

MICROELECTRONICA HOY

Iván Jaramillo J.*

i_jaramj@ing.unal.edu.co

Las aplicaciones de la electrónica hoy en día se caracterizan básicamente por contar con un alto nivel de procesamiento de información y un muy reducido tamaño. Estas dos características han potenciado el desarrollo de nuevas metodologías de diseño y nuevos procesos de fabricación, que han ido de la mano con políticas de mercadeo y consumo masivo. Este artículo mostrará las tendencias que se están generando en el campo de la microelectrónica y su importancia como sector productivo que deberá ser en países del Tercer Mundo

Reseña Histórica

Durante la primera mitad del siglo XX se desarrollan los aspectos cuánticos entre átomos de moléculas y cristales (trabajos de Dirac, Fermi, Pauli entre otros). Adicionalmente se trabajan los niveles energéticos de las partículas eléctricas (electrones, iones). Este es el nacimiento de lo que hoy se denomina Física del Estado Sólido.

No obstante, el hecho que marca el nacimiento de la electrónica de estado sólido lo constituye el descubrimiento del “efecto transistor” sobre el Germanio por parte de Shockley, Brattain y Bardeen, grupo de investigadores de Bell Telephone en 1947. La demostración del efecto la realizan sobre un transistor bipolar de puntas metálicas.

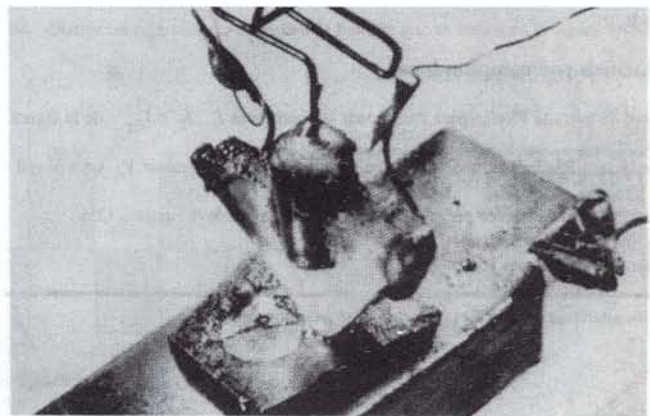


Figura 3.1 El primer transistor.
(Cortesía de Bell Telephone Laboratories.)

A partir de este desarrollo se generan una cadena de acontecimientos destacables como:

- 1951: Propuesta de Shockley sobre el Transistor de Efecto de Campo
- 1954: Nace el “Silicon Valley” con la fundación de Texas Instruments

* Ingeniero Electricista, profesor tiempo completo Universidad Nacional de Colombia, Director GMUN (Grupo de Microelectrónica de la Universidad Nacional)

- 1959: Noyce y Kilbi de Fairchild construyen el primer circuito integrado (Bistable RTL)
- 1963: Hofstein y Heiman de RCA desarrollan el transistor MOS
- Década de los 70's: desarrollo de los microprocesadores.
- Década de los 80's: microprocesadores de 32 bits y software de desarrollo de Circuitos Integrados
- Década de los 90's: nuevas metodologías de diseño. Fortalecimiento de los ASIC's

Impacto de la Microelectrónica

El soporte fundamental del avance tecnológico ha recaído sobre la microelectrónica, ya que ésta ha asumido el manejo de la información cada vez en mayor volumen, rapidez y eficiencia.

“Ese gran logro, lo concretamente novedoso, llegó solo con la microelectrónica, pues gracias a ella fue posible crear por primera vez componentes que reúnen los requisitos para su adecuada utilización a gran escala:

- Cuentan con complejidad suficiente para la autonomía en el manejo de la información
- Es posible producirlos en grandes series a precios convenientes, de modo que su posesión y utilización no es privilegio de pocos y, en cambio, llega a ser posible para muchas personas
- Son tan pequeños y livianos y requieren tan poca energía que para usarlos ya no hace falta crear condiciones operativas extraordinarias”¹.

“Hasta la década pasada, los años 80's, los llamados países del Tercer Mundo fueron, fundamentalmente, partícipes de esa revolución tecnológica como consumidores de diversas aplicaciones. Algunas de estas naciones han ido despertando, de forma muy lenta, de ese aletargamiento en que han permanecido desde tiempo atrás. Han comprendido que deben enfrentar

los nuevos retos tecnológicos como componentes activos en el desarrollo de la Microelectrónica”².

La Tecnología del CI

Los dispositivos electrónicos de hoy se caracterizan por una alta versatilidad, baja disipación de potencia, tamaños y volúmenes extremadamente pequeños y bajo costo en yuxtaposición con el alto grado de sofisticación y complejidad del componente.

Los niveles de complejidad se han conseguido en la medida en que se han integrado cada vez un mayor número de transistores dentro de un Circuito Integrado. El comportamiento histórico de los niveles de integración fue precedido por Gordon Moore, presidente de Intel, en 1960³.

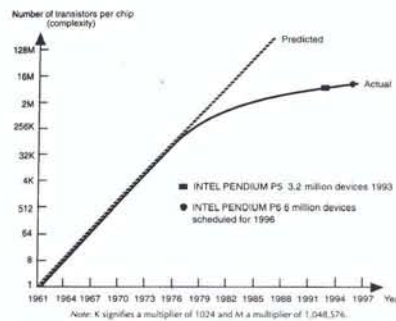


Figure 1-1 Moore's first law: transistors integrated on a single chip (commercial products)

Los niveles de integración han ido creciendo vertiginosamente mientras que el costo por transistor se ha reducido. El costo por transistor de un circuito SSI⁴ en 1965 era del orden de US\$10, mientras que el costo por transistor en un procesador Pentium-II hoy en día es del orden de US\$10-5.

El proceso de miniaturización está enmarcado en la tecnología para conseguir transistores más pequeños. El tamaño de los transistores se mide de acuerdo con la longitud de las líneas que definen su geometría. Hoy en día los mayores niveles de integración se con-

¹ Siemens Aktiengesellschaft, "Los Chips y sus Perspectivas", Berlín, 1985
² CORTÉS, L.A. Presente y Futuro de la Microelectrónica", En: Revista Ingeniería e Investigación No. 46, Universidad Nacional de Colombia, 1999
³ D. A. Pucknell, K. Eshraghian, "Basic VLSI Design", Ed. Prentice Hall, 1995
⁴ SSI : Small Scale Integration. Circuito Integrado de integración a pequeña escala.

siguen con memorias DRAM de 64 Mbytes trabajadas en tecnología de $0.35\mu\text{m}$, y se están anunciando tecnologías de $0.25\mu\text{m}$ y $0.18\mu\text{m}$. No obstante, el costo de implementar un nuevo proceso tecnológico es muy elevado; así por ejemplo el costo de una línea de fabricación de $1.0\mu\text{m}$ estaba alrededor de US\$100M, mientras que el costo de una línea de $0.35\mu\text{m}$ podría estar cerca de US\$100000M⁵.

El proceso tecnológico CMOS en los últimos años ha sido dominante por su alta funcionalidad y su relativa efectividad en costos de circuitos VLSI. Este progreso puede enmarcarse por la aparición de chips en arquitectura RISC con capacidades de hasta 40 MIPS⁶. Las ventajas relativas de esta tecnología estriban en su bajo nivel de disipación de potencia, tiempos de propagación medios y costo por transistor bajo.

En la próxima década la tendencia tecnológica primaria en la estructura física continuará hacia la miniaturización de CI's fabricados en silicio, ya que ello implica circuitos con mejor desempeño y menores costos. No obstante, se está llegando al punto de saturación en la disminución de tamaños, ya que por restricciones físicas de los materiales será muy complicado reducir más las geometrías en el proceso de fabricación.

Se están tomando otros caminos que permitan mejorar el desempeño de una tecnología. Esto se está con-

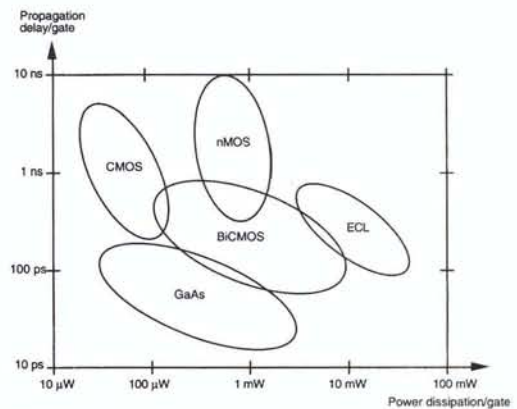


Figure 1-2 Speed/power performance of available technologies

siguiendo con la tecnología BiCMOS, especialmente en aplicaciones análogas. En dispositivos de muy alta velocidad (por encima de 100 MIPS) se está explorando la tecnología de Arsenuro de Galio (GaAs). También se están efectuando trabajos de investigación en tecnologías optoelectrónicas y en estructuras de efecto cuántico.

Campo de Acción

Es posible pensar que la microelectrónica ha invadido todas las áreas del desarrollo tecnológico. Forma parte integral de sectores como el militar, de entretenimiento, automotriz, telecomunicaciones, informática, automatización, conservación de energía entre otros. Este amplio espectro de aplicaciones ha gene-

AÑO	1947	1950	1961	1966	1971	1980	1990	2000
TECNOLOGIA	INVEN-CION DEL TRANSISTOR	COMPO-NENTES DISCRETOS	SSI	MSI	LSI	VLSI	ULSI*	GSI
APROXIMACION DEL NUMERO DE TRANSISTORES POR CHIP UTILIZADOS EN PRODUCTOS COMERCIALES	1	1	10	10-1000	1000-20000	20000-1000000	1000000-10000000	>10000000
PRODUCTOS TIPICOS	-	JUNTURAS TRANSISTORES Y DIODOS	FUENTES ESTABLES PUERTAS LOGICAS FLIP-FLOPS	CONTADORES MULTIPLEX SUMADORES	MICROPRO-CESADORES DE 8 BITS ROM RAM	MICROPROCESADORES DE 16 Y 32 BITS. SOFISTICADOS PERIPHEARLS GHM DRAM	PROCESADORES ESPECIALES, MAQUINAS DE REALIDAD VIRTUAL, SENSORES SMART	

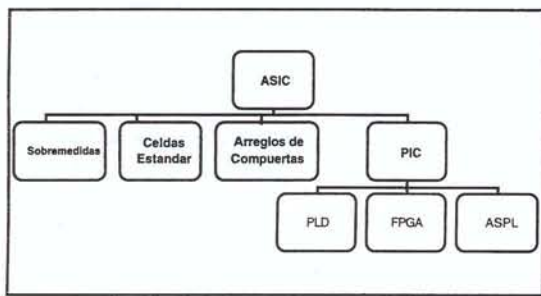
⁵ CLAEYS, C. L. "Trends in CMOS Technologies. Memorias I Workshop IBERCHIP, Cartagena de Indias, 1995

⁶ MIPS : Millones de instrucciones por segundo

rado nuevas formas de trabajo, que se estructuran en la solución personalizada del circuito integrado. Este nivel de personalización permitió a los fabricantes conseguir reducciones apreciables en los costos de producción y adicionalmente conservar un nivel de privacidad en sus diseños y aplicaciones. Estos dispositivos personalizados se conocen como ASIC's (Circuito Integrado de Aplicación Específica).

Clasificación de los CI

En términos generales los CI se clasifican en dos grandes bloques: Circuitos Integrados de Función Fija y Circuitos Integrados de Aplicación Específica (ASIC's).



Los circuitos de función fija – en ocasiones llamados componentes discretos – incluyen memorias, microprocesadores y elementos de propósito general, los cuales han sido desarrollados por empresas de gran capacidad tecnológica y económica⁷.

Un ASIC es un circuito integrado cuya función será definida de acuerdo con unas necesidades particulares, y surge como solución de diseño a un problema específico. Sus características son: reducción de costos, protección contra copia, funcionalidad adecuada y peculiaridad propia.

Circuitos Sobre-Medidas

Se realiza el diseño en la etapa de más bajo nivel, permitiendo manejar estructuras a nivel de transistores, consiguiéndose un alto nivel de flexibilidad pero con elevados tiempos de desarrollo. Una variedad de

esta clase de circuitos la constituyen los circuitos Semi-Custom, en donde el fabricante suministra al diseñador algunas librerías con celdas o estructuras básicas, facilitando el trabajo del diseñador.

El diseño de este tipo de circuitos requiere de herramientas CAD, las cuales permiten al diseñador implementar la aplicación a partir de los dibujos geométricos de la configuración deseada. Normalmente estas herramientas, conocidas como “compiladores de silicio,” se configuran de acuerdo con el proceso tecnológico de fabricación, es decir, tienen en cuenta las restricciones de tamaños y las características y parámetros de los transistores básicos.

Celdas Estándar

En esta tipología el diseñador dispone de una librería de celdas o módulos que realizan funciones básicas y que ya han sido probadas y caracterizadas por el fabricante de la tecnología. Los módulos básicos o celdas los constituyen algunas compuertas lógicas, flip-flops y registros, entre otros, diseñados de manera que puedan ser ubicados en forma regular dentro del Chip. El diseñador realiza su trabajo en mucho menor tiempo, aunque se requiere de herramientas tipo CAD para generar las geometrías y realizar la comprobación funcional del diseño.

• Arreglos de Compuertas

En esta tecnología se encuentran pre-fundidas estructuras básicas en las cuales el usuario define las máscaras de interconexión. De esta manera un solo chip cuenta con cientos de celdas idénticas, siendo cada una de ellas capaz de realizar una función lógica simple. Las celdas están dispuestas según un esquema regular, por ejemplo en forma de filas. Entre las filas están previstos canales de conexión dentro de los cuales podrán ser colocadas líneas de metal.

• Circuito Programables

Esta variedad de ASIC's se basa en una característica: la posibilidad de reconfiguración en sitio, para conseguir una aplicación determinada. Dentro de los prin-

⁷ CORTÉS, L.A., Circuitos Integrados de Aplicación Específica”, En: Revista Ingeniería e Investigación No. 47, Universidad Nacional de Colombia, 1999

cipales dispositivos que tienen esta característica se destacan:

• PLD

El Dispositivo de Lógica Programable contiene una gran cantidad de compuertas que se encuentran interconectadas en el chip. Muchas de las conexiones se han dejado libres para que sean programadas por el usuario con el fin de definir una función lógica. Están orientados hacia la síntesis de máquinas de estado, contando en general con reducido número de módulos programables complejos y conexiones programables centralizadas.

Las arquitecturas de los PLD's pueden variar desde las memorias PROM (Programmable Read Only Memory) hasta los FPC's (Fuse Programmable Controllers), pasando por PLA's (Programmable Logic Arrays) o FPLA's (Field Programmable Logic Arrays), PAL's (Programmable Array Logic) combinacionales y secuenciales, GAL (Generic Array Logic) y PLS (Programmable Logic Secuencers), entre otros.

• FPGA

La versión más compleja de los dispositivos programables son los FPGA (Field Programmable Gate Array), los cuales están constituidos por bloques lógicos configurables, cuya función y el conjunto de conexiones son programables. De esta forma se puede realizar la interconexión de los distintos bloques e interfaces de entrada/salida para el intercambio de señales con el medio externo. Se destacan tres características importantes: número elevado de módulos programables simples, conexiones configurables distribuidas, y orientación hacia el diseño jerárquico.

El proceso de Diseño

Desde el momento de su concepción funcional hasta el de su realización física en una tecnología microelectrónica dada, el diseño de un sistema moderno demanda una metodología que permita el manejo de la complejidad propia del sistema contemplado, y que a

su vez pueda ser automatizada total o parcialmente con herramientas de Diseño Asistido por Computador (CAD).

La selección de la tecnología a ser utilizada en la fabricación de un producto tiene un efecto importante en su desarrollo, así como en su rendimiento, funcionalidad y confiabilidad. Adicionalmente, para cada tecnología existen herramientas propias de diseño que afectan la calidad con que éste se puede realizar⁸.

Las nuevas tecnologías de fabricación de circuitos integrados han generado y están ampliando la brecha entre lo que puede ser fabricado y lo que puede ser diseñado en un tiempo adecuado y a un costo razonable.

Metodología de Diseño

Como se plantea por MEAD y CONWAY (1980), la metodología de diseño y desarrollo de sistemas complejos es de tipo estructurado y en ella se observan varios niveles de descripción de un mismo diseño y se enfatizan tres aspectos:

- Jerarquía
- Regularidad del diseño
- Reutilización de diseños

En términos generales, la metodología de diseño para un sistema digital comparte las ideas de la programación estructurada, y es similar en:

- La concepción y desarrollo de manera descendente (Top-Down), partiendo de una especificación funcional hasta llegar a su realización física en la tecnología seleccionada
- La especificación funcional permite la verificación y depuración del sistema desde las fases preliminares del desarrollo del diseño
- La estructura jerárquica permite particionar el diseño en subsistemas más simples, los cuales se pueden especificar y desarrollar en forma independiente
- El uso de estructuras regulares de diseño permite el uso y la réplica de unidades básicas (celdas de almacenamiento, compuertas o bloques lógicos)

⁸ CORREA, N. Nuevas Tecnologías de Diseño Electrónico. En: V Jornadas de Electrónica y Telecomunicaciones, ACIEM, 1991

- Reutilización de diseños o uso de diseños genéricos parametrizables.

Niveles de descripción de un sistema digital

Es posible identificar cinco niveles en la concepción y el desarrollo de un sistema digital complejo. Estos son:

1. Funcional o algorítmico
2. Arquitectural o de transferencias entre registros
3. Estructural o de nivel lógico
4. Eléctrico o circuital
5. Físico o de geometrías, de colocación de módulos e interconexiones.

En la *Descripción Funcional* de un sistema interesa fundamentalmente su comportamiento, como una función de transferencia entrada-salida, sin considerar su realización física o la tecnología con que se implemente. La descripción del sistema a este nivel toma la forma de algoritmos, usualmente expresados en un lenguaje con las construcciones, tipos de datos, operadores y facilidades de un lenguaje de programación de alto nivel. Lenguajes de descripción funcional incluyen VHDL, Verilog, subconjuntos de lenguajes de programación, como C, y lenguajes de varios fabricantes como AHDL de Altera y SML de Xilinx.

Las ventajas que se ganan al adoptar este nivel de descripción del sistema son: i) su utilidad como medio de especificación; ii) rapidez en la concepción del diseño; iii) velocidad en la depuración del diseño.

En el *Nivel de Arquitectura* se define la estructura del sistema, en términos de las diferentes unidades funcionales a ser utilizadas, de los registros o bloques de almacenamiento requeridos y de los buses de datos o medios de interconexión entre las unidades funcionales y entre éstas y los registros. La descripción del sistema a este nivel toma usualmente la forma de sentencias concurrentes, que describen la secuencia de operaciones del sistema y el flujo de datos de un sitio a otro. Este tipo de descripción es soportada por lenguajes como VHDL.

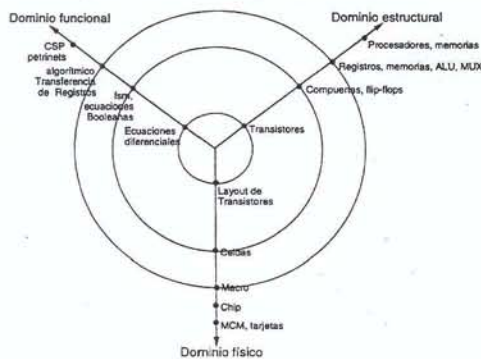
En la *Descripción Estructural* de un sistema se detallan todos sus bloques funcionales básicos, así como de las interconexiones entre ellos. Esta descripción procede en forma jerárquica, donde cada bloque en un nivel de la jerarquía corresponde tanto a una unidad funcional como a una física en el sistema final.

Este nivel de descripción es el más conocido y es el que tradicionalmente se ha entendido para la descripción y simulación de hardware digital. Los lenguajes de descripción a este nivel incluyen editores esquemáticos, lenguajes primitivos como AHPL, lenguajes de intercambio de información de componentes e interconexiones (Netlist), como EDIF, además de los subconjuntos respectivos de VHDL, Verilog y otros.

La *Descripción Eléctrica* de un sistema identifica su realización en términos de dispositivos electrónicos básicos. Puede realizarse mediante diagramas esquemáticos, o por listas de componentes y conexiones eléctricas, como en el formato empleado por SPICE o ORCAD.

La *Descripción Física* adecuada para la realización de un sistema depende de la tecnología utilizada y el nivel de detalle requerido. Puede darse a nivel de bastidor, de tarjeta de circuito impreso, de configuración de dispositivo de lógica programable o de geometría de circuito integrado. Este nivel de descripción genera invariablemente el mayor volumen de información en la descripción de un sistema, e invariablemente requiere de herramientas de diseño asistido por computador. Los lenguajes que en esta son usados inclu-

Diagrama-Y de Gajski y Kuhn



yen el formato CIF para descripción de geometrías en circuitos sobre-medidas.

Herramientas para diseño digital

El uso de herramientas de Diseño Asistido por Computador (CAD) para diseño digital obedece a la necesidad de reducción del costo y el tiempo de desarrollo de un sistema, desde el momento en que se inicia su concepción hasta cuando éste ha sido desarrollado y probado y puede ser transferido a la línea de producción. El conjunto de herramientas para cada nivel de descripción se pueden catalogar como:

- Lenguajes de descripción de hardware (HDLs). Herramienta fundamental en cada uno de los niveles del diseño jerárquico. Pueden ser textuales o gráficos
- Herramientas de verificación. Permiten la comprobación del correcto funcionamiento del diseño directamente por simulación del diseño, de acuerdo con un conjunto de excitaciones o señales de entrada; o por verificación formal de equivalencia entre el diseño dado y una especificación o otra descripción formal del mismo, al mismo nivel, o a otro
- Herramientas de síntesis. Permiten la transformación automática del diseño desde un nivel dado, como el funcional, a otro nivel, como el de arquitectura. Las herramientas más desarrolladas son las de bajo nivel, que permiten la transformación de un diseño a nivel estructural o lógico, a nivel de disposición, como el de celda estándar, arreglos de compuertas, o en celdas de dispositivos lógicos programables.
- Herramientas de optimización. Existen a todo nivel. A nivel lógico se cuenta con herramientas de minimización Booleana y reducción y asignación de estados en máquinas secuenciales
- Herramientas de implantación física. Incluyen principalmente ayudas para particionamiento, colocación y enrutamiento físico del sistema y sus distintos componentes
- Herramientas de verificación de diseño. Permiten la comprobación del cumplimiento de las reglas de diseño del sistema propias de cada uno de sus niveles (físico, eléctrico, lógico, etc.)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CLAEYS, C. L., Trends in CMOS Technologies, Memorias I Workshop, IBERCHIP, Cartagena de Indias, 1995
- CORTÉS L.A. Presente y Futuro de la Microelectrónica. En: Revista Ingeniería e Investigación No. 46, Universidad Nacional de Colombia, 1999
- CORTÉS, L.A. Circuitos Integrados de Aplicación Específica, En: Revista Ingeniería e Investigación No. 47, Universidad Nacional de Colombia, 1999
- CORREA, N. Nuevas Tecnologías de Diseño Electrónico. En: V Jornadas de Electrónica y Telecomunicaciones, ACIEM, 1991
- GARCÍA, A. Circuitos Integrados Programables, Universidad de los Andes, 1993
- MEAD C., CONWAY, L. Introduction to VLSI Systems, Ed. Addison-Wesley, 1980
- PUCKNELL D.A., ESHRAGHIAN K., Basic VLSI Design, Ed. Prentice Hall, 1995
- SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT, Los Chips y sus Perspectivas, Berlín, 1985.