel alto (top) de la jerarquía.
 - Conecta el decodificador *dec7seg* a los periféricos de la tarjeta DE1-SoC: las 4 entradas del decodificador a 4 switches SW y las 7 salidas del decodificador a los 7 leds del display 0, HEX0.

```

-- Laboratorio Remoto
-- Decodificador Hexadecimal
-- Entrada de 4 bits conectada a los switches
-- Salida conectada al display de 7 segmentos
-- Nombres de los puertos: Asignación de Señales según documentación del laboratorio ←
-- remoto

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity decodificador_hexadecimal is
port (
    SW : in std_logic_vector ( 9 downto 0 );
    HEXO: out std_logic_vector( 6 downto 0 )
);
end decodificador_hexadecimal ;

architecture RTL of decodificador_hexadecimal is
component dec7seg is
    port (
        hex_digit : in std_logic_vector(3 downto 0 );
        segment_7dis : out std_logic_vector(6 downto 0 )
    );
end component;

begin
display0: dec7seg port map (
    hex_digit => SW (3 downto 0),
    segment_7dis => HEXO
);
end RTL;

```

19. Valores INDETERMINADOS X en la entrada y en la salida

19.1. Codificador con Prioridad

- El objetivo es describir en vhdl una tabla de la verdad con variables cuyo valor es "NO IMPORTA" tanto a la entrada como a la salida.

I (3)	I (2)	I (1)	I (0)		B (1)	B (0)
1	X	X	X		1	1
0	1	X	X		1	0
0	0	1	X		0	1
0	0	0	1		0	0
resto casos					X	X

- Si en VHDL la fila 1XXX la pusiese con valores dont care → 1---, la síntesis NO serían todos los 8 casos que implica 1XXX, es decir: 1000,1001,1010,1011,1100,1101,1110,1111 sino que elegiría UN UNICO caso, pej 1010.
- para que las entradas I con valor X se sintetizasen como todos los casos posibles con X=0 y X=1 y la salida B con valor X como UN UNICO caso a elegir.

```

if (I(3)='1')                                then B <="11";
elsif (I(3 downto 2)="01")      then B <="10";
elsif (I(3 downto 1)="001")      then B <="01";
elsif (I(3 downto 0)="0001")      then B <="00";
else B <= "--"

```

- con la sentencia IF si puedo implementar entradas con valor indeterminado X al ser entradas que no aparezcan en la condición. En la condición I(3)=I no aparecen los valores de I(2), I(1) e I(0).

- source code con 2 arquitecturas diferentes: WHEN e IF

```
LIBRARY ieee;
USE ieee.std_logic_1164.ALL;

ENTITY cod4x2 IS
PORT (
    SW : IN STD_LOGIC_VECTOR (3 DOWNTO 0);
    LEDR : OUT STD_LOGIC_VECTOR (1 DOWNTO 0));
END cod4x2;

ARCHITECTURE examen OF cod4x2 IS
BEGIN

    LEDR <= "11" WHEN SW(3) = '1' ELSE
        "10" WHEN SW(3 DOWNTO 2) = "01" ELSE
        "01" WHEN SW(3 DOWNTO 1) = "001" ELSE
        "00" WHEN SW = "0001" ELSE
        "--";
    
END ARCHITECTURE;

ARCHITECTURE exa OF cod4x2 IS
BEGIN
    PROCESS (SW)
        IF (SW(3) = '1') THEN
            LEDR <= "11";
        ELSIF (SW (3 DOWNTO 2) = "01" THEN
            LEDR <= "10"
        ELSE
            LEDR <= "--";
        END IF;
    
    END PROCESS;
END ARCHITECTURE;
```

20. Diseños VHDL NO sintetizables en circuitos electrónicos

20.1. Introducción

- El lenguaje VHDL se puede utilizar como lenguaje de programación software en lugar de un lenguaje para describir el hardware de los circuitos electrónicos digitales. En estos casos el compilador genera ficheros binarios que se pueden ejecutar produciendo salidas como mensajes en el monitor, ficheros con formas de onda, sonidos, ficheros con imágenes, etc... pero no genera el fichero binario para programar una FPGA.

20.2. Hello World

- Código fuente de HelloWorld.vhdl:

```
-- Programa para imprimir el mensaje 'Hello World'  
-- Declaración de la librería std y del paquete textio aunque no es necesario.  
  
library std;  
use std.textio.all;  
  
entity HelloWorld is  
end entity;  
  
architecture sim of HelloWorld is  
begin  
  
    process is  
    begin  
  
        report "Hello World!";  
        wait;  
  
    end process;  
  
end architecture;
```

- Al compilar el módulo VHDL con el compilador de las herramientas "Quartus Prime Lite"

21. Flip-Flop

21.1. Memorias

- Los circuitos con memoria también denominados circuitos secuenciales ó maquinas de estados finitos corresponden al segundo parcial.

21.2. VHDL: Flip Flop D con entradas asíncronas en lógica negativa

21.2.1. diseño

- Editamos directamente en el Laboratorio Remoto para verificar su funcionamiento.
- ¿Cómo sintetiza Quartus unidades de memoria descritas en VHDL?
- Entidad: Descripción gráfica mediante un esquema

Flip Flop con las señales de entrada/salida: d,clk,set,preset,q
 Conexión entre el Flip Flop y los puertos de la entidad: clk al botón KEY(0), resto de entradas con SW y salida q al LEDR(0)

- Arquitectura mediante la sentencia IF

```
process (cp,clk)
  if
    {cuerpo}
  end if;
end process;
```

- sentencia IF:
 - condiciones descritas con pseudocódigo
 - cortocircuito → en cuanto se cumple una condición del IF se SALE del IF
 - las entradas asíncronas del Flip-Flop tienen prioridad luego serán las primeras condiciones del IF en evaluar
 - la condición flanco de subida → clk'event and clk=1 ó mediante la función rising_edge(clk)

```
-- Flip Flop tipo D con entradas asíncronas

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity ffd is
port(
  SW: in std_logic_vector ( 9 downto 0);
  KEY: in std_logic_vector ( 0 downto 0);
  LEDR: out std_logic_vector ( 9 downto 0)
);
end entity;

architecture behavioral of ffd is

signal clear,preset,d,clk,q : std_logic ;
signal cp : std_logic_vector ( 1 downto 0);

begin
d <= SW(0);
```

```

clk <= KEY(0);
preset <= SW(9);
clear <= SW(8) ;
LEDR(0) <= q ;
cp <= preset & clear ; -- concatenamos los hilos preset y clear para crear un BUS de dos hilos.

process (cp,clk)
begin
if ( cp="01") then
    q <= '0';
elsif ( cp="10") then
    q <= '1';
elsif ( cp="11") then
    if ( clk'event and clk='1') then
        q <= d;
    -- NO ESTAN DEFINIDOS TODOS LOS CASOS POSIBLES DE clk tipo std_logic
    end if;
-- NO ESTAN DEFINIDOS TODOS LOS CASOS POSIBLES DE cp tipo std_logic
end if;
end process;

end architecture;

```

21.2.2. Implementación de unidades de MEMORIA

- **NO ESTAN DEFINIDOS TODOS LOS CASOS** posibles de valores de una variable en una relación función(variable) donde tanto la variable como la función son señales o buses digitales.
 - en el ejemplo anterior el valor de q está definido únicamente para clk flanco de subida. Si clk no está en un flanco de subida el valor de q NO está definido y por lo tanto no se hace nada con q para esos casos indefinidos de clk. No hacer nada es memorizar. Hay que implementar q como memoria → q será la salida de una celda de memoria.
 - ocurre lo mismo con la relación q(cp) → q depende de cp pero no está definida esa relación para todos los valores posibles del bus cp . Es decir, hay que memorizar el valor de q.

21.3. FF-D

- Flip-Flop Data o Muestreo-Retención
- Función: La salida Q sigue a la entrada Data en sincronía con el reloj.
- Esquema

/home/candido/Dropbox/apuntes/apuntes_sistemas_digitales/upna/practicas_altera/DE1/PROY_VHDL/UPNA_2020/ffd/ffd.png

- Descripción vhdl

```

-- Sistemas Digitales I
-- Sistemas Secuenciales: Biestables
-- ffd.vhdl
--
-- Dispositivo: Flip Flop tipo D con entrada síncrona únicamente.
-- Señales estímulo:
--     El switch (0) como entrada de datos
--     El botón (0) de la tarjeta como reloj de sincronismo
-- Visualización
--     El led rojo (0) como lectura del ffd

```

```
entity ffd is
  port (
    SW : in std_logic_vector (0 downto 0);
    KEY : in std_logic_vector (0 to 0);
    LEDR : out std_logic_vector (1 downto 0)
  );
end ffd;

architecture behavioral of ffd is
  signal d,q,clk : std_logic;
begin
  -- conexiones de los periféricos al flip-flop
  d      <= SW(0); -- entrada de datos del FF
  clk     <= KEY(0); -- el reloj es el dedo al pulsar el botón
  LEDR(0) <= q      ; -- visualiza la lectura del FF
  LEDR(1) <= KEY(0); -- visualiza el nivel del reloj
  -- flip-flop tipo D : d,clk,q
  process (clk) -- se ejecuta si evento en la señales sensibles clk
  begin
    -- un if solo se puede utilizar dentro de un process
    if ( clk'event and clk = '1' ) then -- evento (flanco) y positivo
      -- if (rising_edge(clk)) -- otra forma de describir un flanco positivo
      q <= d;
      -- en el if no se definen todas las situaciones = NO HACER NADA = MEMORIZAR
      -- no esta definido q para clk NO flanco positivo = MEMORIA
    end if;
  end process;
end behavioral;
```

22. Operación suma y multiplicación

- El paquete std_logic_1164 no define operaciones aritméticas para operar con señales std_logic.
- Las operaciones suma y multiplicación están definidos en el paquete "numeric_std" de la librería "ieee"
 - Operaciones suma y multiplicación con números sin signo, con signo, etc

```
-- Diseño light_sum
-- Quartus Prime Lite 21.1
-- Descripción del circuito: operaciones suma y multiplicación de operandos de 1 bit.
-- Arquitectura: operación suma y multiplicación

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.numeric_std.all;

entity light_sum is
port(
    SW : in std_logic_vector ( 1 downto 0);
    LEDR : out std_logic_vector (9 downto 0)
);
end ;

architecture math of light_sum is
signal swu,suma,op1,op2: unsigned (1 downto 0);
signal mul: unsigned (3 downto 0);

begin
    swu <= unsigned (SW); --casting : convertir el tipo del objeto
    op1 <= '0' & swu(0); -- extiendo el signo
    op2 <= '0' & swu(1); -- extiendo el signo
    suma <= op1 + op2 ;
    mul <= op1 * op2;
    LEDR(1 downto 0) <= std_logic_vector(suma); --casting : convertir el tipo del ←
                                                objeto
    LEDR(9 downto 6) <= std_logic_vector(mul);
end ;
```

23. Contador Síncrono

- Contador Síncrono Ascendente Módulo 16 con entrada reset asíncrona
- Código Fuente

```
-- Contador Síncrono Ascendente Modulo 16
-- Reset con logica negativa
-- Perifericos
---- KEY(0): clk
---- SW(0): resetn
---- LEDR (3 downto 0): count value

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.numeric_std.all;

entity counter_4 is
    port (
        SW: in std_logic_vector ( 9 downto 0);
        KEY: in std_logic_vector ( 3 downto 0);
        LEDR: out std_logic_vector ( 9 downto 0)
    );
end counter_4;

architecture behavioral of counter_4 is
    signal clk,resetn: std_logic;
    signal q : std_logic_vector (3 downto 0);
    signal count : unsigned (3 downto 0); -- operador suma
begin
    beginin
        -- Conexiones con los periféricos
        clk <= KEY(0);
        resetn <= SW(0);
        q <= std_logic_vector (count);
        LEDR (3 downto 0) <= q;
        -- contador de 4 bits
        process (clk,resetn)
        begin
            if (resetn = '0') then
                count <= "0000" ;
            elsif resetn = '1' then
                if rising_edge (clk) then
                    if count = "1111" then
                        count <= "0000" ;
                    else
                        count <= count + 1;
                    end if;
                end if;
            end if;
        end process;
    end behavioral;
```

24. Cerradura Electrónica

- Ejercicio 8.1 del libro de ejercicios
- Código Fuente

```

-- Libro Problemas Upna Capítulo 8: Sistemas Secuenciales
-- Ejercicio 8.1
-- Cerradura con controlador digital
-- entada serie: la clave 11011 abre la puerta
---- Casos posibles:
-----11111111011
-----00000011011
-----01010011011
-- entrada serie: SW(0)
-- salida: accionador de la cerradura
-- salida: LEDR(7)
-- sistema secuencial sincrono Mealy
-- El reloj ha de ser lento para poder leer las entradas despues de que hayan cambiado
-- El reloj es el boton manual KEY(0) -> sync con flanco negativo
-- El reloj se visualiza con LEDR(9)
-- El contenido de la memoria se visualiza con LEDR(4 downto 0)

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.numeric_std.all;

entity cerradura is port(
    SW : in std_logic_vector (9 downto 0) ;
    LEDR: out std_logic_vector (9 downto 0) ;
    KEY : in std_logic_vector (3 downto 0) -- KEY(0) : clock
    );
end cerradura;

architecture arch_cerradura of cerradura is
type tipo_estado is (q0,q1,q2,q3,q4); -- tipo enumeración : ESTADOS
signal estado_actual : tipo_estado := q0; -- estado inicial
signal estado_siguiente: tipo_estado; -- hilos internos

begin
    -- Mealy : la entrada provoca un cambio en la salida y en el estado
    -- Circuito Combinacional:Dos salidas: la salida del sistema y la entrada de la memoria
    -- La salida del sistema: función de la entrada y del estado de la memoria
    -- La entrada de la memoria: función de la entrada y del estado de la memoria.
    -- Descripción de las transiciones de estados y descripción de la salida
    -- Process: lista de señales sensibles: activan el proceso si evento en dichas señales
    -- Para sintetizar un circuito combinacional todas las señales de entrada del circuito
    -- (SW(0) y estado actual) deben de estar en la lista de señales sensibles.

    LEDR(9) <= KEY(0); -- visualiza el estado del boton

process (SW(0), estado_actual)
begin
    case estado_actual is
        when q0 => -- esperando al primer uno de la clave
            if SW(0)= '0' then
                LEDR(7) <= '0';
                estado_siguiente <= q0;
            else -- caso ideal: SW(0) unicamente toma los valores '0' y '1'
                LEDR(7) <= '0';
                estado_siguiente <= q1; -- primer digito de la clave
            end if;
        when q1 =>

```

```
if SW(0)= '0' then
    LEDR(7) <= '0';
    estado_siguiente <= q0;
else
    LEDR(7) <= '0';
    estado_siguiente <= q2; -- segundo digito de la clave (dos o mas unos ↔
                           consecutivos)
end if;
when q2 =>
    if SW(0)= '0' then
        LEDR(7) <= '0';
        estado_siguiente <= q3; -- tercer digito de la clave
    else
        LEDR(7) <= '0';
        estado_siguiente <= q2; -- segundo digito de la clave (dos o mas unos ↔
                           consecutivos)
    end if;
when q3 =>
    if SW(0)= '0' then
        LEDR(7) <= '0';
        estado_siguiente <= q0; -- reiniciar
    else
        LEDR(7) <= '0';
        estado_siguiente <= q4; -- cuarto digito de la clave
    end if;
when q4 =>
    if SW(0)= '0' then
        LEDR(7) <= '0'; -- reiniciar
        estado_siguiente <= q0;
    else
        LEDR(7) <= '1';
        estado_siguiente <= q0; -- ultimo digito de la clave, abrir y reinicio
    end if;
end case;
end process;

-- MEMORIA: memorizar ESTADOS. Sincronismo de escritura de la memoria.
process (estado_siguiente, KEY(0))
begin
    if (KEY(0)'event and KEY(0) = '0') then -- sensible a eventos en KEY(0) sin rebotes
        -- evento: cambio al nivel 0 -> flanco negativo
        estado_actual <= estado_siguiente; -- actualización del nuevo estado de forma ↔
                                           sincronizada
    -- En cambio la salida LEDR(7) no está sincronizada
    end if;
end process;

--Circuito Combinacional: Lee los 5 bits de memoria y visualiza la lectura.
process (estado_actual)
begin
case estado_actual is
    when q0 => LEDR (4 downto 0) <= "00001"; -- estado 0
    when q1 => LEDR (4 downto 0) <= "00010"; -- estado 1
    when q2 => LEDR (4 downto 0) <= "00100"; -- estado 2
    when q3 => LEDR (4 downto 0) <= "01000"; -- estado 3
    when q4 => LEDR (4 downto 0) <= "10000"; -- estado 4
end case;
end process;
```

```
end arch_cerradura;
```

25. Registros

■ x

26. VHDL: Lenguaje para la Descripción de Hardware (Circuitos Digitales)

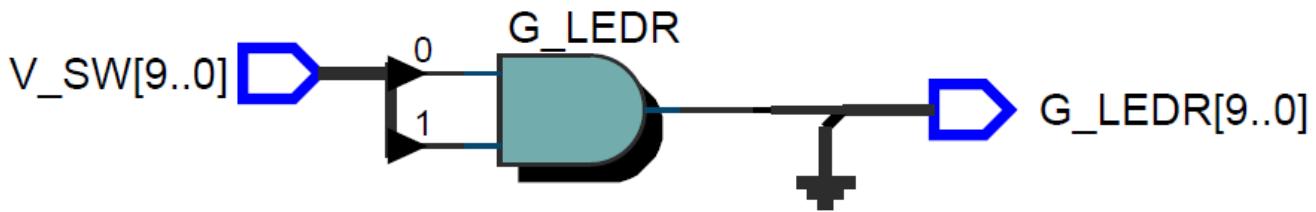
26.1. Documentación

- En miaulario está disponible en la carpeta *Recursos/apuntes/VHDL/*:
 - *./laboratorio remoto FPGA/*: Este Tutorial básico.
 - *./documentación/*: [The Low-Carb VHDL Tutorial](#) ©Copyright: 2004 by Bryan Mealy (08-27-2004)
 - *./documentación/*: [Hoja de Referencia con sentencias secuenciales y recurrentes BASICAS](#) : VHDL Cheat-Sheet, Copyright: 2007 Bryan J. Mealy
 - *./2020*: Ejemplos de código VHDL del año 2020
 - *./2021*: Ejemplos de código VHDL del año 2021
 - *./2022*: Ejemplos de código VHDL del año 2022

26.2. Introducción

- Los circuitos digitales se pueden describir de las siguientes formas:
 - Lenguaje natural hablador por los humanos: fácil de entender pero difícil para describir con precisión.
 - Descripción gráfica: Esquema eléctrico formado por los dispositivos (fuentes de alimentación, puertas lógicas, multiplexores, decodificadores, procesadores, memorias, ...) que componen el circuito digital y sus interconexiones mediante cables, hilos, pistas, buses, etc ..
 - Descripción mediante un lenguaje de sentencias en modo texto: Hardware Description Language (**HDL**). Dos lenguajes básicos: **VHDL** (Very high speed integrated circuits Hardware Description Language) y Verilog
 - Su cometido principal es ser un lenguaje para la descripción del hardware de un sistema digital y también para programar las señales de prueba con que verificar el funcionamiento del sistema digital mediante su simulación utilizando conceptos clásicos de programación como variables, módulos, sentencias condicionales, bucles, sentencias de selección, etc
 - Estos lenguajes tienen como objetivo emular el comportamiento de los circuitos:
 - ◊ la relación entre la salida y la entrada del circuito se denomina **arquitectura**: Hay 3 tipos de arquitectura: **RTL**, **Behavioral** y **Structural**.
 - ◊ Arquitectura a nivel **funcional** (describir la relación entre la salida y la entrada del circuito mediante la función del circuito, ej describir literalmente la **tabla de la verdad** de un circuito). Los nombres behavioral y comportamental equivalen a funcional
 - ◊ Arquitectura a nivel de **flujo de datos** o también denominada lógica de transferencia entre registros (Register Transfer Logic **RTL**, la salida del sistema se relaciona con la entrada mediante una **función matemática lógica** → $F(x,y,z)=xy+xz$)
 - ◊ Arquitectura a nivel **estructural** (la relación entre la salida y la entrada es la **conexión** entre distintas unidades lógicas, pej salida del sistema digital = salida de un "multiplexor" cuya entrada está conectada a la salida de un "decodificador" cuya entrada está conectada a la salida de un puerta "OR" cuya entrada es la entrada del sistema digital)

26.3. Circuito Digital "gate_and.vhdl"



- La primera fase del diseño es la de EDICIÓN del circuito.
- módulo fuente *gate_and.vhdl* descriptor del hardware en lenguaje VHDL:

```

-- Sistemas Digitales I año 2020
-- Upna 7 de Febrero 2020
-- Laboratorio Remoto de la Upna
-- FICHERO gate_and.vhdl : OBLIGATORIAMENTE debe ser el MISMO nombre que el utilizado en ENTITY.
-- tutorial: primera práctica en aula
-- SSDDI 2020 Febrero 7

-- Librerías donde se definen los tipos de señales std_logic
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

-- Entidad
entity gate_and is
    port (
        SW: in std_logic_vector(9 downto 0);
        LEDR: out std_logic_vector(9 downto 0)
    );
end gate_and;

--ARQUITECTURA
architecture rtl of gate_and is
begin
    LEDR(0) <= SW(0) and SW(1);
end rtl;

```

- Los nombre de los puertos han de ser obligatoriamente los utilizados por el laboratorio remoto (Ver [Apéndice](#))
- Verificar el buen funcionamiento del circuito en el laboratorio remoto.



atención

para poder fabricar el circuito en los dispositivos FPGA del laboratorio remoto, los nombre de los puertos han de ser obligatoriamente los utilizados por el laboratorio remoto (Ver apéndice)

26.4. Estructura del Programa: Librería-Entidad-Arquitectura

El Programa VHDL está estructurado en 4 partes:

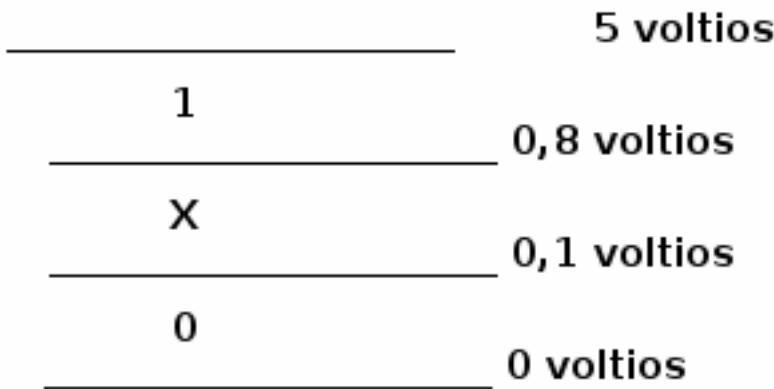
- COMENTARIOS
- LIBRERIAS
- ENTIDADES
- ARQUITECTURAS

Las secciones más importantes son la **entidad** de un circuito y la **arquitectura** de ese circuito. La entidad del circuito define únicamente las señales de entrada y salida del circuito, señales denominadas puertos. La arquitectura del circuito define la relación entre los puertos de entrada y salida del circuito.

- ① Comentarios: Añadir Comentarios en la cabecera : informar sobre la funcionalidad del circuito, función de los puertos, etc... Añadir Comentarios en las líneas propensas a errores.
- ② Librería: declara donde se encuentran elementos del lenguaje VHDL como: tipos de señales, subcircuitos digitales, constantes etc. En el apéndice se explica el concepto de bus, vector, std_logic_vector.
- ③ Entidad : El circuito digital visto desde fuera: entradas y salidas del circuito conectadas a los switches, botones, leds, etc .. de la tarjeta.
- ④ Arquitectura: Define la relación lógica entre las señales de entrada y salida del circuito.
- ⑤ Para la asignación de "señales" se utiliza la sentencia `≤` equivalente al símbolo `=` en algunos lenguajes de programación. El resultado de la evaluación de la expresión lógica de señales a la derecha de `≤` se asigna a la señal de la izda. La sentencia `≤` se ejecuta en el instante en que alguna de las señales a la derecha de `≤` cambia.
 - Cómo se ejecuta la sentencia: asignación concurrente `≤`
 - A las señales de la derecha del símbolo `≤` se les denomina **señales sensibles**
 - Cuando una de las señales sensibles cambia (**evento**) en ese mismo instante se ejecuta la sentencia asignación.
 - se ve mejor el concepto de concurrencia si en la arquitectura hay dos o más sentencias concurrentes.

26.5. señal digital binaria

- El paquete "standard" de la librería "std" incorporado en el propio lenguaje VHDL, define un tipo de señal **bit** que únicamente admite 2 valores lógicos: el "0" y el "1", que se corresponden con los valores lógicos del álgebra de Boole. Físicamente una señal electrónica es una magnitud como la tensión o la corriente. El valor lógico abstracto 0 se puede corresponder con un nivel de tensión como los cero voltios y el valor lógico abstracto 1 con el nivel de tensión 5 voltios, es decir, con el par (0v,5v) ó también podría ser con el par (-5v,5v) ó cualquier otro par de niveles. Con la corriente ocurre lo mismo el par abstracto (0,1) se corresponde con cualquier par de niveles (0mA,10mA) ó (-3mA,3mA) ó ... etc.
- En los circuitos electrónicos digitales las señales físicas "idealmente" tienen únicamente un par de valores en tensión o corriente, pero ocurre que una señal puede **distorsionarse** o se le puede sumar una señal de **ruido** externo, por ejemplo en la transmisión a través de una línea de comunicaciones o una pista de un circuito impreso, por lo que sería imposible mantener dos niveles de tensión o corriente. Para que los circuitos digitales sean operativos es necesario asociar a cada valor abstracto "0" ó "1" un rango de valores. Por ejemplo, al "0" un rango entre cero voltios y 100mv y al "1" un rango de valores entre 800mv y 1 voltio, cuyos niveles y umbrales permitidos se representan a continuación.



- X: Un nivel de tensión entre 100mv y 800mv quedaría indeterminado y no podría asociarse ni al bit "0" ni al bit "1".

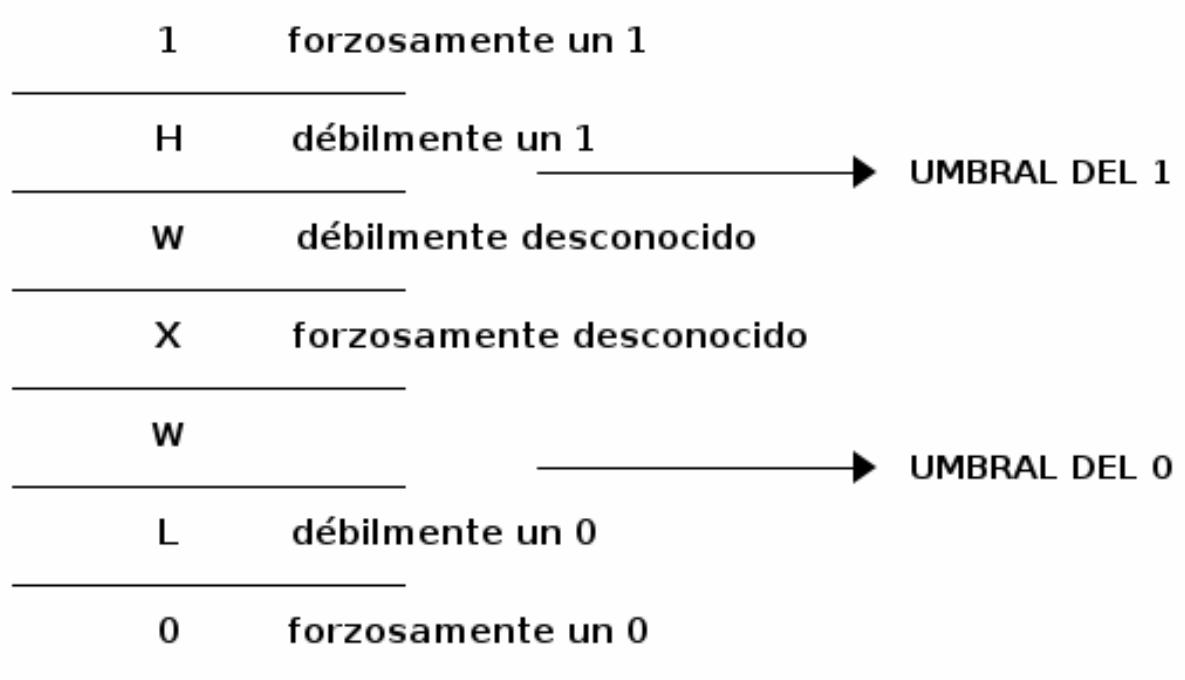
26.6. standard logic (std_logic): std_logic_1164

- El paquete "standard" de la librería "std" incorporado en el propio lenguaje VHDL, define un tipo de señal **bit** que únicamente admite 2 valores lógicos: el "0" y el "1", que se corresponden con los valores lógicos del álgebra de Boole. Para definir señales con más valores lógicos que se correspondan con valores físicos se desarrolló el paquete **std_logic_1164**
- La librería IEEE desarrollada por la asociación "IEEE Computer Society" ha definido una serie de paquetes standard dentro de los cuales está el paquete std_logic_1164.
- El paquete std_logic_1164 define entre otras cosas tipos de señales digitales entre las que se encuentran los tipos **std_logic** y **std_logic_vector**
- Las señales del tipo **std_logic** pueden tener no solo los valores binarios 0 y 1 como son las de tipo **bit** sino hasta 9 valores diferentes, con el objetivo de emular los valores de las señales electrónicas reales. Los valores posibles de una señal std_logic son:

```
-- valores lógicos de las señales std_logic para emular valores físicos reales:
-- '0': logic 0
-- '1': logic 1
-- '-': Don't care.
-- 'X': unknown. Impossible to determine this value/result.
-- 'U': uninitialized. This signal hasn't been set yet.
-- 'Z': High Impedance
-- 'W': Weak signal, can't tell if it should be 0 or 1.
-- 'L': Weak signal that should probably go to 0
-- 'H': Weak signal that should probably go to 1
```

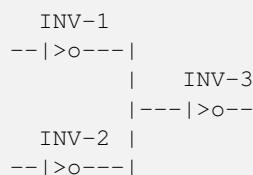
- Valores de las señales 0,1,H,L,W,Z,X,-,U

- 6 tipos tienen un valor definido, "mesurable": (Representación de los NIVELES LOGICOS(0,1,desconocido) con sus UM-BRALES)



- los niveles 0 y 1 se dividen cada uno de ellos en forzoso y débil
- el nivel desconocido se divide en forzoso, débil tirando a 1 y débil tirando a 0.
- una forma de interpretar esos estados es DIBUJANDO la FORMA una señal digital generada por un transmisor y observada a la salida de una línea serie y a la entrada del receptor: se genera un 1 forzoso y se recibe un 1 débil ó un valor desconocido
- 3 Valores son indefinidos, "unmesurable".

- : don't care → puede tomar cualquiera de los valores definidos "mesurables" y no → afecta al funcionamiento del circuito.
U : indefinido → representa el estado de un circuito secuencial al encenderse y sin → estado de reset de reset. Puede ser cualquiera de los 6 valores definidos pero al no → tener estado inicial, no puede determinarse su estado.
Z: alta impedancia : circuito abierto → desconexión →
si pongo el osciloscopio observo que el valor puede ser cualquiera→ se ve ruido
concepto de driver → la salida de dos inversores INV-1 e INV-2 conectada a un bus y →
la entrada de un inversor INV-3 conectada al mismo bus



Las salidas de los inversores INV-1 e INV-2 si están en estado Z se desconectan del → bus

26.7. std_logic_vector : downto , to

- El tipo std_logic_vector es un bus o conjunto de señales o matriz o vector formado por señales del tipo std_logic.

- BUS: es un agrupamiento hilos o pistas físicas por donde se transportan (autobus) las señales digitales en tensión o corriente y que conectan dos dispositivos (origen y destino): Pej el bus de datos de 10 hilos o el bus de los hilos de 10 switches o el bus de los leds, etc. Un bus es necesario para conectar 10 switches con 10 pines de la FPGA.
 - Desde el punto de vista de vhdl un bus de 10 hilos es un VECTOR de 10 componentes o 10 bits.
- std_logic_vector SW (9 DOWNTO 0) :
 - es un vector de 10 componentes equivalente a un bus de 10 hilos que hemos bautizado con el nombre de SW
 - SW(5): es el bit de la posición 5.
 - DOWNTO significa el orden descendente de los bits: SW(9)-SW(8)... SW(1)-SW(0). SW(9) posicionado a la IZDA es el bit más significativo (MSB) y SW(0) posicionado a la DCHA el bit menos significativo (LSB).
- std_logic_vector SW (9 TO 0) :
 - TO significa el orden ascendente de los bits: SW(0)-SW(1)... SW(8)-SW(9). SW(9) posicionado a la DCHA es el bit menos significativo (LSB) y SW(0) posicionado a la IZDA es el bit más significativo (MSB).

26.8. Librería standard: paquetes STANDARD, TEXTIO

- Ejemplo de circuito que utiliza el tipo de señal BIT del paquete STANDARD que NO SE DECLARA.
 - módulo fuente *gate_and_bit.vhdl* descriptor del hardware en lenguaje VHDL:


```
-- Sistemas Digitales I año 2020
-- Upna 7 de Febrero 2020
-- Laboratorio Remoto de la Upna
-- FICHERO gate_and.vhdl : OBLIGATORIAMENTE debe ser el MISMO nombre que el utilizado en ENTITY.
-- tutorial: primera práctica en aula
-- SSDDI 2020 Febrero 7

-- El tipo de señal "bit" se define en el paquete Standard.vhdl

-- Entidad
entity gate_and is
  port (
    SW: in std_logic_vector(9 downto 0);
    LEDR: out std_logic_vector(9 downto 0)
  );
end gate_and;

--ARQUITECTURA
architecture rtl of gate_and is
begin
  LEDR(0) <= SW(0) and SW(1);
end rtl;
```
- No es necesario declarar el paquete "STANDARD" de la librería "std" porque el COMPILADOR dispone de él internamente
- Ejemplo de circuito que utiliza el tipo de señal BIT del paquete STANDARD y se declara explicitamente
 - módulo fuente *gate_and_bit.vhdl* descriptor del hardware en lenguaje VHDL:


```
-- Sistemas Digitales I año 2020
-- Upna 7 de Febrero 2020
-- Laboratorio Remoto de la Upna
-- FICHERO gate_and.vhdl : OBLIGATORIAMENTE debe ser el MISMO nombre que el utilizado en ENTITY.
```

```
-- tutorial: primera práctica en aula
-- SSDDI 2020 Febrero 7

-- El tipo de señal "bit" se define en el paquete Standard.vhdl

library std;
use std.standard.all;

-- Entidad
entity gate_and is
  port (
    SW: in std_logic_vector(9 downto 0);
    LEDR: out std_logic_vector(9 downto 0)
  );
end gate_and;

--ARQUITECTURA
architecture rtl of gate_and is
begin
  LEDR(0) <= SW(0) and SW(1);
end rtl;
```

- No es necesario declarar el paquete "STANDARD" de la librería "std" porque el COMPILADOR dispone de él internamente, pero se podría declarar en el módulo fuente de la forma:

```
library std;
use std.standard.all;
```

- Los paquetes de las librerías son ficheros VHDL, como por ejemplo el fichero "standard.vhdl". A continuación tenemos una descripción parcial del paquete STANDARD en el fichero "standard.vhdl"

```
-- The sven STANDARD package.
-- This design unit contains some special tokens, which are only
-- recognized by the analyzer when it is in special "bootstrap" mode.

package STANDARD is

  -- predefined enumeration types:

  type BIT is ('0', '1');

  -- Unicamente se pone la definición del tipo de señal BIT para no extender este ←
  -- documento, pero el paquete contiene más definiciones de tipos de señales etc.

end STANDARD;
```

- Fichero textio.vhdl donde se define el paquete TEXTIO de la librería "std".

```
-- textio.vhdl

library std; use std.standard.all;          -- needed for bootstrap mode

package TEXTIO is

  -- Type Definitions for Text I/O

  type TEXT is file of STRING;  -- a file of variable-length ASCII records
  procedure WRITE (L: inout LINE; VALUE: in BIT;
                   JUSTIFIED: in SIDE := RIGHT; FIELD: in WIDTH := 0);
```

-- CUIDADO: no están todas las definiciones de tipos, procedimientos, etc

- No es necesario declarar el paquete "TEXTIO" de la librería "std", pero se podría declarar de la forma

```
library std;
use std.textio.all;
```

- Ejemplo de uso del paquete TEXTIO en el módulo fuente hello_world.vhdl

```
library std;
use std.textio.all;

entity HelloWorld is
end entity;

architecture sim of HelloWorld is
begin

    process is
    begin

        report "Hello World!";
        wait;

    end process;

end architecture;
```

- La librería std y sus paquetes están disponibles en la carpeta donde se ha instalado el simulador Modelsim-Altera

-/modelsim_ase/vhdl_src/std/standard.vhdl
-/modelsim_ase/vhdl_src/std/textio.vhdl

27. Sentencias Concurrentes

27.1. Ejemplo: Unidad de diseño "matricula.vhd"

Circuito Digital matricula

- Ejercicio 1.5 del libro de problemas resueltos de circuitos electrónicos.

- Unidad *matricula.vhdl*

```
-- SSDD I
-- Ejercicio 1.5
-- matricula.vhdl

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity matricula is
    port (
        SW: in std_logic_vector(9 downto 0);
        LEDR: out std_logic_vector(9 downto 0)
    );
end matricula;

architecture puertas of matricula is
    signal a, b, c: std_logic; ❶
begin
    a          <= SW(0) and SW(1); ❷
    b          <= SW(1) and SW(2); ❸
    c          <= SW(3); ❹
    LEDR(0)    <= a or b or c; ❺
end puertas;
```

- Verificar el buen funcionamiento del circuito en el laboratorio remoto.

27.2. Significado

- ❶ la declaración **signal** se utiliza para declarar señales internas a la arquitectura, a diferencia de los puertos de la entidad que son señales externas al circuito. Las señales *a*, *b* y *c* son internas.
- ❷, ❸, ❹, ❺ Las sentencias \leftarrow se ejecutan en el instante en que alguna de las señales a la derecha de \leftarrow cambia su valor. Por lo tanto las 4 sentencias no se ejecutan secuencialmente, sino CONCURRENTEMENTE. Por ejemplo, si el valor de la señal externa *SW(1)* cambia en un momento dado de "0" a "1", entonces, las asignaciones \leftarrow se ejecutan en paralelo, concurrentemente, al mismo tiempo, por lo que el valor de las señales *a* y *b* también cambia y por lo tanto *LEDR(0)* también cambiará; en resumen, el cambio en *SW(1)* puede provocar un cambio simultáneo en *a,b,LEDR(0)*... lo mismo que ocurriría en un circuito digital electrónico de puertas lógicas donde todas las puertas lógicas cambian sus salidas en el instante en el que lo hacen sus entradas.
 - Por lo tanto el orden en que se ejecutan las sentencias dentro de la arquitectura NO ES SECUENCIAL. Son los eventos de las señales sensibles los que indican el orden en que se ejecutan las sentencias, pudiendo ocurrir que dos o más sentencias se ejecuten simultáneamente, CONCURRENTEMENTE. Esta concurrencia es necesaria ya que en los circuitos digitales reales formados por puertas lógicas u otro tipo de bloques, dichas puertas y bloques funcionan concurrentemente, pudiendo cambiar la salida de distintas puertas o bloques al mismo tiempo.

28. Sentencias Secuenciales

28.1. Proceso/Process()

- Un proceso es un bloque de sentencias secuenciales, es decir, ejecutar un proceso significa ejecutar **todas** las sentencias de su cuerpo de forma secuencial empezando por la primera y siguiendo el orden hasta ejecutar la última sentencia del cuerpo.
- Únicamente las sentencias definidas como sentencias secuenciales pueden formar parte del cuerpo del proceso.
- ¿Cuando se ejecuta un proceso?
- Un proceso se ejecuta cuando hay un evento en una de las señales sensibles al proceso. Las señales sensibles al proceso se declaran entre paréntesis junto a la sentencia **PROCESS(sensitivity signals)**. Por lo tanto la sentencia process es una sentencias **concurrente** y las sentencias de su cuerpo son **secuenciales**.

```
<optional_label>: process(sensitivity signals) is
    Declaration(s)
begin
    Sequential Statement(s)
end process;
```

28.2. Ejemplo_1: matricula.vhd

- Arquitectura mediante la sentencia concurrente **process**
 - En el cuerpo del proceso se utilizarán la sentencia de asignación secuencial "`=`".
- Ejercicio 1.5 del libro de problemas resueltos de circuitos electrónicos
 - Unidad *matricula.vhdl*

```
-- Ejercicio 1.5
-- matricula.vhdl

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity matricula is
    port (
        SW: in std_logic_vector(9 downto 0);
        LEDR: out std_logic_vector(9 downto 0)
    );
end matricula;

architecture rtl_seq of matricula is
    signal a, b, c: std_logic;
begin
    process (SW(0), SW(1), SW(2), SW(3))
    begin
        a            <= SW(0) and SW(1);
        b            <= SW(1) and SW(2);
        c            <= SW(3);
        LEDR(0)     <= a or b or c;
    end process;
end rtl_seq;
```

- Verificar el buen funcionamiento del circuito en el laboratorio remoto.
- La lista de señales sensibles para la ejecución del proceso es: SW(0), SW(1), SW(2), SW(3)

- Un evento en alguna de las señales SW(0), SW(1), SW(2), SW(3), provoca la ejecución de todas las sentencias del cuerpo del process de forma secuencial.

```
process (SW(0), SW(1), SW(2), SW(3))
begin
    LEDR(0)    <= a or b or c;
    a          <= SW(0) and SW(1);
    b          <= SW(1) and SW(2);
    c          <= SW(3);
end process;
```

- ¿Qué ocurriría si el cuerpo del process tuviese otro orden como el siguiente?

28.3. Ejemplo_2: matricula.vhd

- Ejercicio 1.5 del libro de problemas resueltos de circuitos electrónicos
- La tabla de la verdad
 - 4 entradas : SW(0), SW(1), SW(2), SW(3)
 - 1 salida : LEDR(0)
 - N° de filas = $2^4 = 16$
 - los minitérminos SW(0)*SW(1)*SW(2)*SW(3) que hacen 0 a la función son: m₀, m₁, m₄, m₈ y m₉
- Arquitectura mediante la sentencia concurrente **process** y la sentencia secuencial **case**
 - La arquitectura describe literalmente la Tabla de la Verdad
- Unidad *matricula_case.vhdl*

```
-- SSDD I
-- Ejercicio 1.5
-- matricula_case.vhdl

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity matricula_case is
    port (
        SW: in std_logic_vector(3 downto 0);
        LEDR: out std_logic_vector(0 downto 0)
    );
end matricula_case;

architecture behavioral_seq of matricula_case is
begin
    process (SW)
    begin
        case SW is
            when "0000" => LEDR <= "0";
            when "0001" => LEDR <= "0";
            when "0100" => LEDR <= "0";
            when "1000" => LEDR <= "0";
            when "1001" => LEDR <= "0";
            when others => LEDR <= "1";
        end case;
    end process;
end behavioral_seq;
```

**atención**

la constante 0 en la asignación `LEDR <= "0"` da error si se pone '0' ya que LEDR es un bus, no un hilo.

**importante**

La idea fundamental de este ejercicio es la arquitectura. Mediante la sentencia secuencial `case` describimos la tabla de la verdad. No es necesario saber la función lógica que relaciona la entrada y la salida.

- Verificar el buen funcionamiento del circuito en el laboratorio remoto.

A. Herramienta Quartus

A.1. Instalación del software: Suite Quartus Prime Lite

A.1.1. En el PC personal

- Sistema Operativo Windows 10 (año 2021) nativo o sobre una máquina virtual.
- Herramienta EDA de Intel: Quartus Prime Lite 20.0 correspondiente al año 2020. Cada año se publica una versión nueva, la del año 2021 será la versión 21.0 y así sucesivamente: La versión de Quartus Prime Lite instalada en el laboratorio de la UPNA es la "20.1.0.711"
- El instalador se puede descargar desde distintos enlaces:
 - UPNA → Miaulario: Herramientas → SOFTWARE QUÁRTUS → instrucciones de cómo realizar la instalación
 - UPNA → Miaulario: Recursos/Prácticas/Software Quartus/instrucciones de cómo realizar la instalación
 - Repositorio de Intel:

Google Search: Intel Download Center for FPGAs Quartus Prime
<https://www.intel.com/content/www/us/en/programmable/downloads/download-center.html>

Es necesario *registrararse*
 todo el paquete o ficheros individuales (Quartus Prime Lite y Devices Cyclone V) :
 Ir a Web Download Center-> elegir la versión 20.1 -> Lite -> Windows -> Ficheros ↔
 individuales:

QuartusLiteSetup-20.1.0.711-windows.exe
 ModelSimSetup-20.1.0.711-windows.exe
 cyclonev-20.1.0.711.qdz

- Una vez descargados los 3 ficheros en el ordenador personal proceder al proceso de instalación:

Tanto QuartusLiteSetup como ModelSimSetup son ficheros ejecutables de instalación: ↔
 Instalar Quartus y Modelsim ejecutando el Setup.
 Instalar el software asociado al dispositivo FPGA de la familia Cyclone V después de ↔
 haber instalado Quartus Lite: El fichero qdz ha de instalarse utilizando la ↔
 aplicación de instalación "Device Installer" que se encuentra en Windows 10 -> ↔
 Programas de Aplicación -> Intel Fpga Quartus -> Device Installer

A.1.2. Quartus Prime Preinstalado en el Escritorio Virtual UPNA

- Se puede ejecutar Quartus Prime Lite en modo remoto conectándose desde el navegador al Escritorio Virtual de la Upna
- Quartus Accesible Remotamente: Aulario Virtual, UDS Connection → UDS web: **Upna Escritorio Virtual** → Descargar e Instalar UDS cliente en Windows.
 - UDS web: Click Menú en Windows 10 Teleco.→ Conexiones: desde PC Upna o desde PC personal.
 - Windows 10 → Programas → Intel → Quartus Prime Lite 20 (de las 7 aplicaciones del entorno Quartus, click en Quartus Prime (quartus)

A.1.3. Mac OS X

- Virtual Box : Quartus no está disponible para las computadoras Mac por lo que es necesario instalarse una máquina virtual como *VirtualBox* y en la máquina virtual instalarse Windows 10 y posteriormente Quartus.
 - Descarga e instalación

- Descargas: para cualquier plataforma
 - Instalación de VirtualBox
 - Manual de VirtualBox
- Windows 10:
- Windows 10: Imagen ISO del instalador.
 - VirtualBox + Windows + App : 20GB
 - Para instalar Windows : https://docs.oracle.com/cd/E26217_01/E26796/html/qs-create-vm.html : Since you want to install an operating system in the virtual machine, you need to make sure the virtual machine can access the installation media. To do this, you edit the virtual machine settings. In Oracle VM VirtualBox Manager, select the virtual machine and then in the toolbar click the Settings button. The Settings window is displayed. In the navigation on the left, select Storage as shown in Figure 6.9.
- Compartir Carpeta entre la máquina virtual Windows y la máquina física Mac

A.2. Editar un fichero VHDL

A.2.1. Operación básica

- Abrir Quartus II
- Quartus II → File → New → VHDL File
- Barra de herramientas del editor VHDL
 - En el Área de Edición → Barra de Herramientas de Edición Click Dcha → Customize → Toolbars:Feedback → Customize → Seleccionar **Autocomplet Text** → mover a la dcha con el botón ">" → OK : El nuevo botón Autocomplet Text debe de aparecer en la barra de herramientas.
 - Seleccionar el botón **Autocomplet Text**
- Editar el fichero *prac1.vhd*

```
-- Sistemas Digitales I curso 2019-20
-- Practica 2 : Circuito combinacional de 3 puertas logicas
-- Objetivo    : Compilar, Simular, Fabricar y ;COMENTAR !! el codigo
--                : Utilizar los apuntes y personalizarlos.

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity prac1 is
  port
  (
    SW      : in  std_logic_vector (1 downto 0);
    LEDR   : out std_logic_vector (2 downto 0)
  );
end prac1;

architecture rtl of prac1 is
begin
  LEDR(0) <= NOT(SW(1) AND SW(0));
  LEDR(1) <= NOT(SW(1) OR SW(0));
  LEDR(2) <= SW(0) XOR SW(1);
end rtl;
```

- según vamos tecleando sentencias VHDL se **autocompletan** (versión 13.0sp1 de Quartus II, no en la versión 9.1sp2)
- Observar los botones de la barra de herramientas colocando encima el cursor

- botón ANALISIS : Analiza la sintaxis del código VHDL informando de los errores.
- Un proyecto nuevo equivale a una carpeta de trabajo nueva
- La carpeta de trabajo no puede ser una carpeta cualquiera. Ha de ser una carpeta de USUARIO, no de aplicaciones o del sistema.
- El nombre del proyecto ha de ser el mismo que el del fichero vhdl top
- El nombre del fichero vhdl ha de ser el mismo que el de la entidad

**atención**

El nombre de la entidad ha de ser el MISMO que el nombre del fichero vhd.

A.2.2. Insertar Plantillas de Sentencias VHDL

- El editor VHDL de Quartus permite insertar plantillas de bloques de sentencias VHDL, facilitando no tener que memorizarlas
- Desde el área de edición → botón "insert template" ó ir a Edit → Insert Template
 - VHDL → Constructs → Entity
 - sentencia Selected Signal Assignment : **with** : VHDL → Constructs → Concurrent Statement → Selected Signal Assignment
 - sentencia **case** : VHDL → Constructs → Sequence Statement → case

A.3. Crear un Proyecto a partir de un fichero vhd

- Abrir el fichero con Quartus : quartus_prac1.vhd
- Save As → Create new project with this file
 - Project name: prac1
 - Top level entity: prac1
 - File design: prac1.vhd
 - Device Family: Cyclone II
 - FPGA : EP2C35F672
 - EDA simulation tool: nada ó Modelsim-Altera (herramienta externa a QII como alternativa para la simulación)
 - Finish
- Si queremos realizar algún cambio en el Settings
 - Assignments → Settings
 - General → **Top level entity**: Selecciono el diseño que será la raíz en la jerarquía de múltiples diseños anidados
 - File → Selecciono los múltiples ficheros de unidades de diseño que forman el proyecto. Se puede añadir o eliminar del proyecto.
- Botón Start Compilation ó Processing → **Start Compilation**
- View → Utility Windows → Panel Project Navigator
 - Navegar entre ... Hierarchy - Files - Unit Designs

B. Kit DE1-SoC

- Kit DE1-SoC de la empresa Terasic disponibles en el laboratorio de la UPNA y que contienen la FPGA de Intel.

- **Kit de Terasic : DE1-SoC**

La pastilla o circuito integrado programable del Kit es una SoC: System On Chip
SoC: integra 2 componentes: un procesador ARM Cortex-A9 más una FPGA Cyclone V (5 ↔ CSEMA5F31C6)

Al procesador ARM, Intel le llama "Hard Processor System"

FPGA: Field Programmable Gate Array: Dispositivo PROGRAMABLE para fabricar el circuito ↔ digital diseñado. El Circuito queda integrado en el Silicio de la FPGA -> ADIOS A LAS ↔ SOLDADURAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS EN UNA PLACA BASE !!!!

- Aunque posiblemente no conectéis una tarjeta FPGA a vuestra computadora mediante el cable USB-Blaster, en caso de hacerlo es necesario tener instalados los drivers del adaptador siguiendo las instrucciones: http://www.terasic.com.tw/wiki/Altera_USB_BlaSter_Driver_Installation_Instructions

C. Laboratorio Remoto de Sistemas FPGA

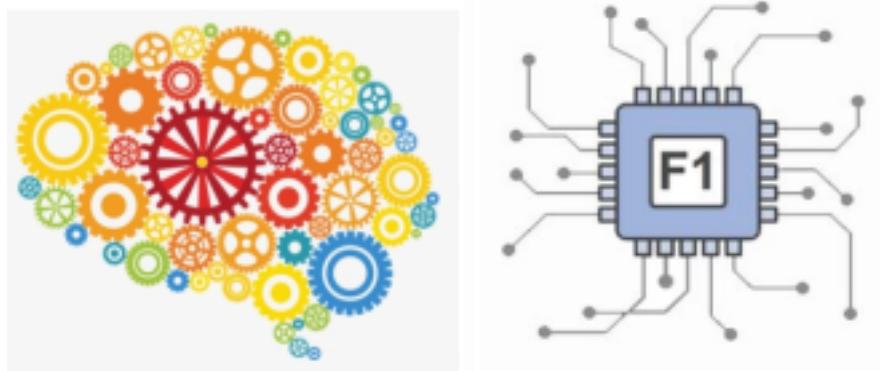
C.1. Acceso

- Mialario → Herramientas → Digital Circuits Design with VHDL → Ir a la herramienta Externa
- DE1-SoC IDE VHDL → Program Altera DE1-SoC DE1 in VHDL → Accede

The screenshot shows a Moodle course interface. At the top, there's a navigation bar with links like 'MiSitio', 'Taller de redacción...', 'ParaPlantilla01 Par...', '19 CI para ING TFE', and 'SISTEMAS DIGITALES I'. On the left, a sidebar has links for 'Inicio', 'Guía docente', 'Contenidos' (which is selected), 'Recursos', and 'Calendario'. The main content area is titled 'CONTENIDOS' and contains a button 'Añadir contenido +', a dropdown 'Más herramientas', and a 'Reordenar' button. Below these are several course modules, with the first one being 'Digital Circuits Design with VHDL'.

C.2. Objetivos

El objetivo del Laboratorio Remoto de FPGAs es motivar a **1@s alumn@s** de Circuitos Digitales al aprendizaje mediante la práctica desde cualquier lugar y en cualquier momento: Learn by Doing



C.3. Paciencia

La herramienta de diseño automatizado Quartus necesita tiempo en la fase de compilación de los diseños de los usuarios, del orden de un minuto... no un segundo, tener un poco de paciencia por favor.

C.4. IDE VHDL Web del Laboratorio Remoto

- Herramientas de Diseño del Circuito Digital
 - Navegador de Ficheros: Eliminar fichero vhdl, Crear Nuevo Fichero vhdl , Añadir (subir fichero vhdl)
 - Antes de Editar es necesario crear o subir un fichero vhdl.
 - Seleccionar el fichero top dentro de la jerarquía de ficheros que componen el diseño.

- * Pulsar el *botón PAPELERA* si se desea eliminar diseños previos
- * Pulsar el *botón SUBIR* si se desea insertar un diseño ya existente y almacenado ← previamente en nuestra computadora personal.
- * Pulsar el *botón NUEVO* si se desea generar un nuevo fichero VHDL.

- Editor del circuito:

- Edición del texto de la unidad de diseño en lenguaje VHDL
- Autocompletar comandos VHDL
- Notificación de Errores de Síntesis
- La edición del circuito tiene que estar limpia de errores de sintaxis para poder pasar a la fase de SÍNTESIS.
- Síntesis del circuito: Ejecuta las herramientas de diseño de Intel Quartus Prime: compilar (analizar, elaborar, mapear, fitter ...)
- Consola: mensajes del sintetizador Quartus Prime según va realizando las distintas fases de compilación.
- Interfaz de Usuario: Standard

- Documentación

- Asignación de señales: Nombres obligatorios de los puertos de los circuitos a diseñar
 - P.ej: SW(9 downto 0) : son los nombres lógicos de las señales que generan los 10 switches de la tarjeta DE1-SoC donde se encuentra la FPGA. : no se puede utilizar otro nombre ni dimensión para esas 10 señales. No sirve definir SW(9 downto 0) ni SW (0 up 1), etc ... en la ENTITY de la descripción del diseño de mi circuito.

Salir ahora

VHDL IDE for DE1-SoC

Nuevo
 Añadir
 Descargar

Top level entity:

Interfaz de usuario: **Estándar** | [Editar](#)

Documentación

- [Nombres de señales IO](#)

El resultado de la compilación se mostrará aquí

Información
 Sintetizar
 Enviar a la FPGA
Todos los cambios guardados

consola

C.5. Errores con el compilador del laboratorio remoto



atención

La edición en el lab_remoto da error de sintaxis si la primera sentencia "port map" tiene después del paréntesis un salto de línea, aunque la compilación la realiza de manera correcta.

atención

En la ventana de ficheros *.vhdl del circuito digital diseñado únicamente deben de estar únicamente los ficheros asociados al diseño, ya que el sintetizador compilará "todos" los ficheros de la ventana y generará el fichero bitstream-fpga con "todos" los ficheros y el fichero TOP LEVEL ENTITY ha de ser uno de ellos, el top de la jerarquía.

atención

El nombre de los ficheros *.vhdl y el de las *entity* ha de ser el mismo. En caso de que un fichero tenga una jerarquía de *entity* (muñeca rusa) el nombre del fichero ha de ser el de la entity "top" o de mayor rango en la jerarquía.

importante

El nombre y tipos de los puertos de la entidad no son arbitrarios. Han de ser los nombres y tipos especificados en el documento "Asignación de señales" que aparece en el apartado DOCUMENTACIÓN del IDE y que también se incluye en el apéndice de este documento.

importante

Si el sintetizador imprime en la pantalla el aviso "Waiting to start compilation(170.1). 6/6 compilers busy. 25 compilations before yours" es porque todos los procesos de compilación lanzados estén ocupados

importante

El Laboratorio Remoto se encuentra en fase de verificación. Si durante la programación de la FPGA el usuario recibe el aviso "No fue posible programar la FPGA. Por favor, prueba de nuevo, o contacta con un administrador.", es necesario pulsar el botón "Salir Ahora" y volver a pulsar "Enviar diseño al Dispositivo". Gracias por la colaboración.

C.6. Síntesis en el laboratorio remoto

- La fase de SINTESIS consiste en la generación por parte de QUARTUS del fichero BITSTREAM que generará el circuito digital en el Silicio de la FPGA.
- Quartus Prime Lite Edition está instalado en el servidor del laboratorio remoto, el cual no es accesible por el usuario.
- Pulsar el **botón SINTESIS** para generar el BITSTREAM : Quartus tarda un tiempo en realizar toda la compilación del fichero VHDL editado, y es necesario esperar un par de minutos a que se genere el bitstream: Durante este tiempo Quartus informa al usuario del proceso de compilación a través de la consola.
- Si hay errores en el proceso de compilación es necesario volver a la fase de Edición y corregirlos.

```

console gate_and.map.summary gate_and.fit.summary

$ quartus_map gate_and --source COMPILATION_DIRECTORY/gate_and.vhd1 --family "Cyclone IV E" --part EP4CE115F29C7
Info: ****
Info: Running Quartus Prime Analysis & Synthesis
Info: Version 17.1.0 Build 590 10/25/2017 SJ Lite Edition
Info: Copyright (c) 2017 Intel Corporation. All rights reserved.

Info: Total CPU time (on all processors): 00:00:03
Info (293000): Quartus Prime Full Compilation was successful. 0 errors, 665 warnings
Info (23030): Evaluation of Tcl script INTEL_FPGA_DIRECTORY/quartus/common/tcl/internal/qsh_flow.tcl was successful
Info: Quartus Prime Shell was successful. 0 errors, 665 warnings
  Info: Peak virtual memory: 794 megabytes
  Info: Processing ended: Fri Feb 7 10:49:09 2020
  Info: Elapsed time: 00:01:07
  Info: Total CPU time (on all processors): 00:01:24

[Build succeeded after 1 minutes and 45 seconds]

```

The screenshot shows the VHDL IDE interface for the DE2-115 board. At the top, there's a navigation bar with 'Leave now' and tabs for 'VHDL IDE' and '(DE2-115)'. A green message box in the center says 'The program was successfully verified and compiled (10:49:12.)'. Below this, there are buttons for 'New', 'Add', 'Download', 'Information', 'Synthesize' (which is checked), 'Upload into device', and a status message 'All changes saved.' On the left, there's a file list with 'gate_and.vhd1' and icons for 'Edit' and 'Delete'. On the right, a code editor window displays the following VHDL code:

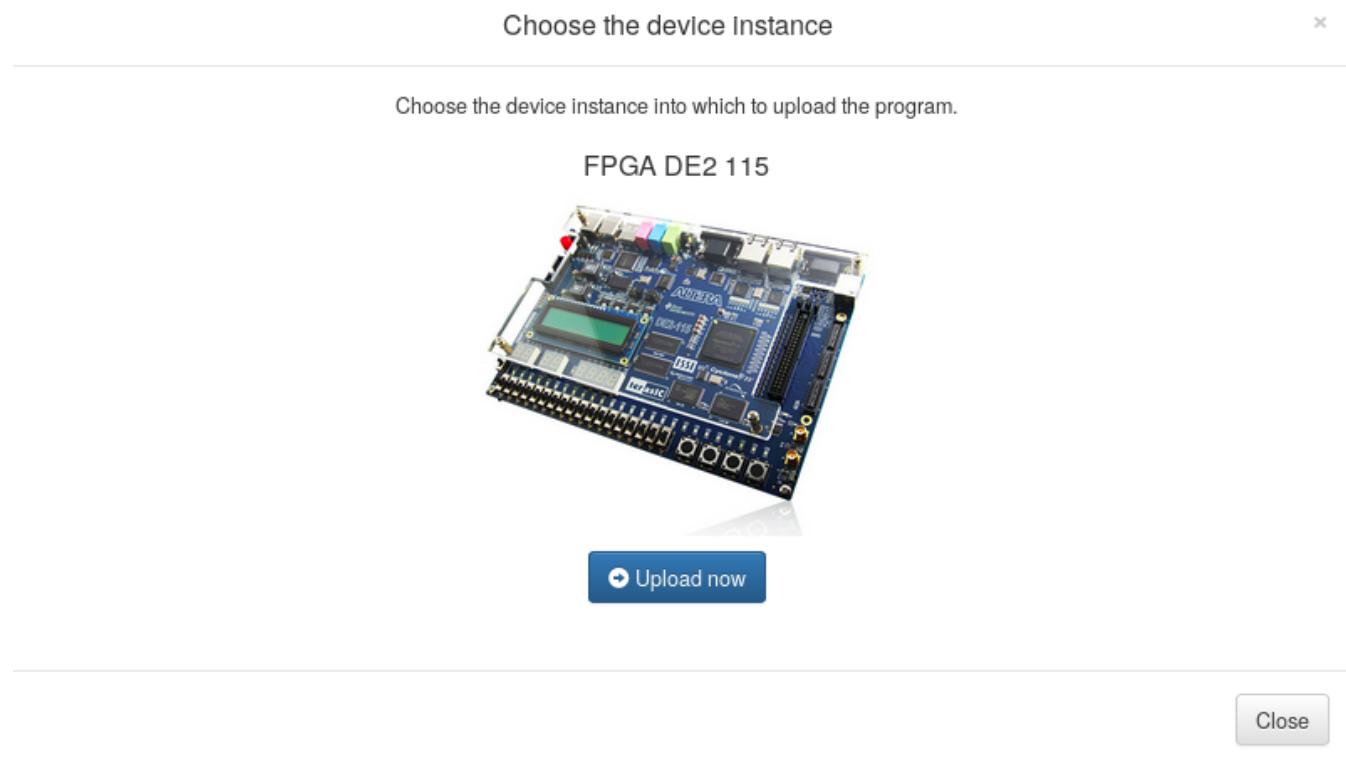
```

1 -- Sistemas Digitales
2 -- gate_and.vhd1
3
4 --library ieee;
5 --use ieee.std_logic_1164.all;
6

```

C.7. Fabricación del Circuito Digital

- En esta fase se va a proceder a fabricar el circuito digital, diseñado con el IDE, programando la FPGA con el fichero bitstream para lo cual pulsamos el botón **ENVIAR AL DISPOSITIVO** del IDE para abrirse una nueva ventana:



- Pulsar el **Botón Upload Now** para transferir Diseño al Servidor de Tarjetas FPGA y abrirse una nueva ventana:

UNIFESP
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
1933

Labs Land

04:23 Leave now

Altera FPGA Laboratory

Welcome to the Altera DE2-115

Your own programs

Your FPGA IDE program

This is the last program that you just prepared in the FPGA IDE editor.

Program into FPGA

Demonstration programs

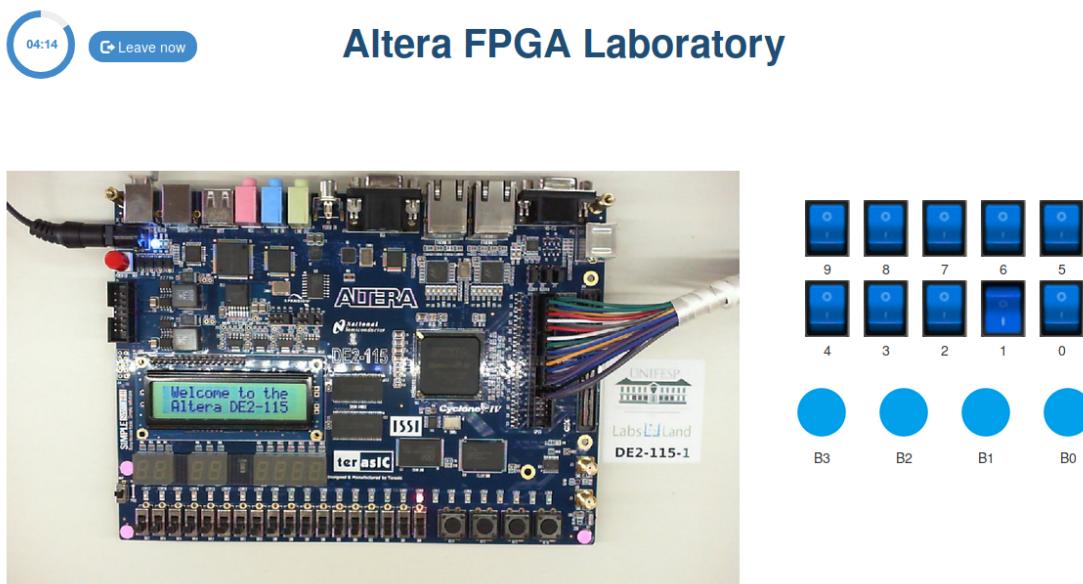
Blinking LED

One of the LEDs will blink.

- En este caso el sistema ha seleccionado la tarjeta DE2-115 del laboratorio remoto de la Universidad UNIFESP en Sao Paulo, Brasil. El Laboratorio remoto de la Upna y de Unifesp dispone de 10 tarjetas DE1-SoC y 4 DE2-115.
- Pulsar el **Botón Programar FPGA** para fabricar el circuito diseñado en el Silicio de la FPGA y abrirse una nueva ventana con los switches y botones virtuales de la tarjeta

C.8. Interfaz Web de Visualización de la Tarjeta y Manejo de Switches y Botones

- Una vez programada la FPGA de la tarjeta DE1-SoC con el circuito digital diseñado se procede a su verificación mediante la activación de los SWITCHES y BOTONES y la visualización de los LEDS y DISPLAYS 7-SEG.
- Pulsar los switches y/o botones virtuales para verificar el funcionamiento del circuito digital fabricado.



D. Identificación de los puertos

Documentación - Asignación de señales

LabsLand proporciona este conjunto de entradas virtuales que podrás ver cuando accedas al laboratorio:

Nombre	Descripción
SW: in std_logic_vector(9 downto 0)	10 switches virtuales, numerados de 0 a 9. Podrás ponerlos a 1 o 0 hasta que vuelvas a cambiar el valor.
KEY: in std_logic_vector(3 downto 0)	4 botones virtuales, numerados 0 a 3. Por defecto, valdrán '0', y cuando haces click valdrán '1' por un periodo de tiempo breve, volviendo a '0' enseguida. Puedes mantenerlo pulsado para que valga '1' más tiempo.

Además, podrás referirte a los periféricos de la tarjeta con los siguientes nombres abstractos (que serán los mismos en todas las placas):

Nombre	Descripción
CLOCK_50: in std_logic	Reloj que trabaja a 50 MHz.
LEDR: in std_logic_vector(9 downto 0)	10 LEDs rojos, numerados de 0 a 9. Está garantizado que serán rojos.
LED: in std_logic_vector(9 downto 0)	10 LEDs, numerados de 0 a 9. Dependiendo de la placa, serán los mismos que los verdes o rojos.
HEX0: in std_logic_vector(6 downto 0)	Display 7-segmentos número 0.
HEX1: in std_logic_vector(6 downto 0)	Display 7-segmentos número 1.
HEX2: in std_logic_vector(6 downto 0)	Display 7-segmentos número 2.
HEX3: in std_logic_vector(6 downto 0)	Display 7-segmentos número 3.
HEX4: in std_logic_vector(6 downto 0)	Display 7-segmentos número 4.
HEX5: in std_logic_vector(6 downto 0)	Display 7-segmentos número 5.

E. Listado incompleto de sentencias concurrentes y secuenciales

VHDL Cheat-Sheet

Copyright: 2007 Bryan J. Mealy

Concurrent Statements		Sequential Statements
Concurrent Signal Assignment (dataflow model)	↔	Signal Assignment
<code>target <= expression;</code>		<code>target <= expression;</code>
<code>A <= B AND C; DAT <= (D AND E) OR (F AND G);</code>		<code>A <= B AND C; DAT <= (D AND E) OR (F AND G);</code>
Conditional Signal Assignment (dataflow model)	↔	if statements
<code>target <= expressn when condition else expressn when condition else expressn;</code>		<code>if (condition) then { sequence of statements } elsif (condition) then { sequence of statements } else --(the else is optional) { sequence of statements } end if;</code>
<code>F3 <= '1' when (L='0' AND M='0') else '1' when (L='1' AND M='1') else '0';</code>		<code>if (SEL = "111") then F_CTRL <= D(7); elsif (SEL = "110") then F_CTRL <= D(6); elsif (SEL = "101") then F_CTRL <= D(1); elsif (SEL = "000") then F_CTRL <= D(0); else F_CTRL <= '0'; end if;</code>
Selective Signal Assignment (dataflow model)	↔	case statements
<code>with chooser_expression select target <= expression when choices, expression when choices;</code>		<code>case (expression) is when choices => {sequential statements} when choices => {sequential statements} when others => -- (optional) {sequential statements} end case;</code>
<code>with SEL select MX_OUT <= D3 when "11", D2 when "10", D1 when "01", D0 when "00", '0' when others;</code>		<code>case ABC is when "100" => F_OUT <= '1'; when "011" => F_OUT <= '1'; when "111" => F_OUT <= '1'; when others => F_OUT <= '0'; end case;</code>
Process (behavioral model)		
<code>opt_label: process(sensitivity_list) begin {sequential_statements} end process opt_label;</code>		
<code>proc: process(A,B,C) begin if (A = '1' and B = '0') then F_OUT <= '1'; elsif (B = '1' and C = '1') then F_OUT <= '1'; else F_OUT <= '0'; end if; end process proc;</code>		

La sintaxis de tipos de valores, señales, sentencias, etc en [VHDL:Hoja de Referencias Básica](#)

F. VHDL: Hoja de Referencia Básica

Cuadro 1: An example table

Category	Definition	Example
Identifier Names	Can contain any letter, digit, or underscore _ Must start with alphabetic letter Can not end with underscore or be a keyword Case insensitive	q0 Prime_number lteflg
Signal Values	'0' = logic value 0 '1' = logic value 1 'Z' = high impedance 'X' = unknown value	
Numbers and Bit Strings	<base>#xxx# B = binary X = hexadecimal O = octal	35 (default decimal) 16#C# = "1100" X"3C" = B"00111100" O"234" = B"010011100"
Generic statement	Associates an identifier name with a value that can be overridden with the generic map statement	generic (N:integer := 8);
Generic map	Assigns a value to a generic parameter	generic map (N => 16)
Signals and Variables Types	signal (used to connect one logic element to another) variable (variables assigned values in process) integer (useful for loop control variables)	signal d : std_logic_vector(0 to 3); signal led: std_logic; variable q: std_logic_vector(7 downto 0); variable k: integer;

Cuadro 1: (continued)

Category	Definition	Example
Program structure	<pre> library IEEE; use IEEE.STD_LOGIC_1164.all; entity <identifier> is port (<port interface list>); end <identifier>; architecture <identifier> of <entity_name> is begin process (clk, clr) begin {concurrent_statement} end <identifier>; end </pre>	<pre> library IEEE; use IEEE.STD_LOGIC_1164.all; entity Dff port(clk : in STD_LOGIC; clr : in STD_LOGIC; D : in STD_LOGIC; q : out STD_LOGIC); end Dff; architecture Dff of Dff is begin *process* (clk, clr) begin if(clr = 1) then q <= 0; elsif (rising_edge(clk)) then q <= D; end if; end process; end Dff; </pre>
Logic operators	not and or nand nor xor xnor	$z \Leftarrow \text{not } y;$ $c \Leftarrow a \text{ and } b;$ $z \Leftarrow x \text{ or } y;$ $w \Leftarrow u \text{ nand } v;$ $r \Leftarrow s \text{ nor } t;$ $z \Leftarrow x \text{ xor } y;$ $d \Leftarrow a \text{ xnor } b;$
Arithmetic operators	$+$ (addition) $-$ (subtraction) $*$ (multiplication) $/$ (division) (not synthesizable) rem (remainder)	$\text{count} \Leftarrow \text{count} + 1;$ $q \Leftarrow q - 1;$
Relational operators	$=, /=, >, <, >=, \Leftarrow$	if $a \Leftarrow b$ then if $\text{clr} = '1'$ then
Shift operators	shl (arg, count) shr (arg, count)	$c = \text{shl}(a, 3);$ $c = \text{shr}(a, 4);$
Assignment operator	$:=$ (variable) \Leftarrow (signal)	$z := z + x(i);$ $\text{count} \Leftarrow \text{count} + 1;$
Conditional Signal Assig.	$\text{signal} \Leftarrow \text{expression when}$ (condition) $. \quad \{\text{expression when}$ $(\text{condition}) \text{ else}\}$ expression ;	$F3 \Leftarrow '1' \text{ when } (L = '0' \text{ AND } M = '0' \text{ AND } N = '1')$ $. \quad '1' \text{ when } (L = '1' \text{ AND } M = '1') \text{ else}$ $'0';$

Cuadro 1: (continued)

Category	Definition	Example
Selective Signal Assig.	<pre>with ((select expression) select . {{assign expresion} when {select value},} . {assign expresion} when others (REQUIRED);</pre>	<pre>with ((L = '0' and M = '0' and N = '1') . or (L = '1' and M = '1')) select . F3 <= '1' when '1', . '0' when '0', . '0' when others (REQUIRED);</pre>
process	<pre>[<id>] process(<sensitivity list> {{process declaration}} begin {{sequential statement}} end process [<id>]</pre>	<pre>process (a) variable j: integer; begin . j := conv_integer(a); . if (i = j) then . y(i) <= 1; . else . y(i) <= 0; . end if; end process;</pre>
if statement	<pre>if (expression1) then . {{statement;}} {{ elsif (expression2) then . {{statement;}} }}</pre> [[else (OPTIONAL) . {{statement;}}]] end if ;	<pre>if (clr = 1) then . q <= 0; elsif(clk'event and clk = 1) then . q <= D; end if ;</pre>
case statement	<pre>case expression is . ((when choices => {sequential . statement;})) {{ ... } . when others (OPTIONAL) => {sequential . statement;}) end case;</pre>	<pre>case s is . when "00" => z <= c(0); . when "01" => z <= c(1); . when "10" => z <= c(2); . when "11" => z <= c(3); . when others) => z <= c(0); end case;</pre>
for loop	<pre>for identifier in range loop {sequential statement} end loop;</pre>	<pre>zv := x(1); for i in 2 to 4 loop . zv := zv and x(i); end loop; z <= zv;</pre>
Component	<pre>component entity_name is . port (. (port_association_list); .); end component;</pre>	<pre>component mux2x1 is . port (. D: in std_logic_vector(1 downto 0); . C: in std_logic; . S: out std_logic .); end component;</pre>
Port map	<pre>instance_name : component_name port map (port_association_list);</pre>	<pre>M1 : mux21a port map(a => c(0), b => c(1), s => s(0), y => v);</pre>

G. Low-Carb VHDL Tutorial: Bryan Mealy

G.1. Examples Code

G.1.1. my_nand3

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity my_nand3 is
port ( A,B,C : in std_logic;
      F : out std_logic);
end my_nand3;
architecture ex_nand3 of my_nand3 is
begin
  F <= NOT (A AND B AND C);
--
-- An alternative approach for this statement:
-- F <= A NAND B NAND C;
--
end ex_nand3;
```

G.1.2. my_ckt_f3

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity my_ckt_f3 is
port ( L,M,N : in std_logic;
      F3 : out std_logic);
end my_ckt_f3;

architecture f3_1 of my_ckt_f3 is
  signal A1, A2 : std_logic; -- intermediate signals
begin
  A1 <= ((NOT L) AND (NOT M) AND N);
  A2 <= L AND M;
  F3 <= A1 OR A2;
end f3_1;
```

G.1.3. my_ckt_f3

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity my_ckt_f3 is
port ( L,M,N : in std_logic;
      F3 : out std_logic);
end my_ckt_f3;

architecture f3_3 of my_ckt_f3 is
begin
  F3 <= '1' when (L = '0' AND M = '0' AND N = '1')
    '1' when (L = '1' AND M = '1') else
    '0';
end f3_3;
```

G.1.4. mux4_t1

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
---
-- entity and architecture of 4:1 Multiplexor implemented using
-- conditional signal assignment.
---
entity my_4t1_mux is
port ( D3,D2,D1,D0 : in std_logic;
      SEL : in std_logic_vector(1 downto 0);
      MX_OUT : out std_logic);
end my_4t1_mux;

architecture mux4t1 of my_4t1_mux
begin
  MX_OUT <= D3 when (SEL = "11")
  D2 when (SEL = "10")
  D1 when (SEL = "01")
  D0 when (SEL = "00")
  '0';
end mux4t1;

```

G.1.5. my_ckt_f3

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity my_ckt_f3 is
port ( L,M,N : in std_logic;
       F3 : out std_logic);
end my_ckt_f3;

architecture f3_4 of my_ckt_f3 is
begin
  with ( (L = '0' AND M = '0' and N = '1') or (L = '1' AND M = '1') ) select
    F3 <= '1' when '1',
    '0' when '0',
    '0' when others;
end f3_4;

```

G.1.6. my_4t1_mux

```

library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

---
-- entity and architecture of 4:1 Multiplexor using selective
-- signal assignment.
---

entity my_4t1_mux is
port ( D3,D2,D1,D0 : in std_logic;
      SEL : in std_logic_vector(1 downto 0);
      MX_OUT : out std_logic);
end my_4t1_mux;

architecture mux4t1_2

```

```
begin
    with SEL select
        MX_OUT <= D3 when
            D2 when
            D1 when
            D0 when
            '0' when
end mux4t1_2;
```

H. Glosario

- * IDE: Integrated Development Environment
- * EDA: Electronic Design Automation
- * HDL: Hadware Description Language
- * VHDL: Very High Speed Integraged Circuits Hadware Description Language
- * FPGA: Field Programmable Gate Array