

Laboratorio 1:

Introducción al diseño digital con HDL y  
herramientas EDA de síntesis

Profesor

Kaleb Alfaro Bonilla

Estudiantes

Fiorela Chavarría Castrillo

William Sánchez Ramírez

Rolando Vega Marino

I Semestre 2024

## **Introducción al diseño digital con HDL y herramientas EDA de síntesis**

En el ámbito de la electrónica digital, los circuitos integrados desempeñan un papel fundamental, ya que proporcionan las funcionalidades necesarias para el procesamiento y la manipulación de señales digitales. En este informe, se explorará diversas características y tecnologías relacionadas con los circuitos integrados, centrándose en familias específicas como TTL y CMOS, así como en conceptos tales como tiempos de propagación, circuitos pull-up y pull-down, circuitos disparadores Schmitt, efecto de rebote y síntesis lógica.

### **Familia TTL serie 74**

Las familias TTL (Transistor-Transistor Logic) han sido ampliamente utilizadas en aplicaciones digitales debido a su bajo costo y su popularidad tanto en el mercado comercial como en el militar. En la actualidad, los dispositivos TTL son populares debido a su facilidad de uso en prototipos y proyectos educativos, gracias a su compatibilidad con breadboards. La serie 7400 ofrece una amplia gama de compuertas lógicas básicas, flip-flops y unidades lógicas aritméticas (ALU).

Entre las variantes de la serie 74, se destacan el 74L y el 74LS. El 74L, aunque obsoleto, se caracteriza por su bajo consumo y velocidades rápidas, mientras que el 74LS incorpora tecnología low-power Schottky para un rendimiento aún más eficiente. Por otro lado, el 74HC, basado en tecnología CMOS, ofrece velocidades más altas y un menor consumo de energía en comparación con sus predecesores, lo que lo convierte en una opción más moderna y eficiente.

### **Familia CMOS 4000**

En cuanto a la familia CMOS 4000, esta se caracteriza por operar con un rango de suministro de voltaje entre los 3 V a los 15 V, lo que proporciona flexibilidad en diferentes aplicaciones. Sus entradas de alta impedancia permiten una fácil integración con otros dispositivos. Los dispositivos CMOS 4000 ofrecen una corriente de salida nominal de aproximadamente 1 mA para garantizar un voltaje de salida adecuado para manejar las entradas, pero pueden alcanzar corrientes de hasta 5 mA con un suministro de 6 V o 10 mA con un suministro de 9 V, lo que los hace versátiles en distintos escenarios de aplicación.

Con un fan-out de hasta 50 entradas, estos dispositivos pueden manejar múltiples cargas sin afectar significativamente el nivel de voltaje de salida. Además, presentan un tiempo de propagación en el gate de 30 ns con una entrada de 9 V, lo que asegura un rendimiento eficiente en la transmisión de señales. Su frecuencia de operación puede alcanzar hasta 1 MHz. En cuanto al consumo de energía, estos dispositivos muestran un consumo que varía desde  $\mu\text{W}$  en bajas frecuencias hasta mW en altas frecuencias.

### **Cuidados en tecnologías CMOS**

Al manipular tecnologías CMOS, es fundamental tener en cuenta diversos cuidados. Esto incluye la protección electrostática (ESD protection), asegurarse de que el suministro esté apagado para prevenir daños por picos eléctricos o cortos, mantener los dispositivos

limpios para prevenir la contaminación, almacenarlos adecuadamente en lugares secos, tener cuidado con los pines para evitar daños y controlar la exposición al calor para prolongar la vida útil del dispositivo.

### **Parámetros de voltaje y corriente**

Tras haber explorado las características y cuidados asociados con la tecnología CMOS, es relevante profundizar en la interpretación y significado de algunos parámetros eléctricos como lo son  $V_{IL}$ ,  $V_{IH}$ ,  $V_{OL}$ ,  $V_{OH}$ ,  $I_{IK}$ ,  $I_{OK}$ .

Los parámetros  $V_{IL}$  y  $V_{IH}$  indican los voltajes mínimos y máximos de entrada, respectivamente, para que una señal digital sea reconocida como baja o alta. Por otro lado,  $V_{OL}$  y  $V_{OH}$  representan los voltajes mínimos y máximos de salida para una señal digital baja o alta. En cuanto a  $I_{IK}$  e  $I_{OK}$ , estos pueden ser interpretados como  $I_{IL}$  (Low-Level Input Current) y  $I_{IH}$  (High-Level Input Current), que son las corrientes mínimas y máximas de entrada necesarias para reconocer un nivel bajo o alto, respectivamente. Por último,  $I_{OL}$  y  $I_{OH}$  representan las corrientes mínimas y máximas de salida para niveles bajos y altos, respectivamente.

### **Tiempos de propagación**

Los tiempos de propagación en un circuito digital, representados por  $t_{PD}$ ,  $t_{PLH}$  y  $t_{PHL}$ , se refieren al tiempo que tarda una señal en viajar entre puntos específicos del circuito, así como el retardo en cambiar de estado.

El tiempo de propagación ( $t_{PD}$ ) se refiere al tiempo que tarda una señal en viajar a través de un medio de transmisión, como un cable o una guía de ondas, de un punto a otro. Este valor depende de las propiedades del medio y es crucial para determinar la velocidad de los circuitos digitales.

El retardo de propagación de apagado de bajo a alto ( $T_{PLH}$ ) y de alto a bajo ( $T_{PHL}$ ) indica el tiempo que tarda una señal en cambiar de un estado bajo a un estado alto y viceversa. Estos retardos son esenciales para evaluar el rendimiento de los circuitos digitales, ya que influyen en la velocidad y precisión de las señales transmitidas.

### **Tiempos de transición**

Los tiempos de transición total, subida y caída son parámetros fundamentales en el análisis de la dinámica de las señales en circuitos digitales. El tiempo de transición total ( $t_t$ ) representa la duración completa que tarda una señal en cambiar de un nivel de voltaje a otro, comprendiendo tanto el tiempo de subida ( $t_r$ ) como el tiempo de caída ( $t_f$ ). De esta manera, el tiempo de subida indica el lapso necesario para que el voltaje de la señal transite del 10 % al 90 % de su valor final, mientras que el tiempo de caída refleja el intervalo para pasar del 90 % al 10 % del valor final de la señal.

## Fan-Out

El concepto de fan-out se refiere al número máximo de cargas que una salida digital puede manejar sin alterar el nivel de voltaje de la señal de salida. Es un parámetro fundamental en el diseño de circuitos digitales, ya que determina la capacidad de una salida para impulsar múltiples dispositivos sin degradar la calidad de la señal.

En términos prácticos, el fan-out se especifica en función de la cantidad máxima de cargas equivalentes que puede manejar una salida digital. Una carga equivalente se define como una carga con una impedancia y capacitancia específicas que representan una carga estándar que puede ser impulsada por la salida.

Los valores típicos de fan-out varían según la tecnología utilizada en los circuitos digitales. En el caso de los circuitos TTL (Transistor-Transistor Logic), el fan-out suele estar en el rango de 10 a 20 cargas. Esto significa que una salida TTL puede controlar de 10 a 20 entradas TTL adicionales sin que se vea afectado el nivel de voltaje de la señal de salida.

Por otro lado, en los circuitos CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), el fan-out tiende a ser mucho mayor, generalmente en el rango de 50 a 100 o incluso más. Esta notable diferencia se debe a las características de bajo consumo de energía y alta impedancia de entrada de los dispositivos CMOS, lo que les permite manejar una mayor cantidad de cargas sin afectar el nivel de voltaje de la señal de salida.

Los dispositivos CMOS son ampliamente utilizados en aplicaciones que requieren eficiencia energética y una alta capacidad de manejo de carga, como microprocesadores y circuitos de memoria.

Características	TTL	CMOS
VCC o VDD	5 V	3-18 V
VSS	0V	0V
Tiempo de propagación ( $t_{PD}$ )	En el rango de varios nanosegundos a decenas de nanosegundos	En el rango de varias decenas de nanosegundos a varias centenas de nanosegundos
Tiempo de transición ( $t_t$ )	En el rango de varios nanosegundos a decenas de nanosegundos	En el rango de varias decenas de nanosegundos a varias centenas de nanosegundos

*Tabla 1. Diferencias de Tecnologías Circuitos Integrados*

## Circuitos Integrados 74\*00,74\*02,74\*04,74\*14, 4001, 4011, 4069 y 40106

Esta serie de circuitos integrados incluye una variedad de compuertas lógicas y buffers diseñados para diversas aplicaciones en electrónica digital. Por ejemplo, la serie 74x00 ofrece compuertas NAND cuádruples de dos entradas, mientras que la 74x02 proporciona compuertas NOR cuádruples de dos entradas. Además, la serie 74x04 consiste en inversores hexagonales, y la 74x14 ofrece inversores Schmitt-Trigger hexagonales. Por otro lado, los circuitos integrados 4001 y 4011 proporcionan puertas NOR y NAND cuádruples de dos

entradas, respectivamente. Además, el 4069 actúa como un búfer de inversión hexadecimal, y el 40106 ofrece inversores Schmitt-Trigger hexagonales. Estos dispositivos se utilizan en una variedad de aplicaciones que requieren operaciones lógicas y de control en sistemas digitales.

### **Compuerta NAND en circuitos integrados CMOS**

En la tecnología CMOS, una compuerta NAND de dos entradas se estructura típicamente con dos transistores tipo N en serie y dos transistores tipo P en paralelo. Cuando ambas entradas están en alto, los transistores tipo N conducen, creando un camino de baja resistencia a tierra, lo que lleva la salida a un nivel bajo. Por otro lado, cuando al menos una de las entradas es baja, los transistores tipo N se apagan y los transistores tipo P conducen, creando un camino de baja resistencia a VCC, lo que permite que la salida se eleve a un nivel alto. Esta configuración asegura que la salida de la compuerta NAND sea alta solo cuando todas las entradas están en bajo, y de lo contrario, la salida permanece en bajo.

### **Pull-Up y Pull-Down**

Los circuitos pull-up y pull-down son fundamentales en electrónica digital para establecer y discernir los valores de señales en los dispositivos, como las compuertas lógicas. Estos circuitos se encargan de determinar el nivel lógico de una señal de entrada.

El circuito pull-up, al recibir una entrada en 1, activa su función para conducir la tensión a través de una resistencia, generando un nivel lógico 0 en su salida. Cuando la entrada es 0, la salida se mantiene en alto.

Por otro lado, el circuito pull-down mantiene su entrada cerca del valor de 0, permitiendo que la salida sea 1 cuando se cierra el interruptor, acercándola al valor de la tensión de entrada.

Estas configuraciones son esenciales para garantizar una comunicación estable entre dispositivos como Arduinos o FPGAs y periféricos, asegurando una transmisión consistente de señales en niveles lógicos altos o bajos.

### **Disparador Schmitt (Schmitt Trigger)**

El Circuito Disparador Schmitt es un componente clave en electrónica digital que ofrece dos niveles de voltaje umbral distintos para las secciones de alto y bajo. Esto resulta en una señal con niveles definidos y menos susceptible al ruido externo.

En el caso específico del circuito 74x14, basado en la compuerta inversora 74HC14, se utiliza el circuito Schmitt para establecer niveles precisos y evitar la interferencia entre los niveles lógicos TTL del dispositivo. Esta implementación ayuda a mitigar la adhesión de ruido a la señal procesada, mejorando la calidad y confiabilidad de esta.

### **Circuito anti-rebote**

El efecto rebote surge debido a la naturaleza física de los interruptores, donde el voltaje experimenta fluctuaciones intermitentes durante la transición entre posiciones. Aunque

estas fluctuaciones son breves, pueden causar mal funcionamiento en ciertas aplicaciones. Para mitigar este efecto, se utilizan circuitos anti-rebote que presentan un comportamiento con memoria. Ejemplos de estos circuitos son los latch o flip-flops, que mantienen un valor de salida estable durante el tiempo de variación de la entrada hasta que se estabilice. Esto garantiza un rendimiento óptimo del interruptor y evita problemas causados por el rebote de los circuitos.

### **Modelado de comportamiento y de estructura**

En el diseño digital, el modelado estructural implica describir un módulo utilizando componentes básicos como compuertas lógicas. Por ejemplo, se puede diseñar un "Half-adder" utilizando una compuerta XOR y una compuerta AND. Por otro lado, el modelado por comportamiento implica describir un módulo basándose en su comportamiento, utilizando estructuras como if o case, y a menudo haciendo referencia a una tabla de verdad. Por ejemplo, se puede modelar un multiplexor basado en su comportamiento, sin considerar las compuertas específicas necesarias para implementarlo.

### **Proceso de síntesis lógica**

El proceso de síntesis lógica en el diseño de circuitos digitales implica transformar un diseño de alto nivel en un diseño de bajo nivel, utilizando elementos fundamentales. Por ejemplo, en el caso de Vivado, un diseño de alto nivel en SystemVerilog se convierte en un diseño RTL (Register-Transfer Level), el cual puede ser implementado en una FPGA o ASIC. Este proceso permite traducir la funcionalidad y la lógica del diseño original en una forma que puede ser implementada eficientemente en el hardware específico objetivo, ya sea una FPGA para prototipado rápido o un ASIC para producción en masa.

### **Funcionamiento y componentes de una FPGA**

Las FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays) son dispositivos altamente versátiles que permiten la implementación de diseños de circuitos digitales mediante lenguajes de descripción de hardware (HDL), como Verilog o VHDL. Sus componentes básicos comprenden una variedad de elementos configurables que incluyen puertos de entrada y salida para la comunicación con el exterior, bloques de memoria RAM para almacenar datos temporalmente, relojes para sincronizar operaciones, registros para almacenar información de manera temporal, y bloques lógicos combinacionales que pueden configurarse según la lógica deseada. Estos bloques lógicos combinacionales consisten en una matriz de puertas lógicas configurables que permiten al usuario definir funciones lógicas personalizadas. Además, las FPGAs suelen incluir otros recursos como bloques de multiplicadores, bloques DSP (Procesamiento de Señal Digital), y bloques de comunicación como puertos PCI Express, que amplían aún más su funcionalidad y flexibilidad en el diseño de circuitos digitales.

### **Referencias**

Harris, D. R., & Harris, S. (2007). Digital Design and Computer Architecture.