



EVOLUCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS LÓGICOS PROGRAMABLES (PLD)



Luis Alberto Vásquez Toledo



Mauricio López Villaseñor



Leonardo Palacios Luengas

Abstract

In this paper, the authors provide a comprehensive overview of technology based on Programmable Logic Devices (PLD) from its inception to the present. They discuss its integration capabilities, scope, and applications across various fields including research, education, and industry.

Resumen

En este trabajo de divulgación los autores describen un panorama general desde los inicios hasta la actualidad de la tecnología basada en los Dispositivos Lógicos Programables (PLD, por sus siglas en inglés), sus capacidades de integración, sus alcances y sus aplicaciones en diversas áreas de investigación, educación e industria.

Palabras clave: Circuitos Digitales, Dispositivos Programables, PLD, FPGA.

I. Generalidades de los PLD

Entenderemos como dispositivo de lógica programable a aquel dispositivo electrónico que, a partir de un circuito integrado (CI o chip), construido con un arreglo de compuertas lógicas, pueda configurarse al utilizar algún proceso de programación, de manera que genere un circuito digital con una función lógica cuyo comportamiento funcional satisfaga un diseño específico para alguna aplicación. Es decir, se fabrica un lote de un circuito integrado, vea la figura 1, con un único diseño y sin satisfacer una función en específica, en la que se establezcan conexiones de compuertas lógicas con un cierto comportamiento funcional antes de que éste pueda ser usado.

Este dispositivo puede ser programado por el fabricante (esto se conoce como “lógica programable de fábrica”) o por un



Figura 1. Lote de dispositivos semiconductores con un único diseño.

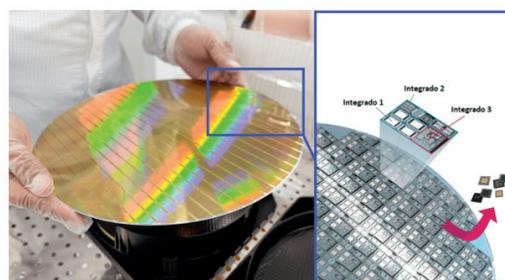


Figura 2. Construcción de un chip a partir de una oblea.

usuario que haya adquirido el circuito integrado y cuente con las herramientas capaces de programarlo (esto se conoce como “lógica programable de campo”). Muchos de estos dispositivos soportan la reprogramación o reconfiguración, permitiendo cambiar el diseño tantas veces como se requiera, mientras que en otros, una vez programados mantienen su comportamiento funcional hasta finalizar su ciclo de vida.

En este punto debe mencionarse que el diseño y la fabricación de los chips semiconductores se lleva a cabo mediante la creación de la oblea, la creación de intrincados patrones en la oblea, el corte preciso para formar troqueles individuales o chips semiconductores, entre otros procesos sofisticados, vea la figura 2. De manera que a medida que aumenta el volumen de producción de un diseño,

los costos disminuyen exponencialmente. Mientras que en los diseños que requieren de un bajo volumen de producción podrían ser prohibitivos para muchas empresas de la industria.

Tomando como base lo indicado en el párrafo anterior, se puede decir que la necesidad de crear dispositivos lógicos programables surge de la exigencia de reducir el tiempo de entrega por parte del fabricante del diseño de un chip y por otro reducir los costos de producción. Por supuesto, esto se logra con la implementación del diseño de un solo chip, sin una función en específica, en la que se pueda programar y con la posibilidad de obtener como producto final el diseño con el comportamiento funcional deseado. De esta forma, el fabricante sólo requiere reprogramar a un determinado número de estos chips con el diseño particular, como se indicó, reduciendo el tiempo de respuesta de entrega, así como de los costos, inclusive para requerimientos de un bajo volumen de producción.

En la actualidad es de suma importancia para la industria electrónica hacer llegar al mercado sus productos al reducir los tiempos de desarrollo, de producción y su costo. El conjunto de dispositivos programables ha resuelto en gran medida estas demandas. El avance que se ha logrado en el desarrollo de esta tecnología permite que un usuario final tenga la posibilidad de configurar un circuito digital con una función lógica específica, sin la necesidad de contar con una instalación especializada en la fabricación de circuitos integrados.

Sin menospreciar los avances que se han obtenido en los últimos años, los dispositi-

tivos programables durante mucho tiempo han jugado un papel clave en el diseño del hardware digital. Por ejemplo, uno de los primeros dispositivos programables de uso generalizado fue la memoria programable de sólo lectura, conocida como PROM (por el acrónimo de las siglas *Programmable Read-Only Memory*), de éstas pueden identificarse dos versiones, aquellas programables por máscara (programadas por el fabricante) y las programables en campo (programadas por el usuario final). A medida que fue avanzando la tecnología surgieron las EPROM (por el acrónimo de las siglas *Erasable Programmable Read-Only Memory*) y las EEPROM (por el acrónimo de las siglas *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*).

Existe otro tipo de dispositivos programables que están diseñados para implementar circuitos lógicos, llamado dispositivo lógico programable (PLD, por el acrónimo de las siglas *Programmable Logic Device*), y los arreglos de compuertas programables en campo (FPGA, por el acrónimo de las siglas *Field Programmable Gate Array*). En éstos existen dos ramas principales: los de lógica programable de fábrica y los de campo, como se comentó previamente. A su vez los PLD se clasifican en PLD simples (SPLD, por el acrónimo de las siglas *Simple Programmable Logic Devices*) y PLD complejos (CPLD, por el acrónimo de las siglas *Complex Programmable Logic Devices*). Mientras que en los SPLD se identifican dos categorías, los de matriz lógica programable (PAL, por el acrónimo de las siglas *Programmable Array Logic*) y los de matriz lógica genérica (GAL, por el acrónimo de las siglas *Generic Array Logic*) [1].

Es importante comentar que el rendimiento en general y en velocidad de un chip programable por máscara es superior al de un chip programable en campo. Sin embargo, estos últimos ofrecen ventajas que superan dicha deficiencia. Por ejemplo, éstos pueden programarse en minutos y tienen un menor costo para volúmenes bajos de producción.

Los dispositivos lógicos programables son convenientes para utilizarse en aparatos electrónicos que por su naturaleza sean factibles de reprogramar su chip, de manera remota por el proveedor, de tal forma que el usuario final obtenga, con una actualización, nuevas funciones que se reflejen en mayores prestaciones en su equipo, ver la figura 3. En resumen, se traduce como si el usuario final obtuviera un nuevo dispositivo con un hardware diferente y con mayores prestaciones, como se comentó.

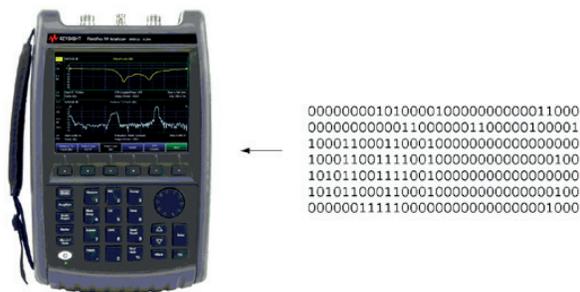


Figura 3. Aparato electrónico programado remotamente.

II. Clasificación de los Pld

En esta sección se describe a detalle cada uno de los dispositivos lógicos programables mencionados en I.

A. SPLD

Los SPLD se utilizan para aplicaciones

que solo exigen un número pequeño de entradas y salidas (I/O) para operar de manera simultánea. Son dispositivos de bajo consumo de energía, pequeños y económicos. Algunos productos comerciales se muestran en la tabla 1.

Fabricante	Dispositivos Lógicos Programables Simples
Altera	Clásicos, FLASHLogic
Atmel	PAL
Cypress	PAL
Lattice	GAL
Philips	PAL
Vantis	PAL

Tabla 1. Productos SPLD comerciales.

B. CPLD

Los CPLD se utilizan para aplicaciones que requieren un número grande de entradas y salidas (I/O) para operar de manera simultánea. Son dispositivos de bajo procesamiento de datos, al mismo tiempo son más grandes que los SPLD y más costosos. Algunos productos comerciales se muestran en la tabla 2.

Fabricante	Dispositivos Lógicos Programables Complejos
Altera	MAX 5000, 7000 y 9000
Atmel	ATF, ATV
Cypress	FLASH370, ULTRA37000
Lattice	IspLS11000 a 8000
Philips	XPLA
Vantis	MACH 1 a 5
Xilinx	XC9500, CoolRunner

Tabla 2. Productos CPLD comerciales

C. FPGA

Los FPGA son circuitos integrado que contiene Celdas Lógicas Configurables, las cuales se interconectan por medio de

una *Matriz de Interconexión Programable*. Algunos productos comerciales se muestran en la tabla 3.

Fabricante	Arreglo de Compuertas Programables en Campo
Actel	ACT 1 a 3, MX, SX
Altera	Flex, Cyclone, Stratix
Atmel	AT6000, AT40K
Lucent	ORCA 1 a 3
QuickLogic	pASIC 1 a 3
Vantis	VF1
Xilinx	Spartan, Artix, Kintex, Virtex

Tabla 3. Productos FPGA comerciales

Los FPGA son dispositivos electrónicos utilizados para construir arquitecturas reconfigurables de circuitos digitales [2]. Ofrecen una gran flexibilidad y son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones, desde electrónica de consumo hasta sistemas embebidos y computación de alto rendimiento. En la figura 4, se proporciona una breve descripción

considerando los inicios, desarrollo, expansión, avances, consolidación y tendencias futuras, también se muestran los principales fabricantes de FPGA.

III. Integración de circuitos integrados en un SPLD

Los circuitos integrados serie **74XX** originalmente fueron fabricados en tecnología de lógica transistor-transistor (TTL, por el acrónimo de las siglas *Transistor-Transistor Logic*) y forman una subfamilia de semiconductores, dentro del campo de la electrónica digital. Estos fueron ampliamente utilizados en la década de los sesenta y setenta para construir computadoras. La serie **74XX** contiene cientos de dispositivos, desde compuertas lógicas básicas (AND, OR, NOR, NAND, XOR y NOT) hasta flip-flops, contadores, unidades lógicas aritméticas, etc. Un SPLD, por ejemplo, una GAL sustituye aproximadamente a 100 circuitos integrados de la familia **74XX**.



Figura 4. Evolución de los FPGA

Esto se muestra en la figura 5.

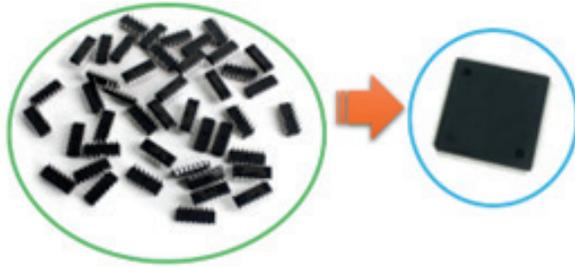


Figura 5. Integración en un SPLD

IV. Integración de SPLD en un CPLD

UN CPLD, por ejemplo, de la familia MAX5000, sustituye aproximadamente a 50 SPLD, por ejemplo, GAL, esto es aproximadamente a 5000 circuitos integrados de la familia 74XX. Esto se muestra en la figura 6.

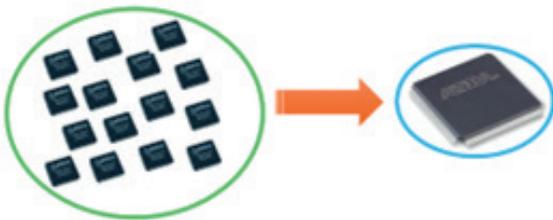


Figura 6. Integración en un CPLD

V. Arquitectura de los FPGA

De acuerdo con la figura 7, en una arquitectura básica de un FPGA se pueden identificar tres partes principales [3]: (a) Bloques de interconexión programable que permiten enlazar los diferentes bloques lógicos, bloques de memoria, bloques de entrada/salida y otros elementos dentro del dispositivo según el diseño del usuario. Estas interconexiones son configurables y se pueden adaptar dinámicamente para cumplir con los requisitos específicos de cada aplicación. Permiten establecer las conexiones eléctricas entre los diferentes elementos del FPGA de manera flexible y personalizable, lo que proporciona un alto grado de adaptabilidad y reconfigurabilidad en el diseño del circuito. (b) Los bloques de entrada/salida (IOB, por el acrónimo de las siglas *Input / Output Blocks*) facilitan la conexión del dispositivo con el entorno externo. Estos bloques proporcionan interfaces entre el FPGA y otros dispositivos o circuitos, permitiendo la entrada y salida de datos hacia y desde el FPGA. Los IOB pueden incluir una variedad de funcionalidades, como *buffers* de entrada y salida, terminación de señales, controladores de impedancia, y cir-

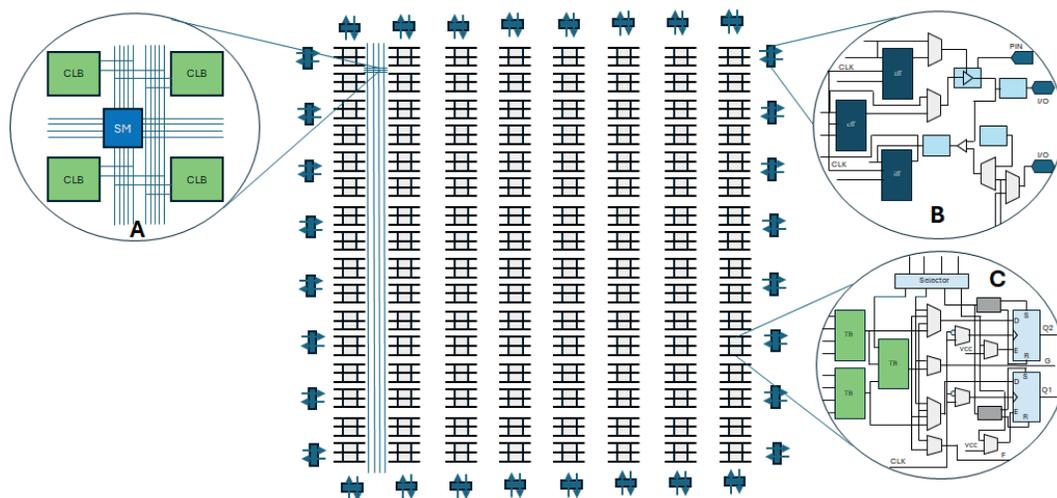


Figura 7. Arquitectura de FPGA

cuitos de protección. Estas características aseguran una adecuada interfaz eléctrica entre el FPGA y otros dispositivos, así como una adecuada adaptación a las condiciones de carga externa. (c) Los bloques de lógica configurable (CLB, por el acrónimo de las siglas *Configurable Logic Blocks*). Son componentes fundamentales en la arquitectura de un FPGA, ya que están diseñados para proporcionar una funcionalidad lógica flexible y configurable que puede adaptarse según las necesidades del diseño específico del usuario.

Cada CLB está compuesto por una combinación de elementos lógicos básicos, tales como compuertas AND, OR y XOR, flip-flops y multiplexores, que pueden ser interconectados y configurados mediante la programación del FPGA.

VI. Modelos de FPGA

Los FPGA se clasifican en diferentes categorías según su densidad, la cual se re-

fiere a la cantidad de bloques lógicos que contienen. Esta clasificación permite elegir adecuadamente un FPGA para aplicaciones específicas, considerando factores como la complejidad del circuito, el rendimiento requerido y el presupuesto.

Un FPGA de baja densidad considera menos de 10,000 bloques lógicos y son adecuados para aplicaciones simples como control de motores y procesamiento de señales básicas. La densidad media de un FPGA considera entre 10,000 y 100,000 bloques lógicos, ofrece un equilibrio entre costo y rendimiento, siendo ideales para aplicaciones como redes de comunicación y sistemas embebidos. La alta densidad comprende entre más de 100,000 bloques lógicos, proporcionando el máximo rendimiento y flexibilidad, pero también son los más costosos. Se utilizan en aplicaciones exigentes como computación de alto rendimiento, redes neuronales y procesamiento de imágenes. Los diferentes fabricantes de FPGA

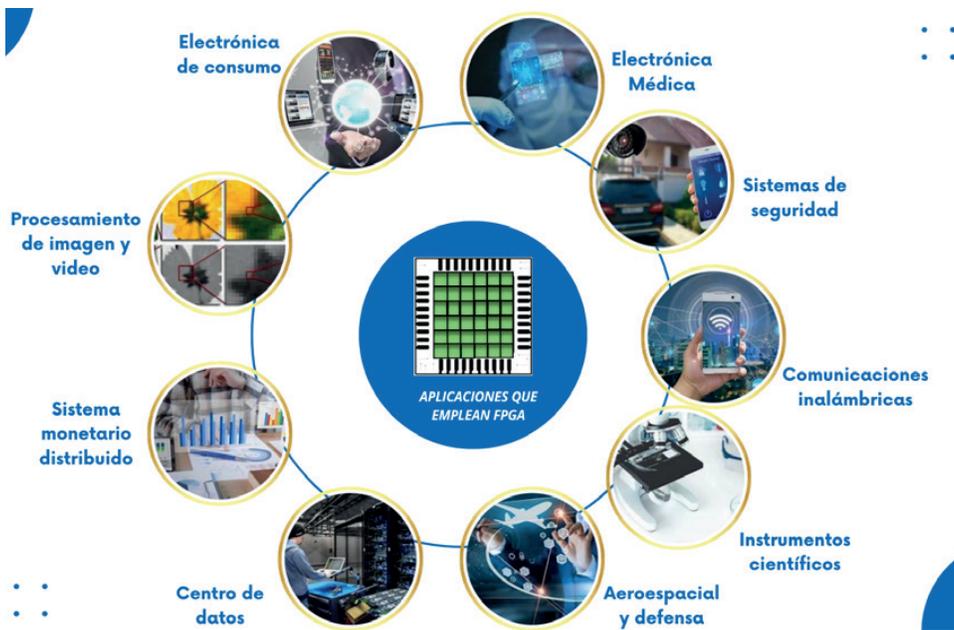


Figura 8. Aplicaciones de los FPGA



Figura 9. Asignaturas que se imparten en la UAM-Iztapalapa relacionadas con las aplicaciones mostradas en la figura 8.

ofrecen una amplia gama de modelos con diferentes densidades y características.

VII. Algunas aplicaciones que utilizan FPGA

En la figura 8 se muestran algunas aplicaciones en diversas áreas tecnológicas que utilizan FPGA debido a su flexibilidad, capacidad de adaptación y alto rendimiento.

En la UAM-Iztapalapa se imparten asignaturas relacionadas con las aplicaciones mostradas en la figura 8, tales como las presentadas en la figura 9.

En la UAM, se han desarrollado diversos proyectos de investigación, tesis, proyecto terminal, etc., usando los FPGA.

VIII. Conclusiones

En este trabajo de difusión los autores muestran que el uso de los FPGA permite la integración de diversos Dispositivos Lógicos Programables en un solo dispositivo para una diversidad de aplicaciones en distintas áreas de investigación, educación

e industria. Además, se hace mención que, en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, se cuenta con personal docente para formar profesionistas en el área de los Dispositivos Lógicos Programables, tanto a nivel Licenciatura como de Posgrado.

Referencias

- [1] Floyd, Thomas L. "Digital Fundamentals", in Pearson, Pearson Education India, 2015.
- [2] Andina, Juan Jose Rodriguez, Eduardo De la Torre Aranz, & María Dolores Valdés Peña, "FPGAs: fundamentals, advanced features, and applications in industrial electronics" in CRC Press, 2017.
- [3] Mencer, O., Allison, D., Blatt, E., Cummings, M., Flynn, M. J., Harris, J., & Shirazi, S, "The History, Status, and Future of FPGAs: Hitting a nerve with field-programmable gate arrays" in Queue, 2020, vol. 18, no 3, p. 71-82.