



Tema 3:

Implementación de sistemas combinacionales

Fundamentos de computadores

José Manuel Mendías Cuadros

*Dpto. Arquitectura de Computadores y Automática
Universidad Complutense de Madrid*



Contenidos

- ✓ Puertas lógicas.
- ✓ Conjuntos universales de puertas.
- ✓ Síntesis con puertas AND-OR-NOT.
- ✓ Síntesis con puertas NAND.
- ✓ Análisis de redes de puertas.
- ✓ Aspectos tecnológicos.
- ✓ Espacio de diseño y trade-offs.

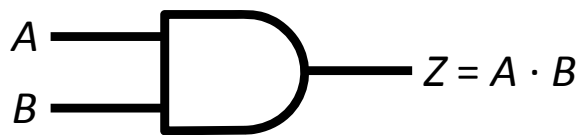
Transparencias basadas en los libros:

- R. Hermida, F. Sánchez y E. del Corral. *Fundamentos de computadores*.
- D. Gajsky. *Principios de diseño digital*.

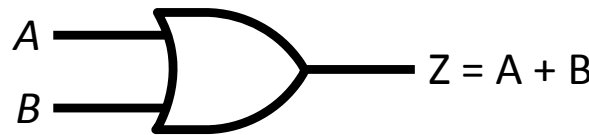


Puertas lógicas

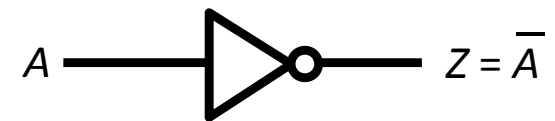
- Dispositivo que realiza físicamente una función de conmutación sencilla.



Puerta AND



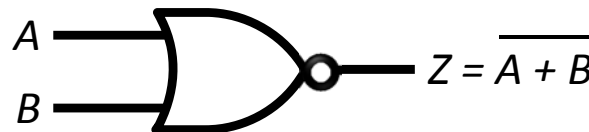
Puerta OR



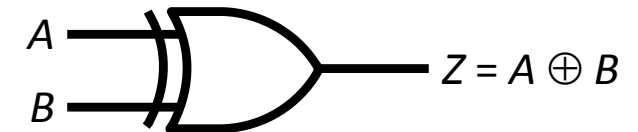
Puerta NOT (Inversor)



Puerta NAND



Puerta NOR



Puerta XOR



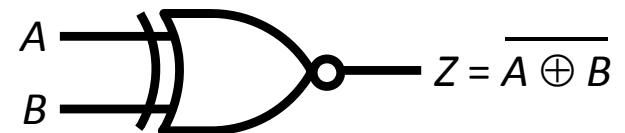
Puerta NAND
(símbolo alternativo)

$$\overline{A \cdot B} = \bar{A} + \bar{B}$$



Puerta NOR
(símbolo alternativo)

$$\overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$$

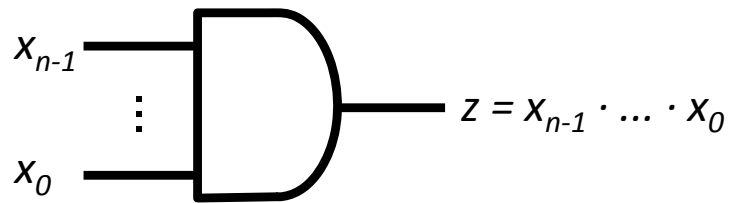


Puerta XNOR

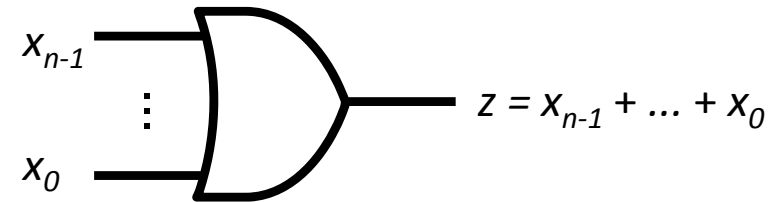


Puertas lógicas

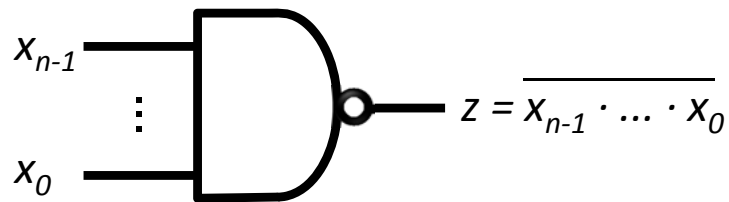
- Existen puertas con mayor número de entradas:



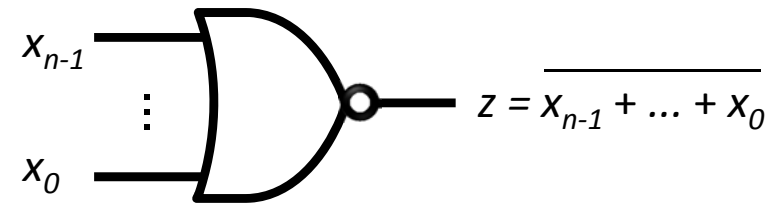
Puerta AND de n entradas



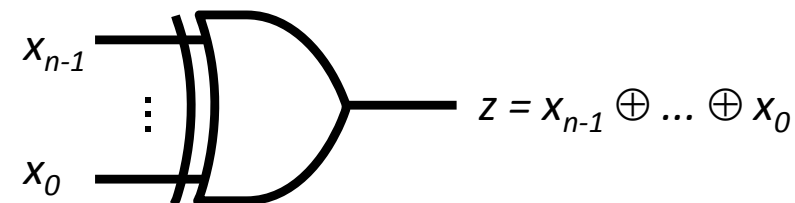
Puerta OR de n entradas



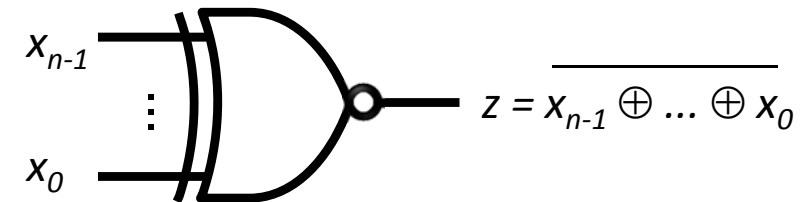
Puerta NAND de n entradas



Puerta NOR de n entradas



Puerta XOR de n entradas
($z=1$ si el número de $x_i=1$ es impar)



Puerta XNOR de n entradas
($z=1$ si el número de $x_i=1$ es par)

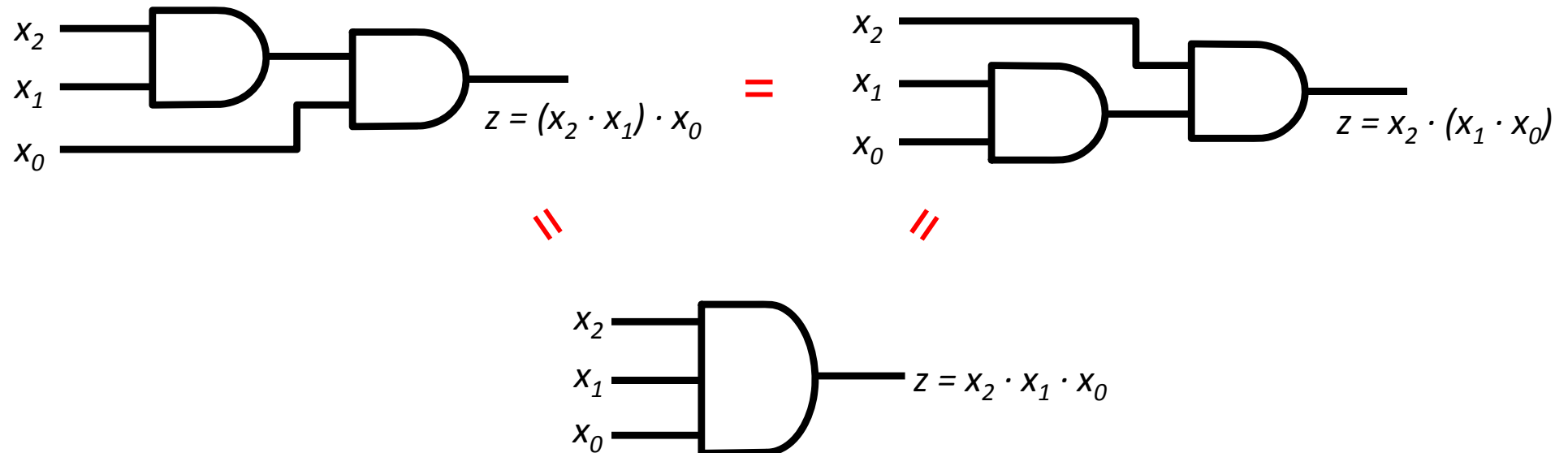


Puertas lógicas

- Todas ellas son conmutativas:



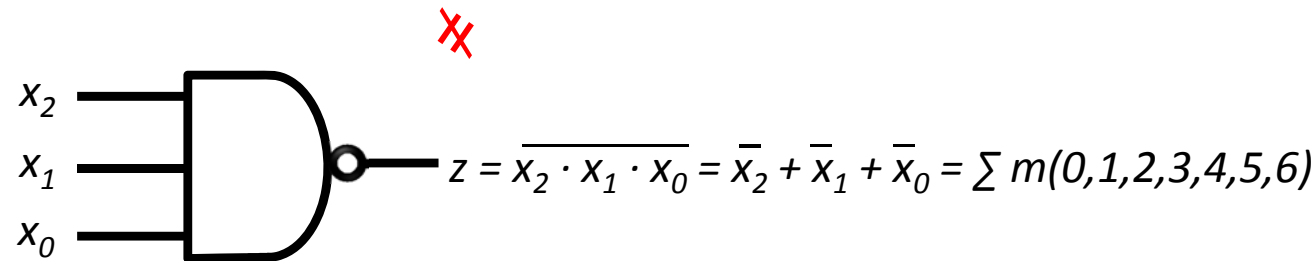
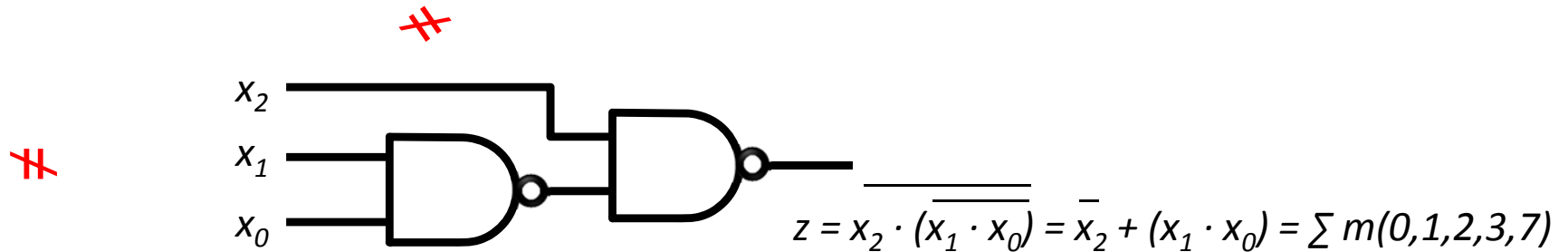
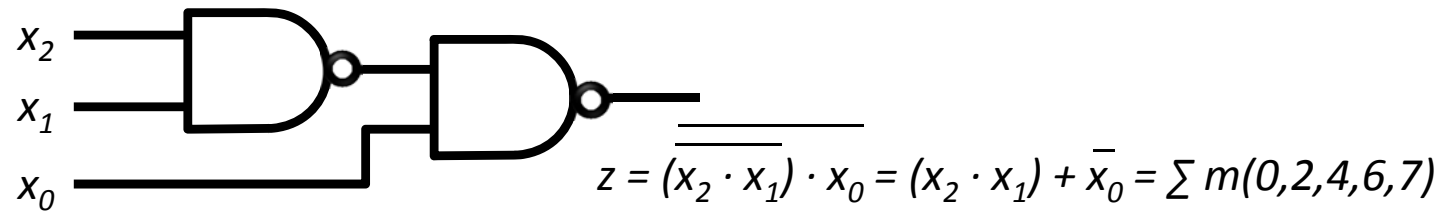
- AND, OR, XOR y XNOR son asociativas:





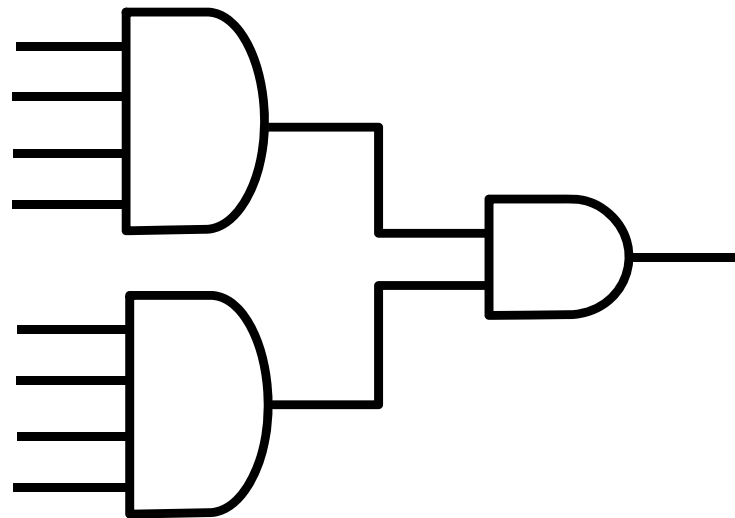
Puertas lógicas

- Pero **NAND** y **NOR** no son asociativas.



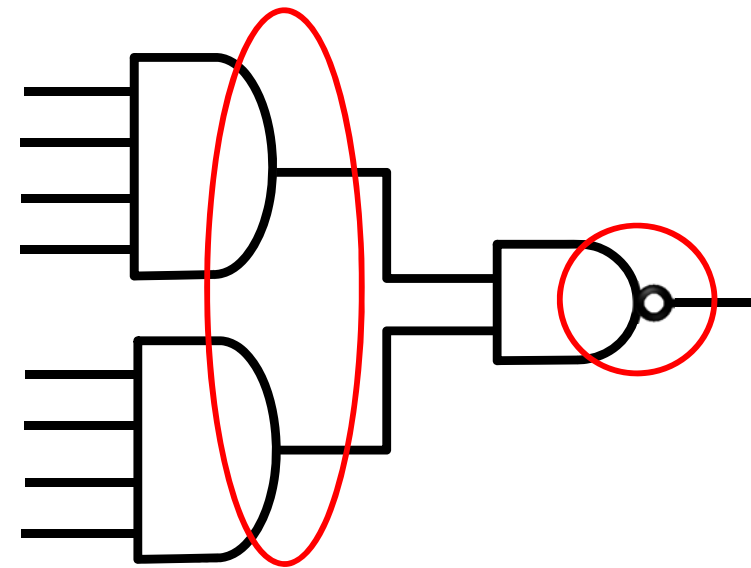
Puertas lógicas

- En la práctica no es común encontrar puertas con un número elevado de entradas.
 - Solución: implementaciones en árbol.



Implementación en árbol

Puerta AND de 8 entradas



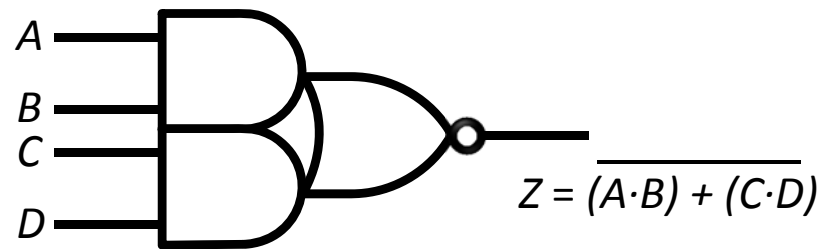
Implementación en árbol

Puerta NAND de 8 entradas

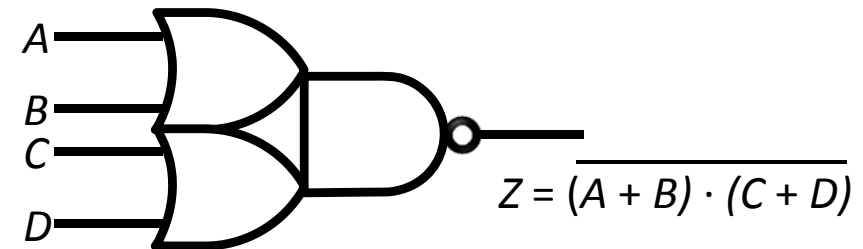


Puertas lógicas

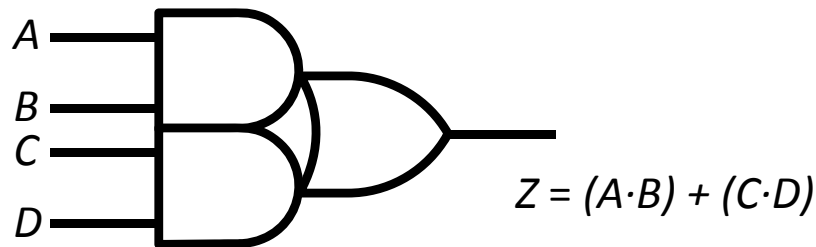
- Existen puertas **compuestas**:



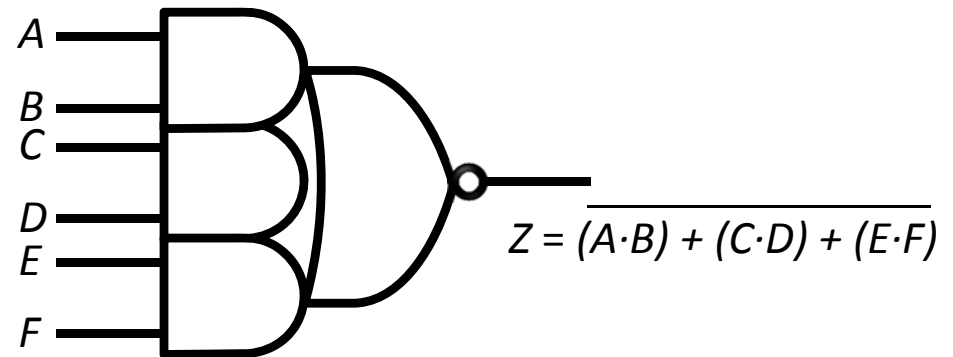
Puerta AOI 2/2



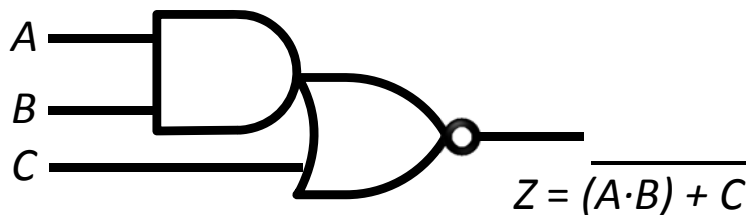
Puerta OAI 2/2



Puerta AO 2/2



Puerta AOI 2/2/2



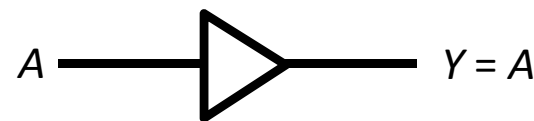
Puerta AOI 2/1

y algunas más...



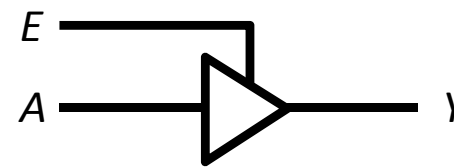
Buffers

- Existen otros dispositivos sin funcionalidad lógica:
 - **Buffer no inversor**: permite compensar la atenuación eléctrica de una señal.
 - **Buffer triestado**: permite desconectar selectivamente una señal.



Buffer no inversor

A	Y
0	0
1	1



Buffer triestado

E	A	Y
0	0	Z
0	1	Z
1	0	0
1	1	1

Alta impedancia
(desconecta Y de A)



Algunas definiciones

- **Módulo:** dispositivo que realiza físicamente una función conocida de cualquier complejidad.
 - Los hay combinacionales y secuenciales
- **Puerto:** cada una de las líneas de entrada/salida que comunica un módulo con el exterior.
- **Interconexión:** unión de 2 o más puertos entre sí.
- **Red:** colección de módulos interconectados de manera que **toda entrada solo está conectada a una salida** (una salida sí puede estar conectada a varias entradas).
 - Las interconexiones 1:1 y 1:n están permitidas.
 - Las interconexiones n:1 están prohibidas (a menos que se utilicen buffers triestado).



Algunas definiciones

- **Red combinacional:** red de módulos combinacionales en las que **no existen realimentaciones**.
 - no hay ningún camino dentro de la red que pase 2 veces por el mismo punto.
 - toda red combinacional es un módulo combinacional.
- **Nivel de una red:** número máximo de módulos que atraviesa cualquier camino que conecte una entrada con una salida
 - cuando la red es de puertas no se suelen contar los inversores.



Interconexiones

- Al dibujar el **esquema** de un circuito usaremos alguna notación adicional para las interconexiones:

A —————
interconexión de 1 bit

A —————●
interconexión de 1 bit con
un terminal desconectado

\underline{A} ————— \diagup
n interconexiones
de 1 bit en paralelo

la parte más significativa
de \underline{A} viene por aquí

\underline{A} ————— \diagup ————— \diagdown —————
+ ————— \diagup ————— \diagdown —————
- ————— \diagup ————— \diagdown —————
n ————— \diagup ————— \diagdown —————
m ————— \diagup ————— \diagdown —————
 $\underline{B} = \underline{A}_{n-m-1..m}$
 $\underline{C} = \underline{A}_{m-1..0}$
n interconexiones en paralelo
se dividen en 2 ramas

\underline{A} ————— \diagup ————— \diagdown —————
+ ————— \diagup ————— \diagdown —————
- ————— \diagup ————— \diagdown —————
n ————— \diagup ————— \diagdown —————
m ————— \diagup ————— \diagdown —————
 $\underline{C} = (\underline{A}_{n-1..0} \underline{B}_{m-1..0})$
n y m interconexiones en paralelo se
unen en una única rama



Conjunto universal

- Se dice que un **conjunto de módulos combinacionales es universal** si permite implementar cualquier FC

- Un conjunto lo es, si con sus módulos pueden implementarse todos los operadores del algebra de conmutación.
- El conjunto de puertas **{AND, OR, NOT}** es universal.

- Otros conjuntos universales de puertas :

- **{ AND, NOT }**

$$a + b = \overline{\overline{a + b}} = \overline{\bar{a} \cdot \bar{b}}$$

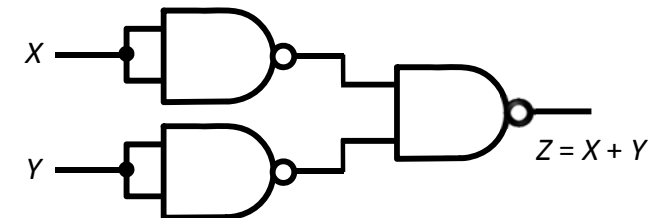
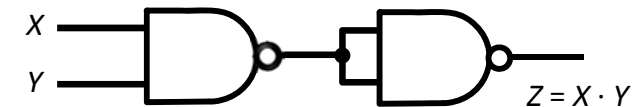
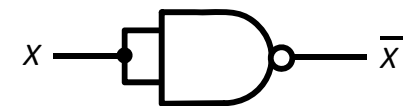
- **{ NAND }**

$$\bar{a} = \overline{a \cdot a} = a \uparrow a$$

$$a \cdot b = \overline{\overline{a \cdot b}} = \overline{a \uparrow b} = (a \uparrow b) \uparrow (a \uparrow b)$$

$$a + b = \overline{\overline{a + b}} = \overline{(\bar{a} \cdot \bar{b})} = \bar{a} \uparrow \bar{b} = (a \uparrow a) \uparrow (b \uparrow b)$$

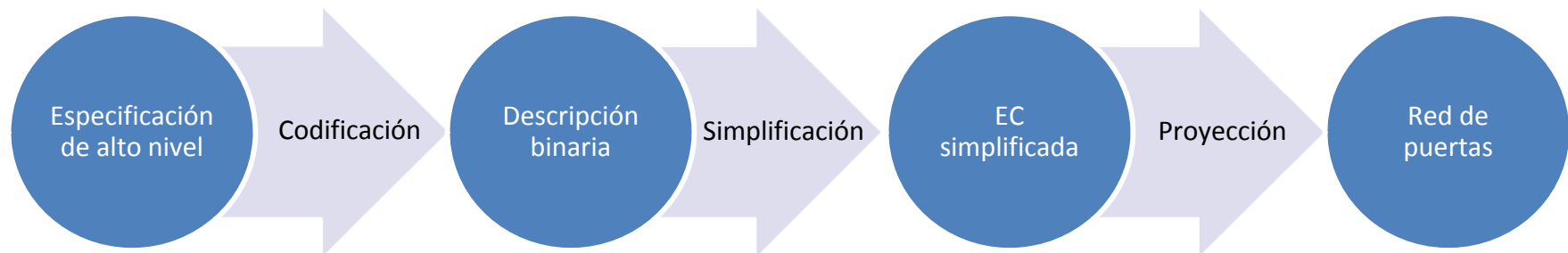
- **{ OR, NOT }, { NOR }, { XOR, AND } ...**





Síntesis de redes de puertas

- Dada una especificación de una conducta combinacional implementarla usando puertas.



- Implementaciones a 2 niveles
 - Implementación canónica: implementa la SPC con 2 niveles AND-OR.
 - Implementación mínima: implementa una EC_{\min} con 2 niveles AND-OR.
 - La red resultante tiene un número mínimo de puertas y éstas tienen un número mínimo de entradas.
- Implementaciones multinivel
 - Tienen un número arbitrario de niveles y se reutilizan cálculos intermedios.
 - Para obtenerlas, se parte de un conjunto de SP y se **factorizan** heurísticamente.



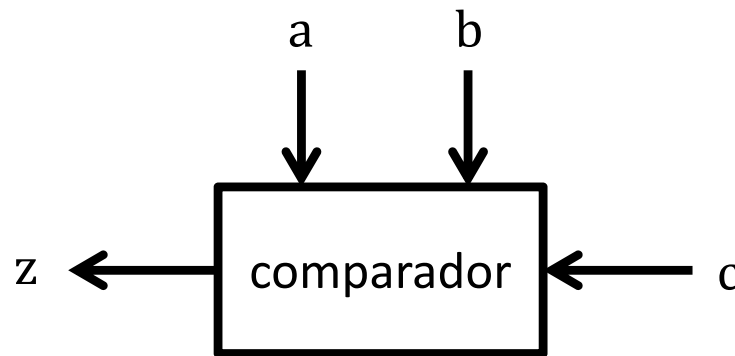
Síntesis de redes AND-OR

versión 12/09/14

tema 3:
Implementación de sistemas combinacionales

FC

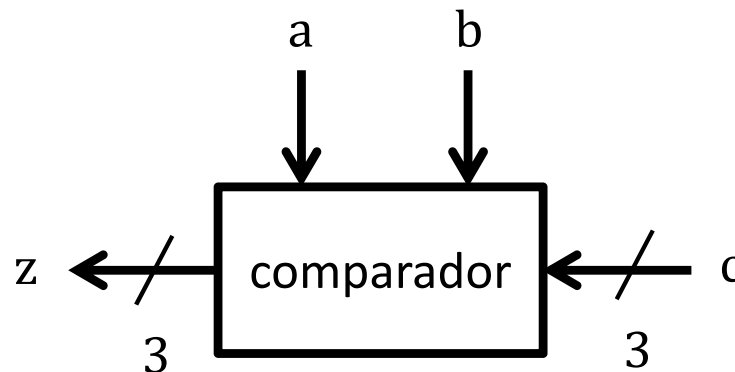
15



$$a, b \in \{0, 1\} \quad c, z \in \{aM, IG, bM\}$$

$$z = \begin{cases} aM & \text{si } (a > b) \text{ o } (a = b \text{ y } c = aM) \\ IG & \text{si } (a = b) \text{ y } (c = ig) \\ bM & \text{si } (a < b) \text{ o } (a = b \text{ y } c = bM) \end{cases}$$

Codificación: $aM = (100)$, $IG = (010)$, $bM = (001)$



$$z_2 = a\bar{b} + \bar{a}\bar{b}c_2 + abc_2$$

$$z_1 = \bar{a}\bar{b}c_1 + abc_1$$

$$z_0 = \bar{a}b + \bar{a}\bar{b}c_0 + abc_0$$



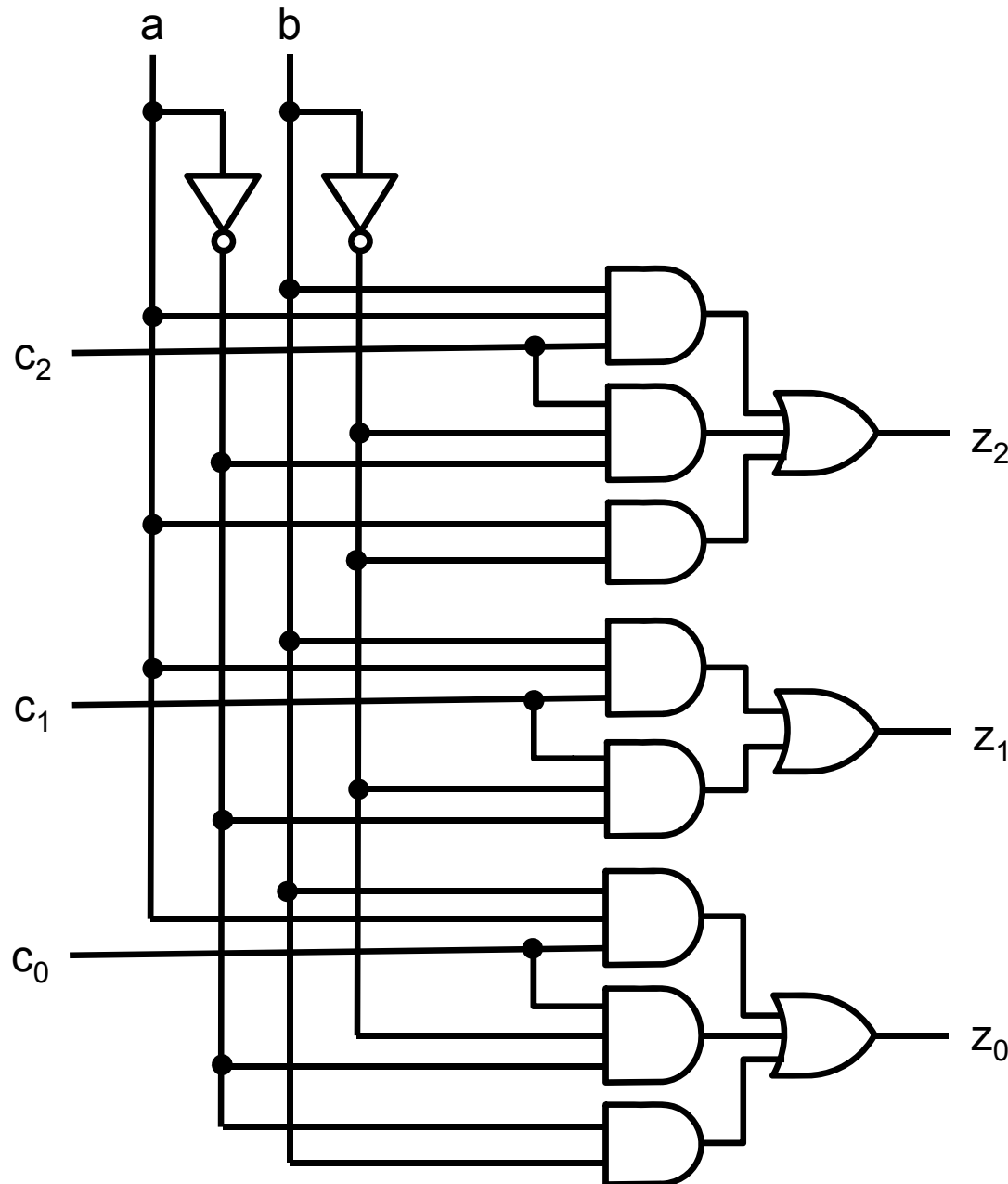
Síntesis de redes AND-OR

versión 12/09/14

tema 3:
Implementación de sistemas combinacionales

FC

16



Implementación
a 2 niveles

$$z_2 = a\bar{b} + \bar{a}\bar{b}c_2 + abc_2$$

$$z_1 = \bar{a}\bar{b}c_1 + abc_1$$

$$z_0 = \bar{a}b + \bar{a}\bar{b}c_0 + abc_0$$



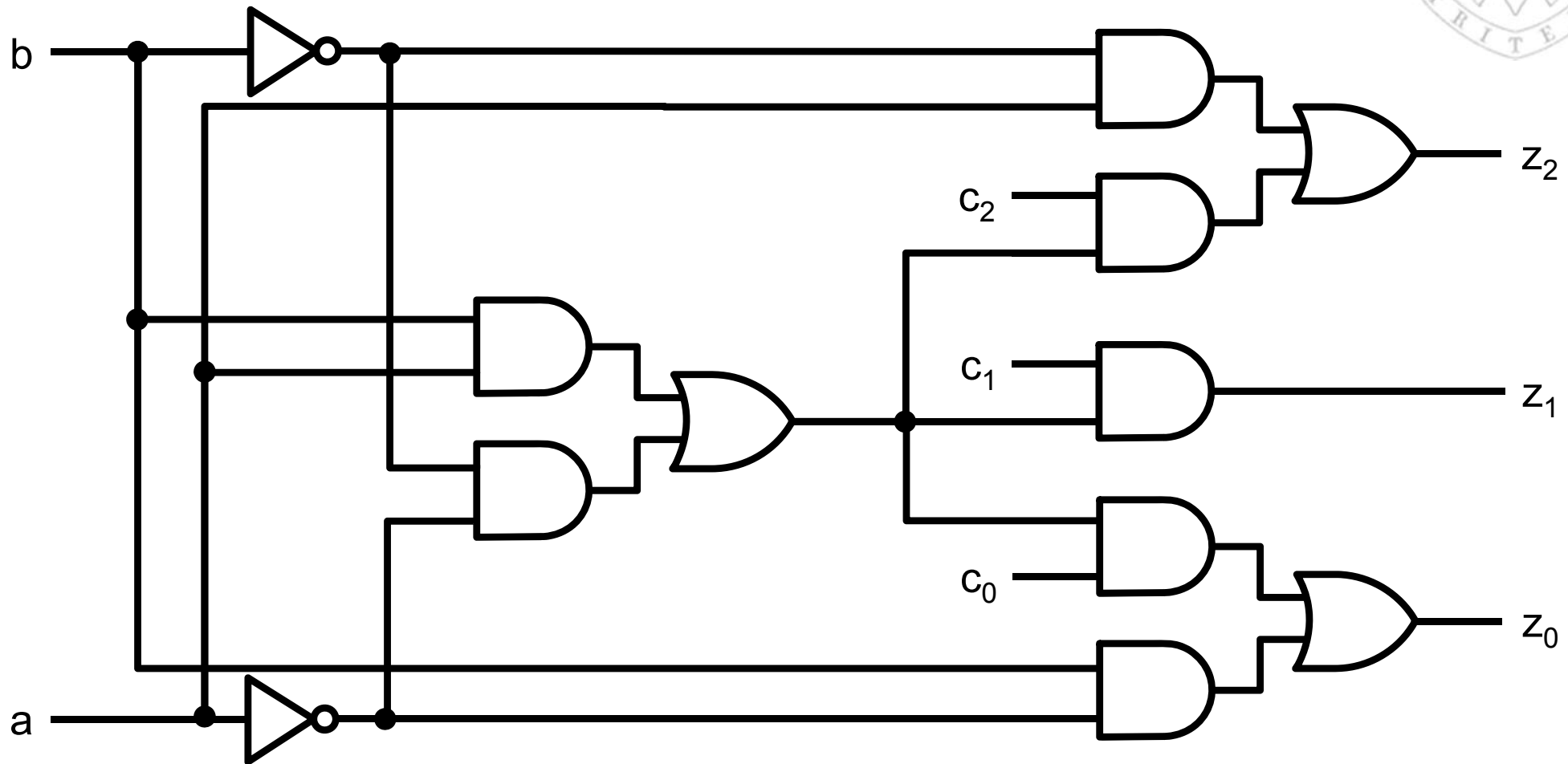
Síntesis de redes AND-OR

versión 12/09/14

tema 3:
Implementación de sistemas combinacionales

FC

17



Implementación
multinivel

$$z_2 = a\bar{b} + (\bar{a}\bar{b} + ab)c_2$$

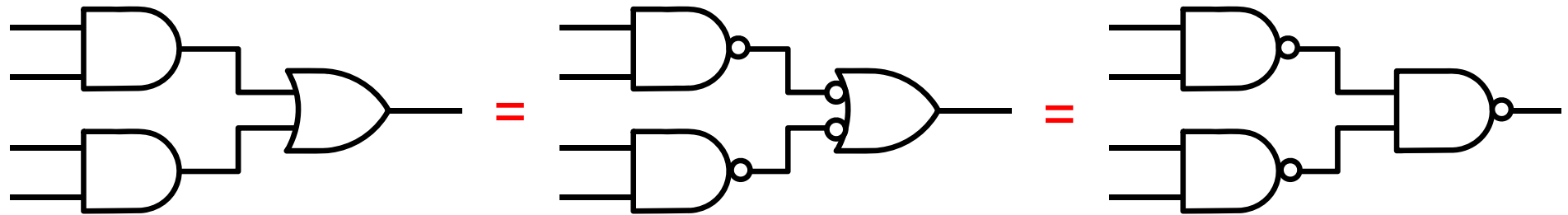
$$z_1 = (\bar{a}\bar{b} + ab)c_1$$

$$z_0 = \bar{a}b + (\bar{a}\bar{b} + ab)c_0$$



Síntesis de redes NAND

- 2 niveles AND-OR equivalen a 2 niveles NAND-NAND

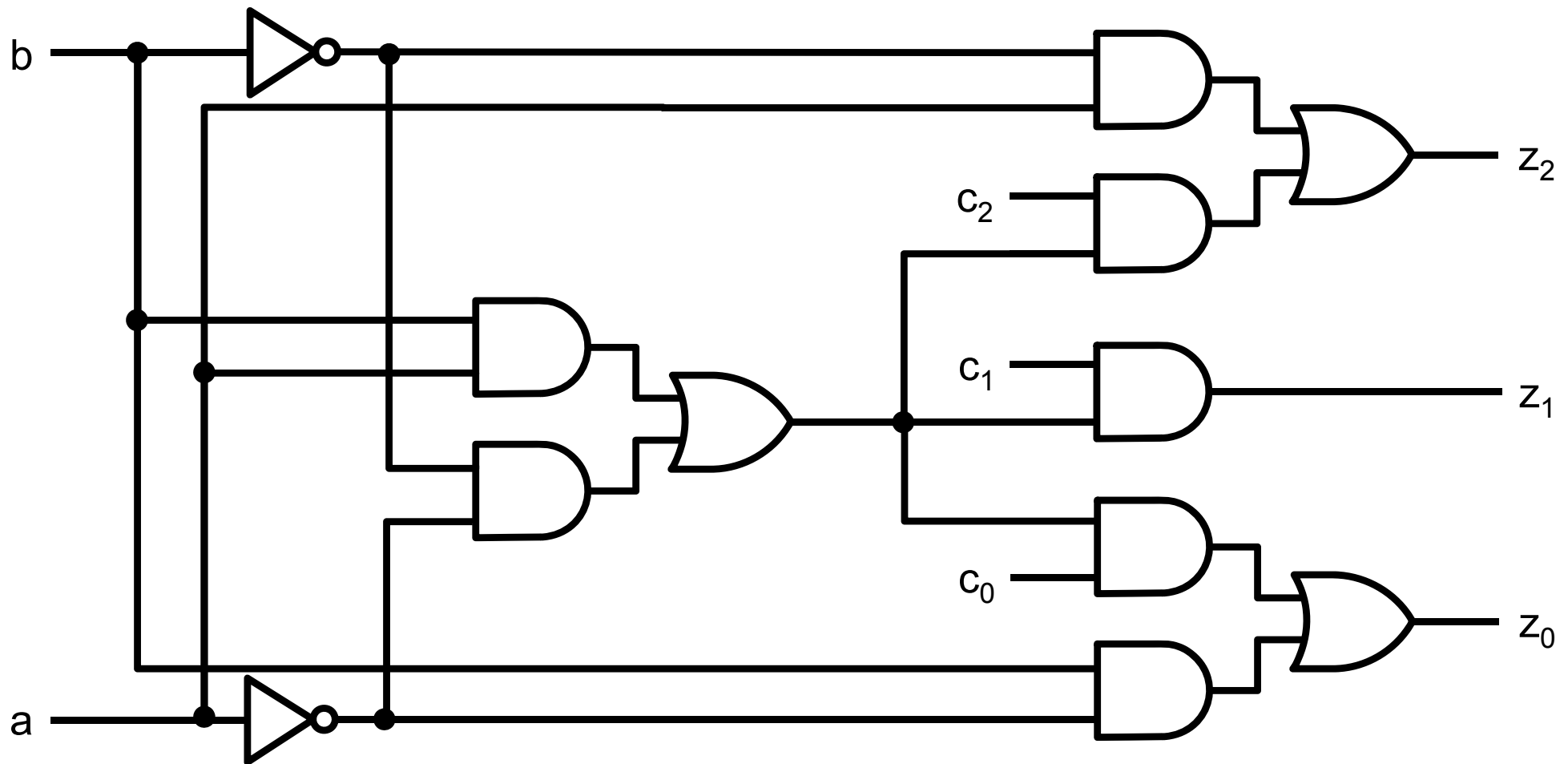


- Método:

- Obtener una red AND-OR.
- Añadir pares de inversores a las salidas de las puertas AND (o a las entradas de las puertas OR).
- Uniformizar la notación de las puertas NAND.
- Eliminar dobles inversores donde sea posible.
- Reemplazar inversores por su implementación con NAND.

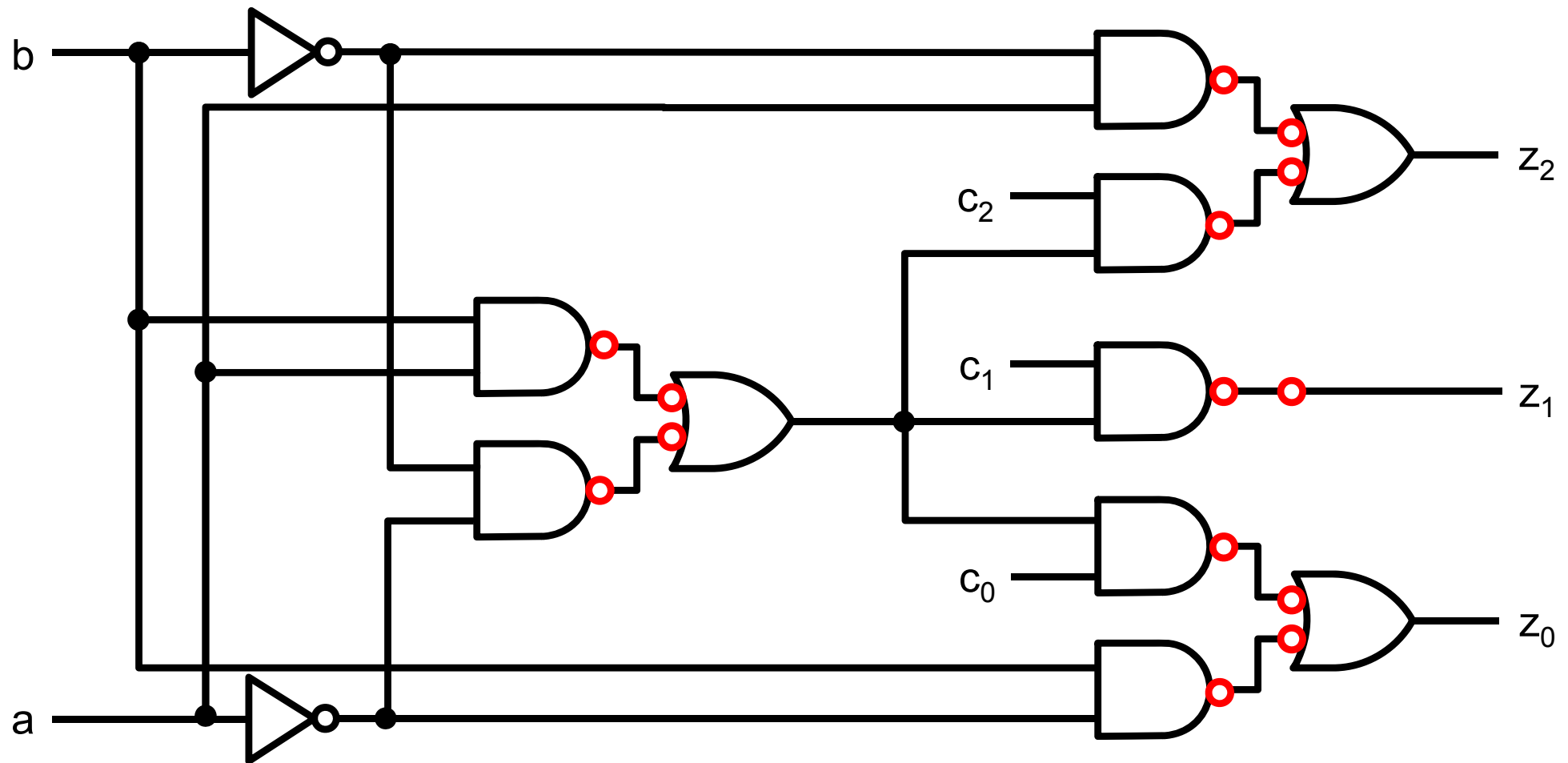


Síntesis de redes NAND



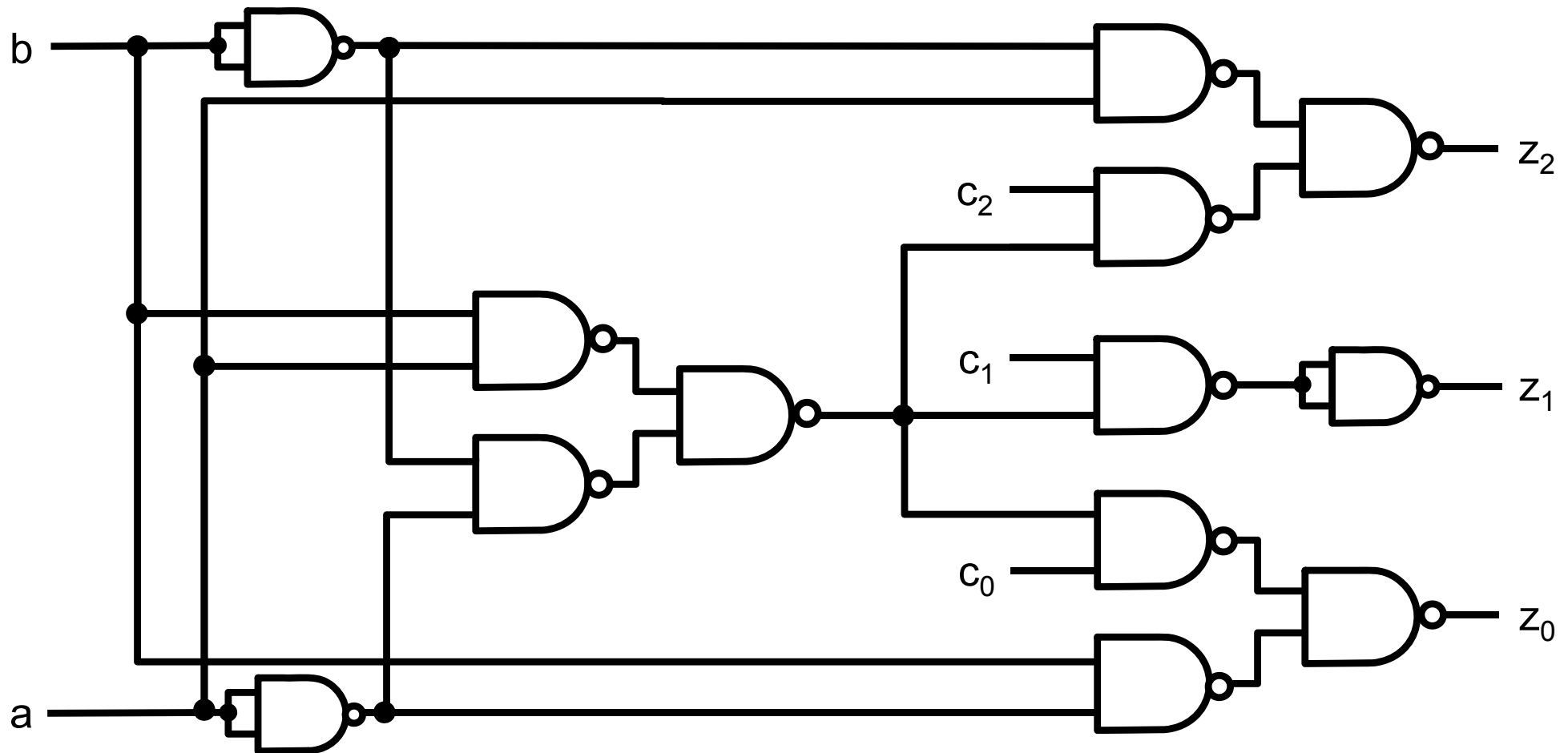


Síntesis de redes NAND





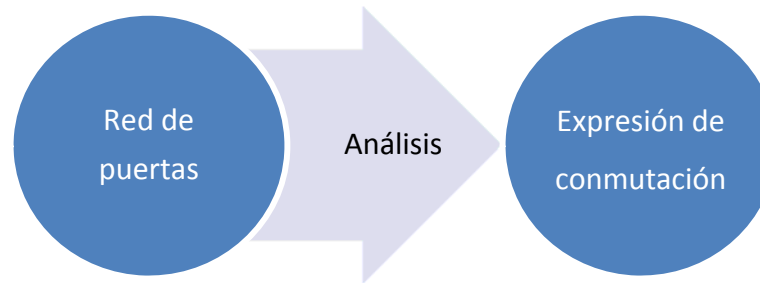
Síntesis de redes NAND



Análisis de redes de puertas



- Dada una red de puertas obtener una descripción de su conducta



- Método:
 - Dar nombre a cada una de las interconexiones intermedias.
 - En dirección de entradas a salidas, obtener una EC de cada una de dichas interconexiones como función de las entradas.
 - Simplificar las expresiones obtenidas.



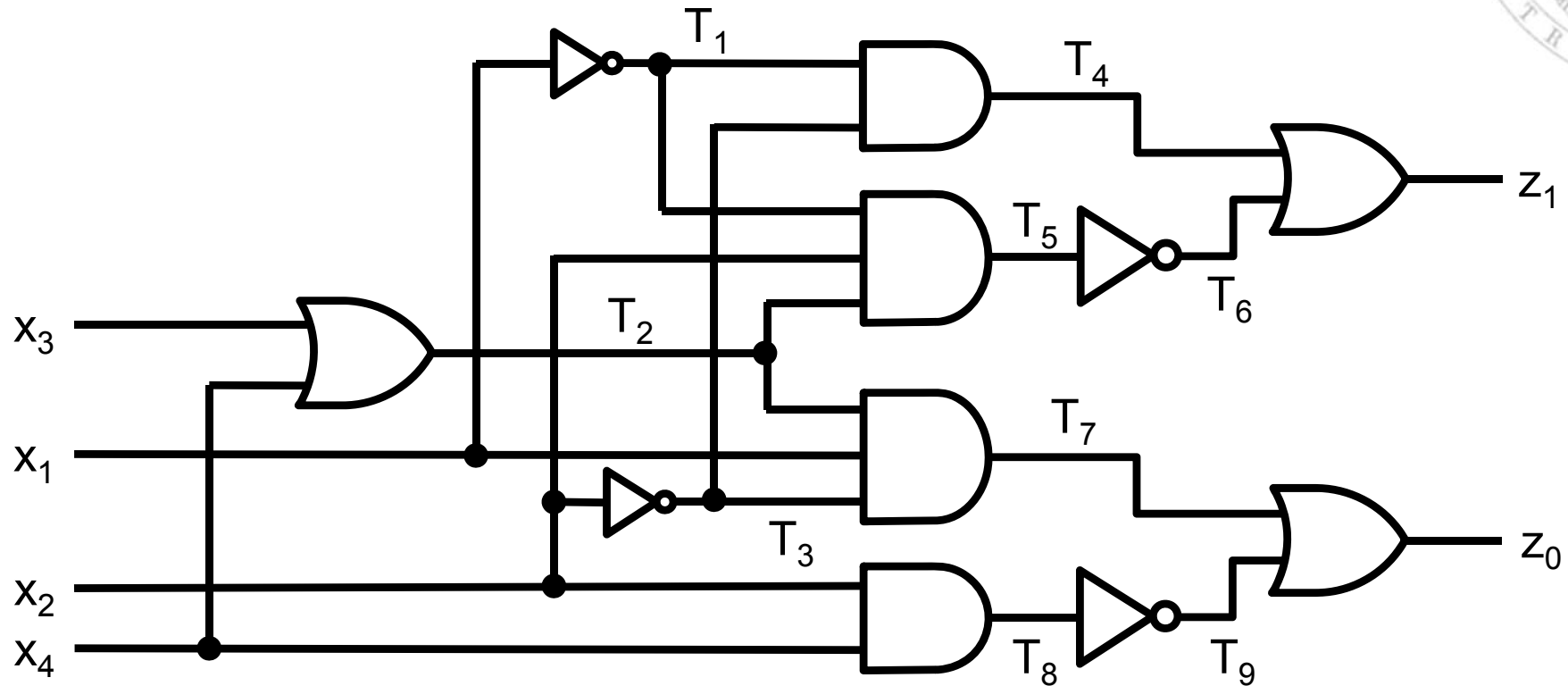
Análisis de redes AND-OR

versión 12/09/14

tema 3:
Implementación de sistemas combinacionales

FC

23



$$T_1 = \overline{x_1}$$

$$T_2 = x_3 + x_4$$

$$T_3 = \overline{x_2}$$

$$T_4 = T_1 T_3 = \overline{x_1} \overline{x_2}$$

$$T_5 = T_1 x_2 T_2 = \overline{x_1} x_2 (x_3 + x_4)$$

$$T_7 = T_2 x_1 T_3 = (x_3 + x_4) x_1 \overline{x_2}$$

$$T_8 = x_2 x_4$$

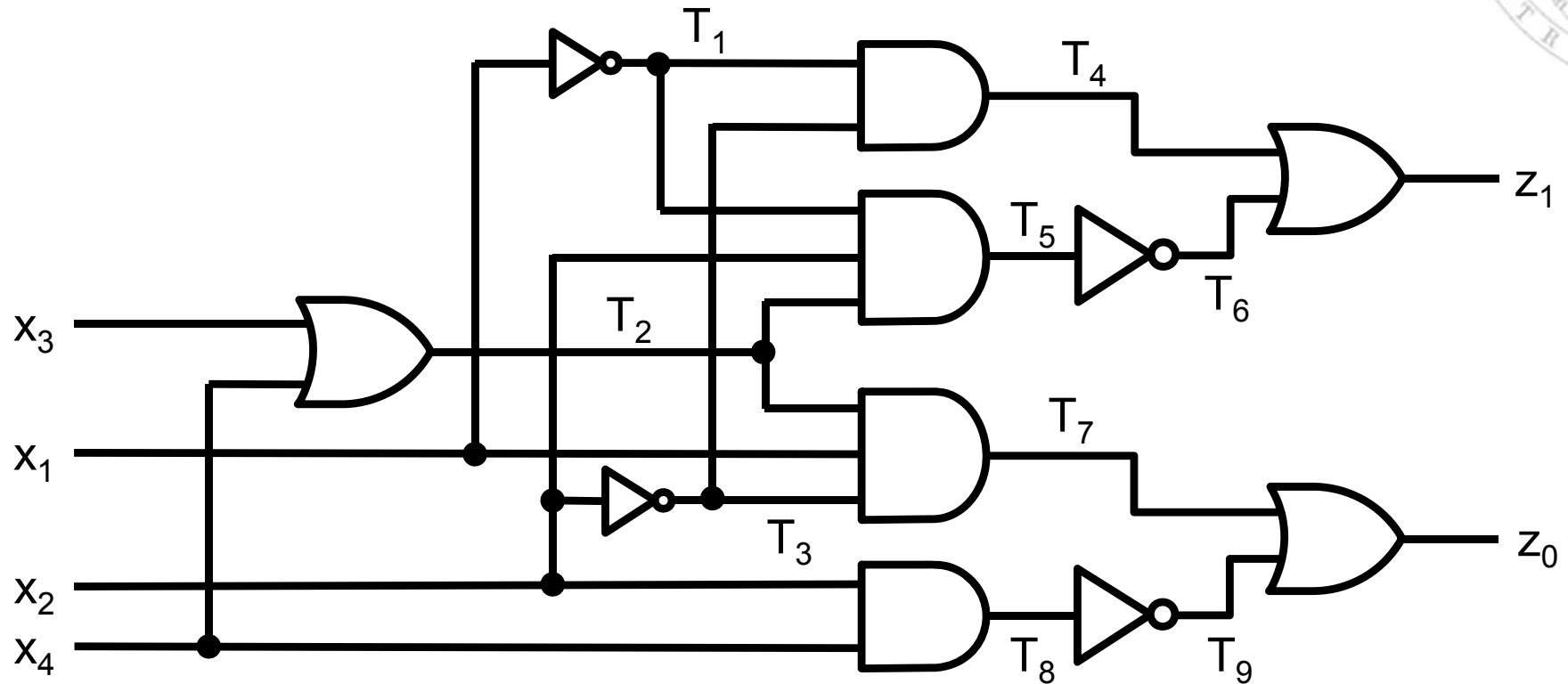
$$T_6 = \overline{T_5} = \overline{\overline{x_1} x_2 (x_3 + x_4)}$$

$$T_9 = \overline{T_8} = \overline{x_2 x_4}$$

$$Z_0 = T_7 + T_9 = (x_3 + x_4) x_1 \overline{x_2} + \overline{x_2 x_4}$$
$$Z_1 = T_4 + T_6 = \overline{x_1} \overline{x_2} + \overline{\overline{x_1} x_2 (x_3 + x_4)}$$



Análisis de redes AND-OR

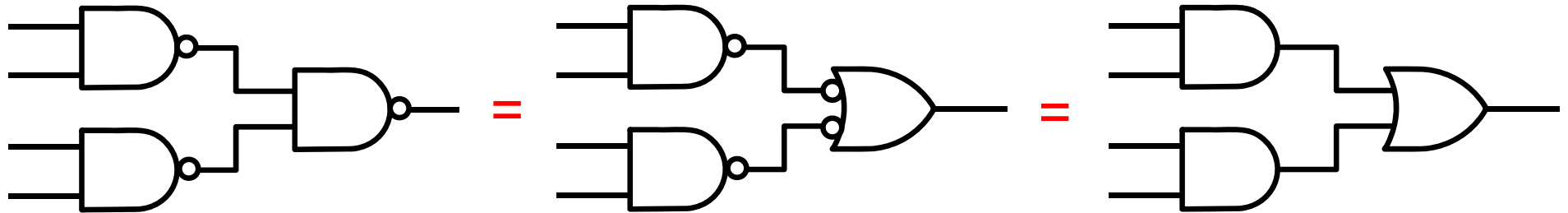


$$Z_0 = \overline{x_2} + \overline{x_4}$$
$$Z_1 = x_1 + \overline{x_2} + \overline{x_3} \overline{x_4}$$



Análisis de redes NAND

- 2 niveles NAND-NAND equivalen a 2 niveles AND-OR

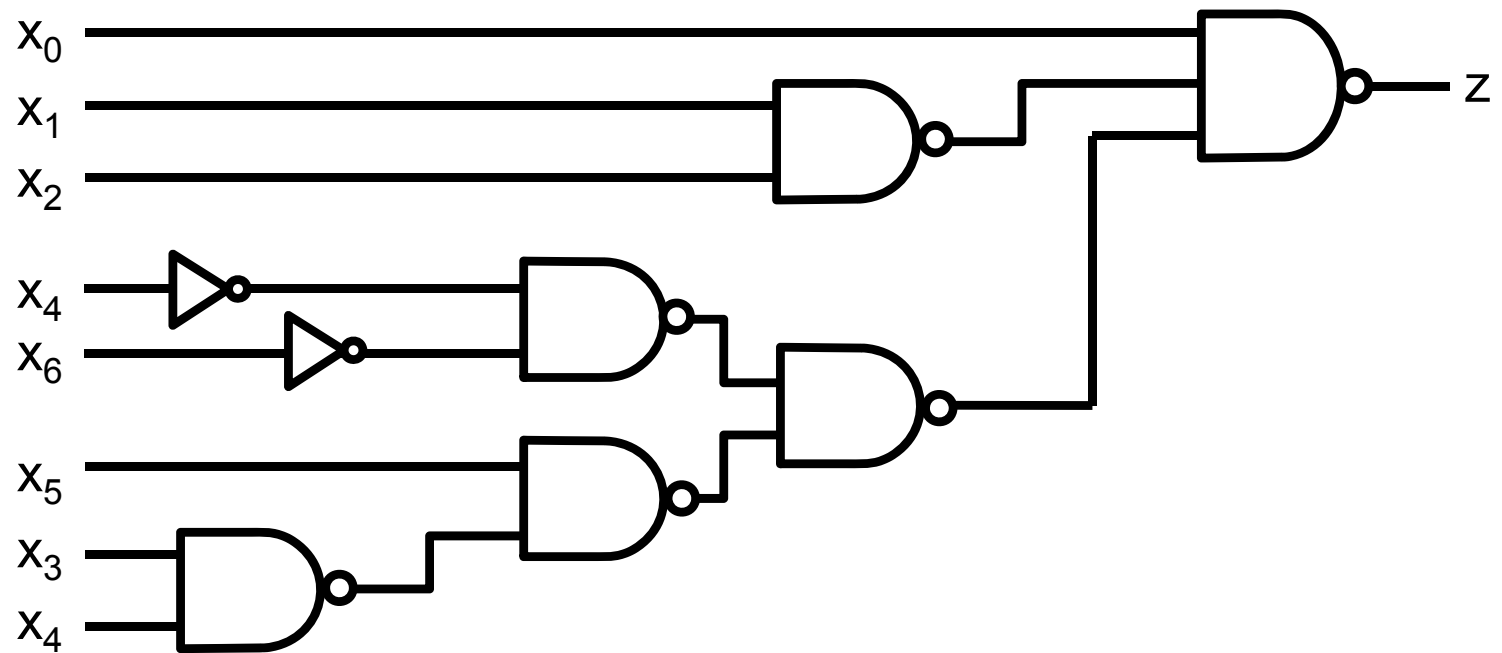


- Método:

- Cambiar al símbolo alternativo las puertas NAND de los niveles pares de la red.
- Eliminar dobles inversores donde sea posible.
- Analizar la red AND-OR normalmente.

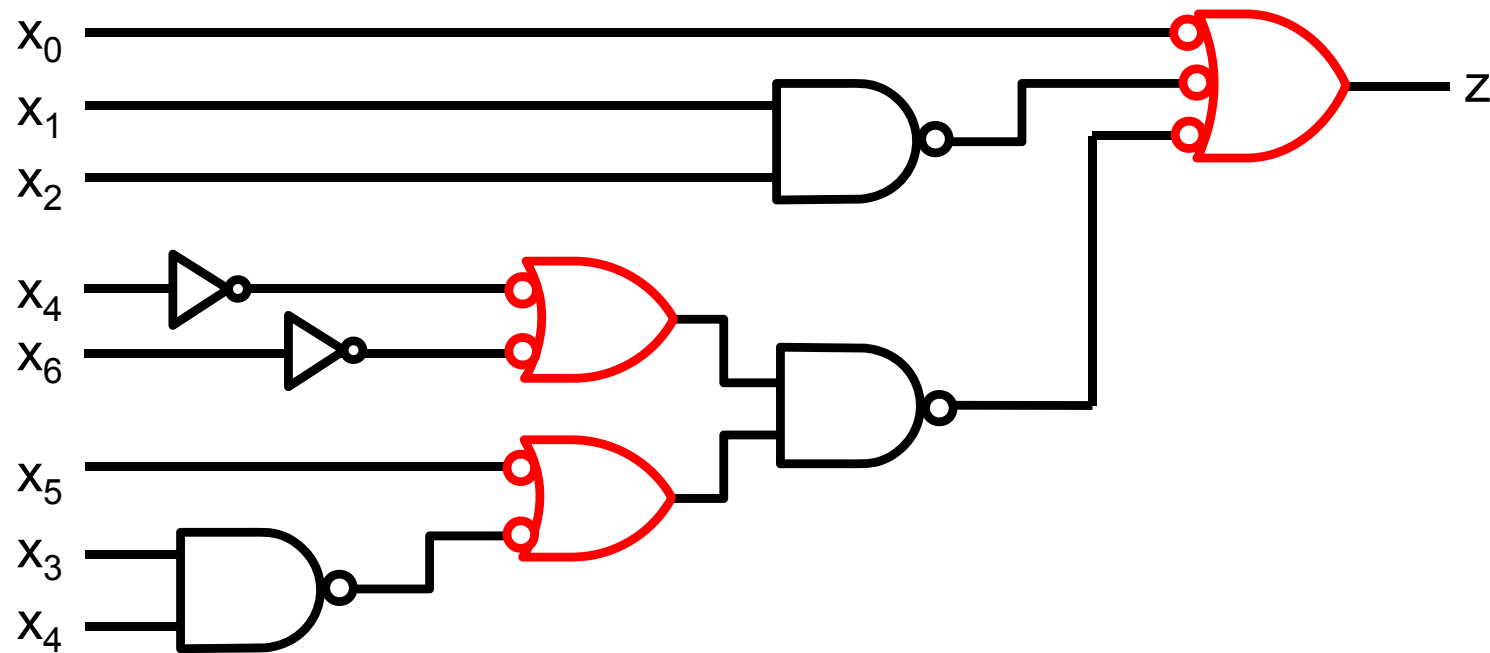


Análisis de redes NAND



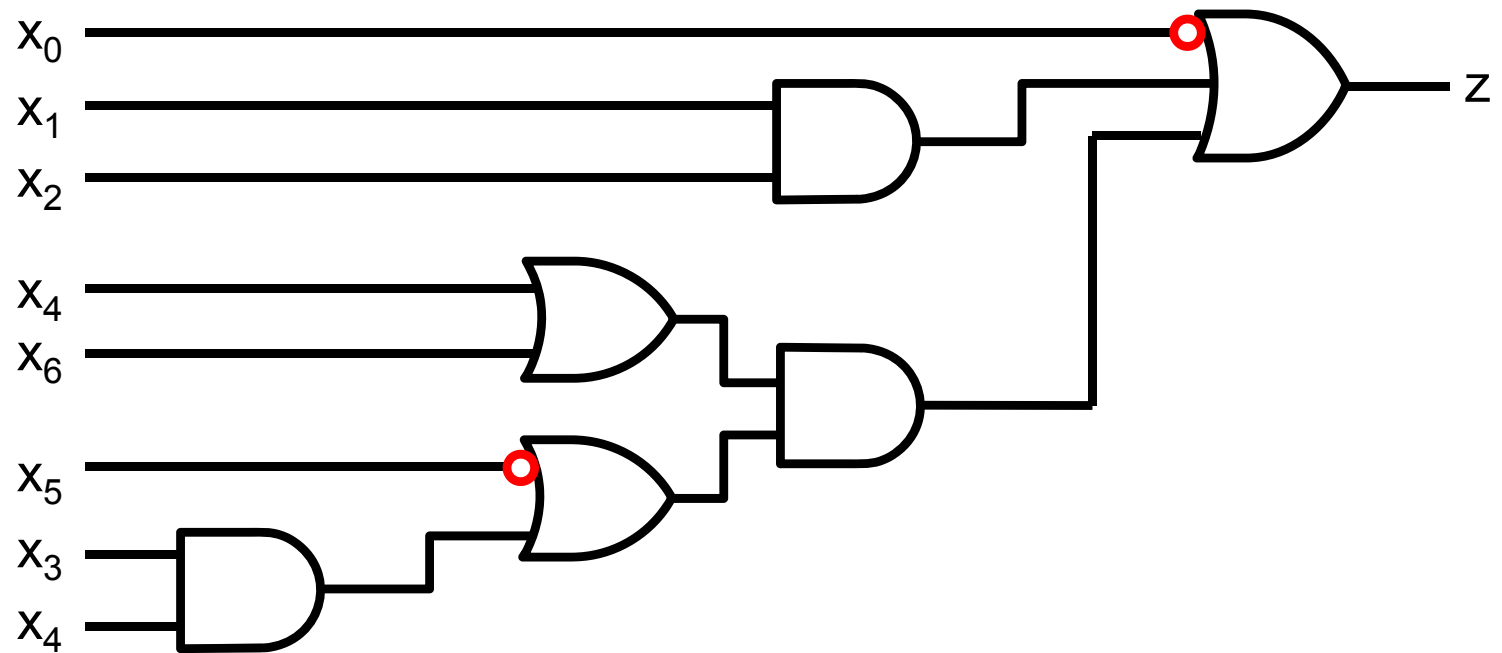


Análisis de redes NAND



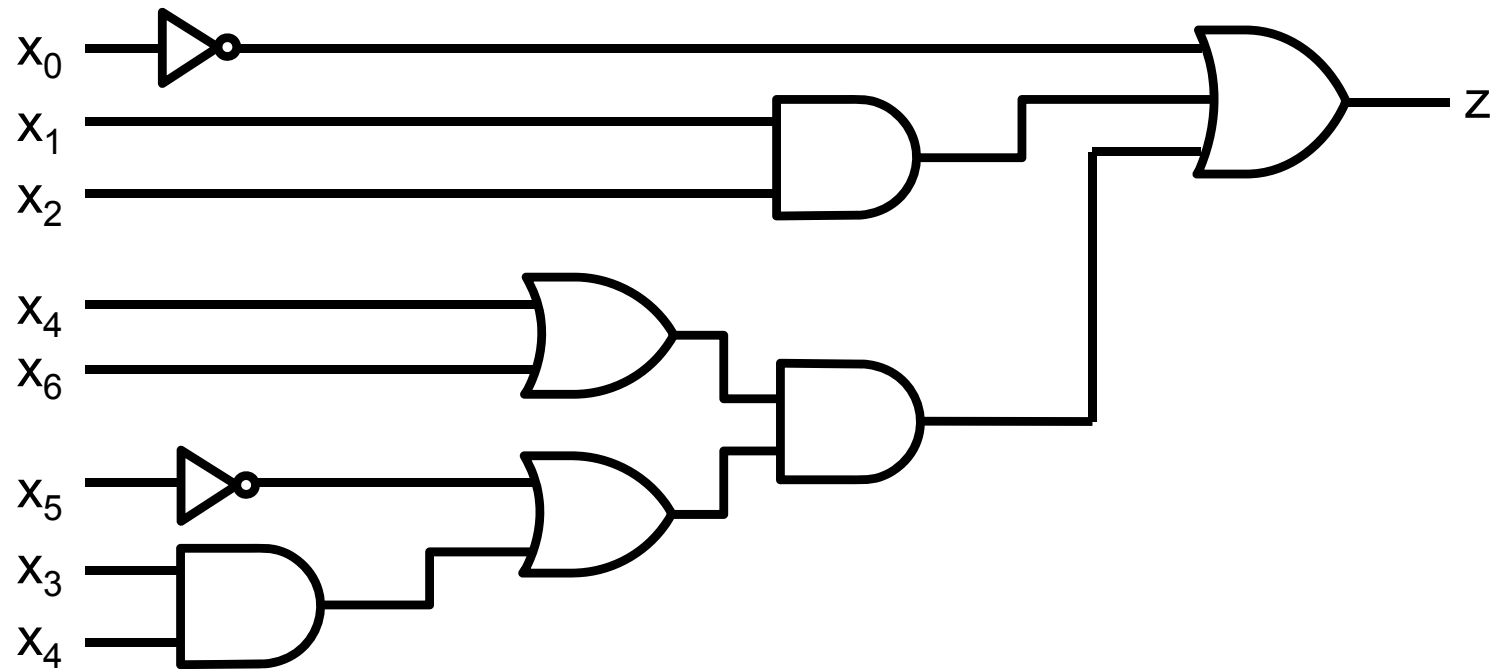


Análisis de redes NAND





Análisis de redes NAND



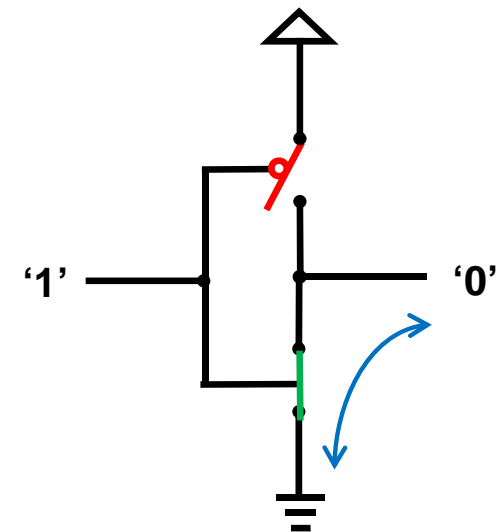
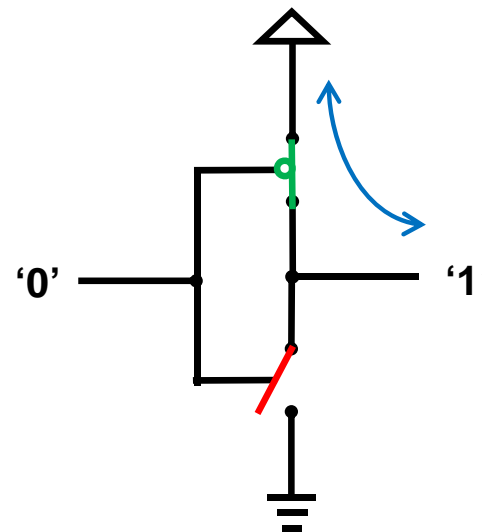
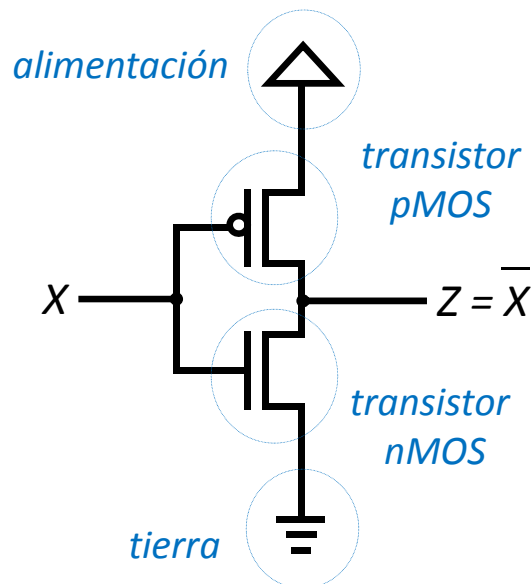
$$z = \overline{x_0} + x_1x_2 + (x_4 + x_6)(\overline{x_5} + x_3x_4)$$



Aspectos tecnológicos

Implementación de puertas lógicas

- Un **inversor CMOS** está formado por un transistor **pmos** en serie con un transistor **nmos** con sus puertas unidas:
 - la entrada del inversor es la puerta común y la salida, el punto de unión de los transistores.
 - el transistor **pmos** (pull-up) tiene un terminal conectado a Vdd y se encarga de poner la salida a '1' cuando conduce (cuando la entrada vale '0').
 - el transistor **nmos** (pull-down) tiene un terminal conectado a Vss y se encarga de poner la salida a '0' cuando conduce (cuando la entrada vale '1').

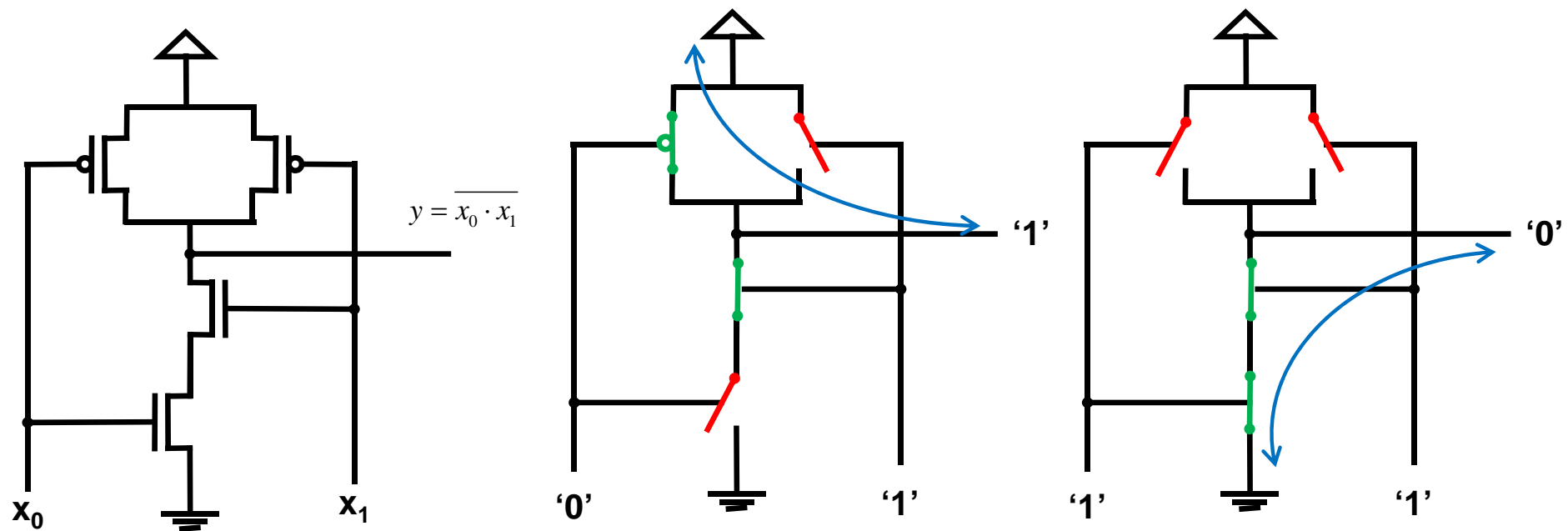




Aspectos tecnológicos

Implementación de puertas lógicas

- Puertas más complejas tienen una estructura análoga:
 - Dos árboles de transistores duales con entradas comunes y salida común:
 - **Árbol de pull-up**, formado únicamente por transistores **pMOS**, que conectan condicionalmente (en función de las entradas) la salida a Vdd.
 - **Árbol de pull-down**, formado únicamente por transistores **nMOS**, que conectan condicionalmente (en función de las entradas) la salida a Vss.



Puerta NAND CMOS



Aspectos tecnológicos

Señalización

- **Niveles lógicos:** el comportamiento de un sistema digital electrónico se expresa en términos de niveles de tensión medidos en voltios.
 - Físicamente las puertas se implementan para que solo puedan generar 2 niveles de tensión: alta (H) y baja (L)
 - Los **sistemas lógicos positivos** asignan el valor '0' a 'L' y '1' a 'H'
 - Los **sistemas lógicos negativos** asignan el valor '1' a L y '0' a 'H'
 - CMOS y TTL son sistemas de lógica positiva.
- **Márgenes de ruido:** las puertas se diseñan para tolerar variaciones en los voltajes de las entradas/salidas.
 - El máximo nivel se denomina margen de ruido.



Aspectos tecnológicos

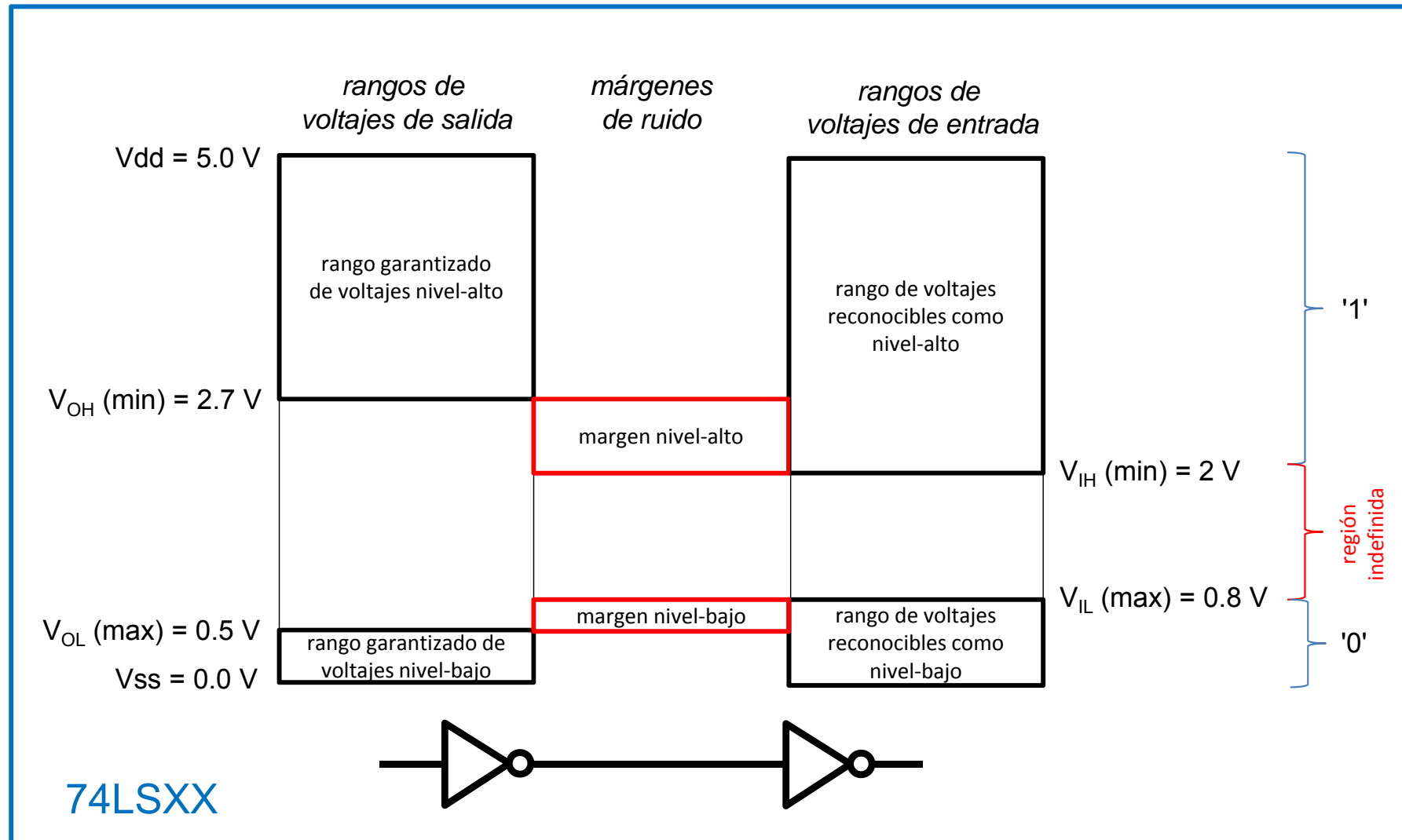
Señalización

versión 12/09/14

tema 3:
Implementación de sistemas combinacionales

FC

33

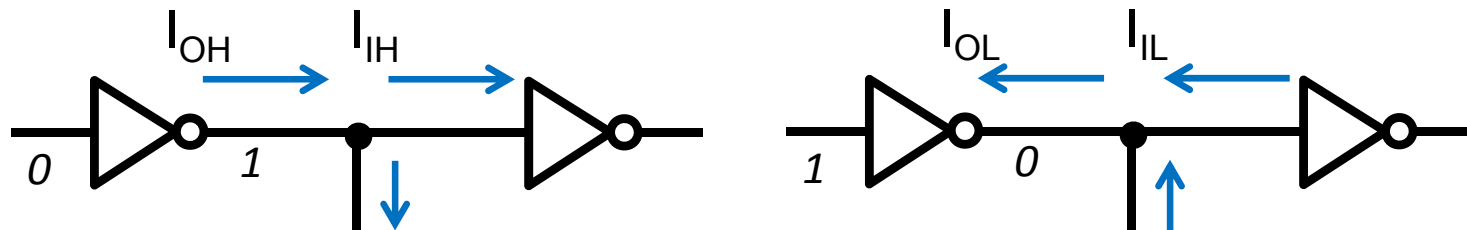




Aspectos tecnológicos

Conectividad

- **Conectividad de salida** (fan-out): indica el número máximo de puertas que pueden conectarse a una salida sin degradar los niveles de tensión
 - cociente entre la intensidad máxima que puede suministrar/absorber un puerto de salida y la intensidad máxima que absorbe/suministra un puerto de entrada.
 - 74LSXX (TTL) = 20
 - CMOS teóricamente ilimitado (impedancia de entrada muy alta), pero mucha conectividad degrada el retardo de conmutación.



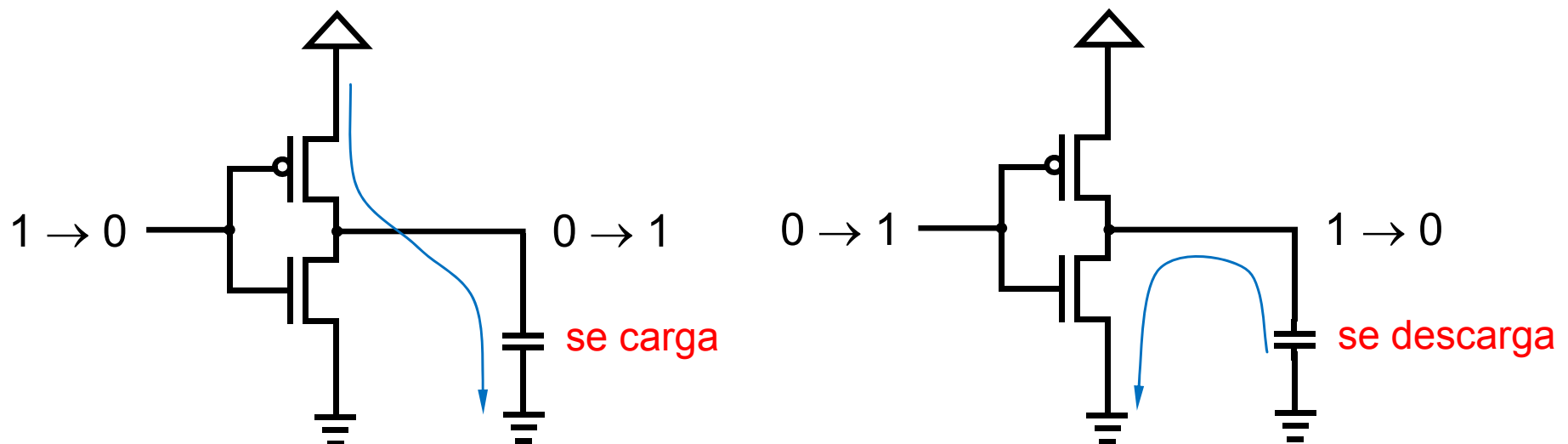
74LSXX	$I_{OH} / I_{IH} = 400 \mu A / 20 \mu A = 20$	$I_{OL} / I_{IL} = 8 \text{ mA} / 0,4 \text{ mA} = 20$
--------	---	--



Aspectos tecnológicos

Retardo

- El **retardo de conmutación** de una puerta es proporcional a su impedancia y a las capacidades parásitas de los elementos que estimula (otras puertas e interconexiones).
 - Mayor cuanto menos intensidad pueda circular por los transistores.
 - Mayor cuanto mayor sea la carga que tiene que circular.
 - más elementos conectados, interconexiones más largas, etc..

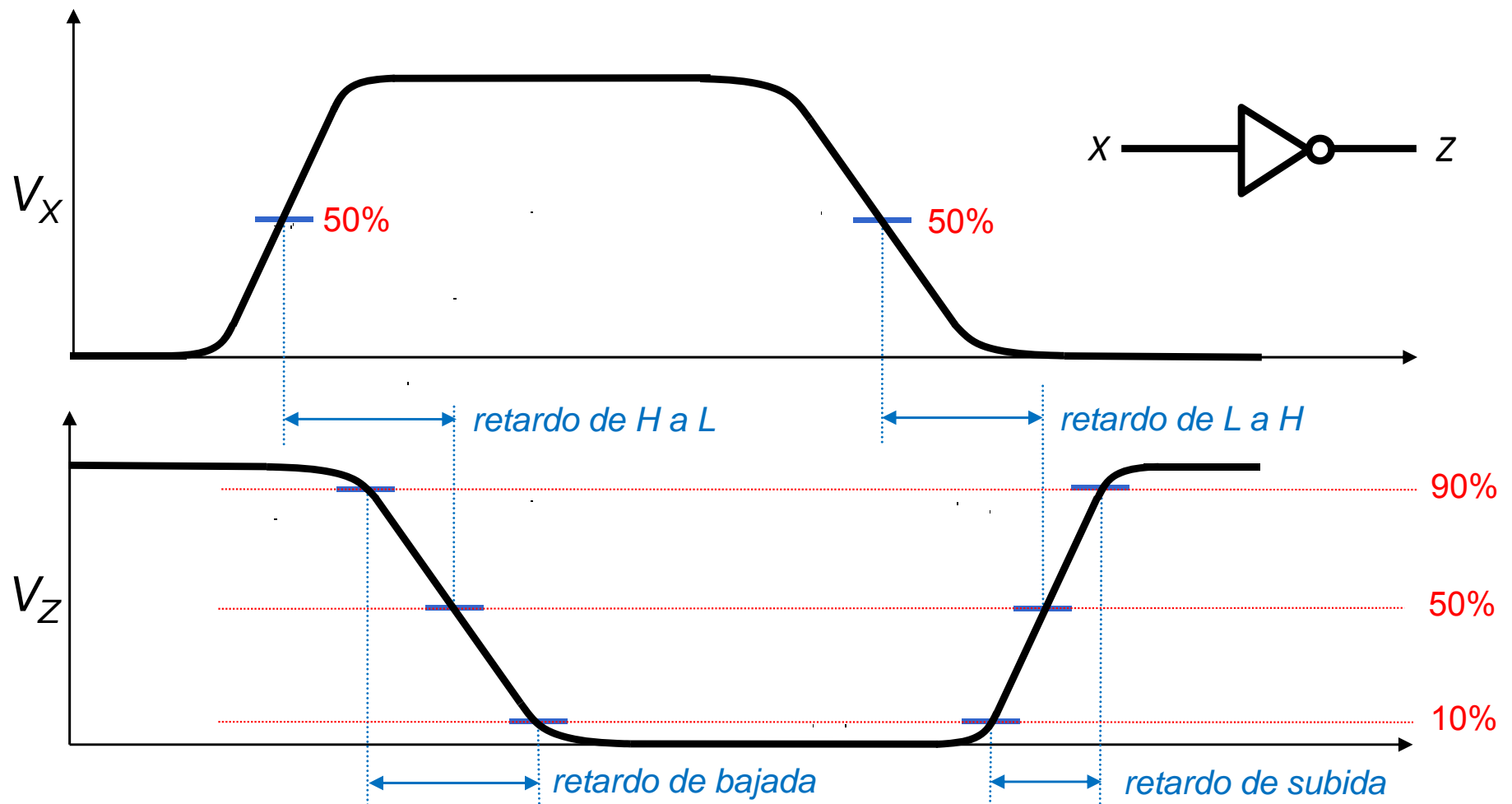




Aspectos tecnológicos

Retardo

- En una conmutación, las señales no cambian de voltaje instantáneamente.

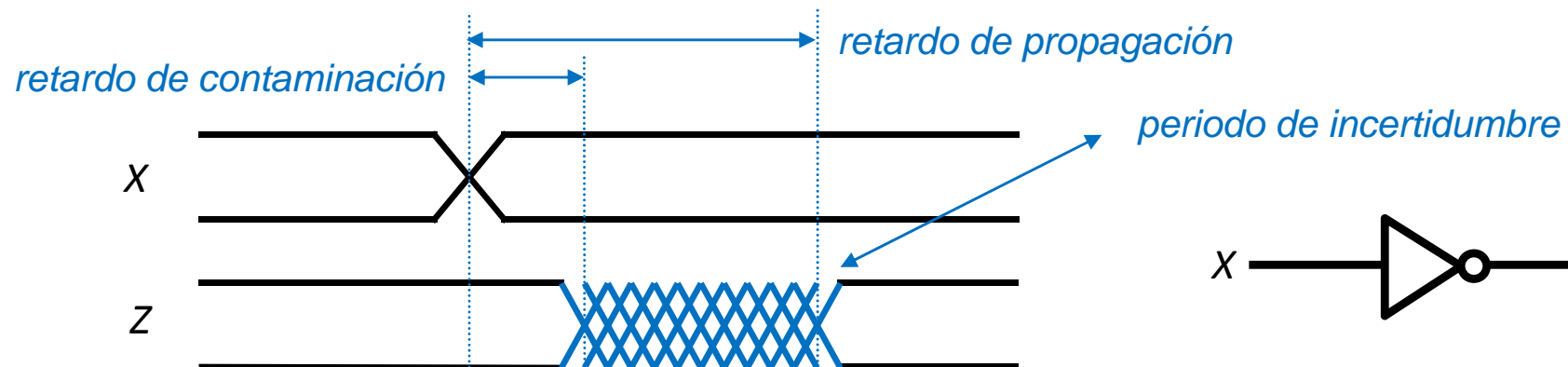




Aspectos tecnológicos

Retardo

- El retardo **es distinto** según:
 - la entrada que provoca la conmutación de la salida.
 - la polaridad de la conmutación.
 - del valor del resto de entradas.
 - factores ambientales.
- El máximo se denomina **retardo de propagación** y el mínimo, **retardo de contaminación**.
 - **Periodo de incertidumbre**: intervalo comprendido entre ambos

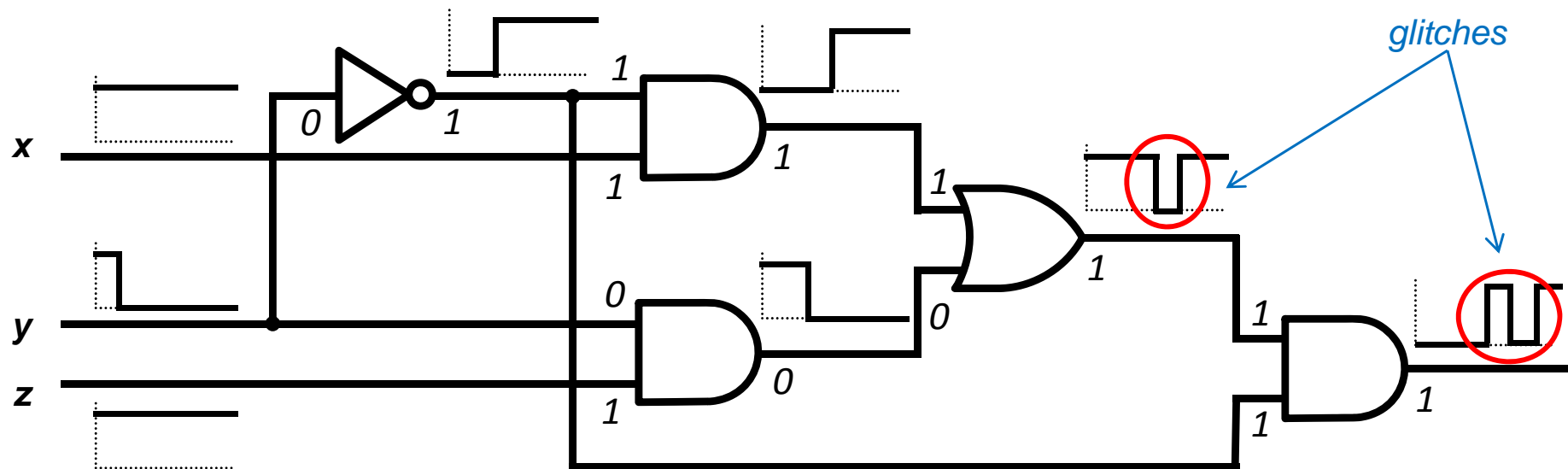




Aspectos tecnológicos

Retardo

- La salida solo cambia dentro del periodo de incertidumbre y puede tomar valores inconsistentes con la FC/EC que implementa.
 - Fuera de ese periodo las salidas permanecen estables.





Aspectos tecnológicos

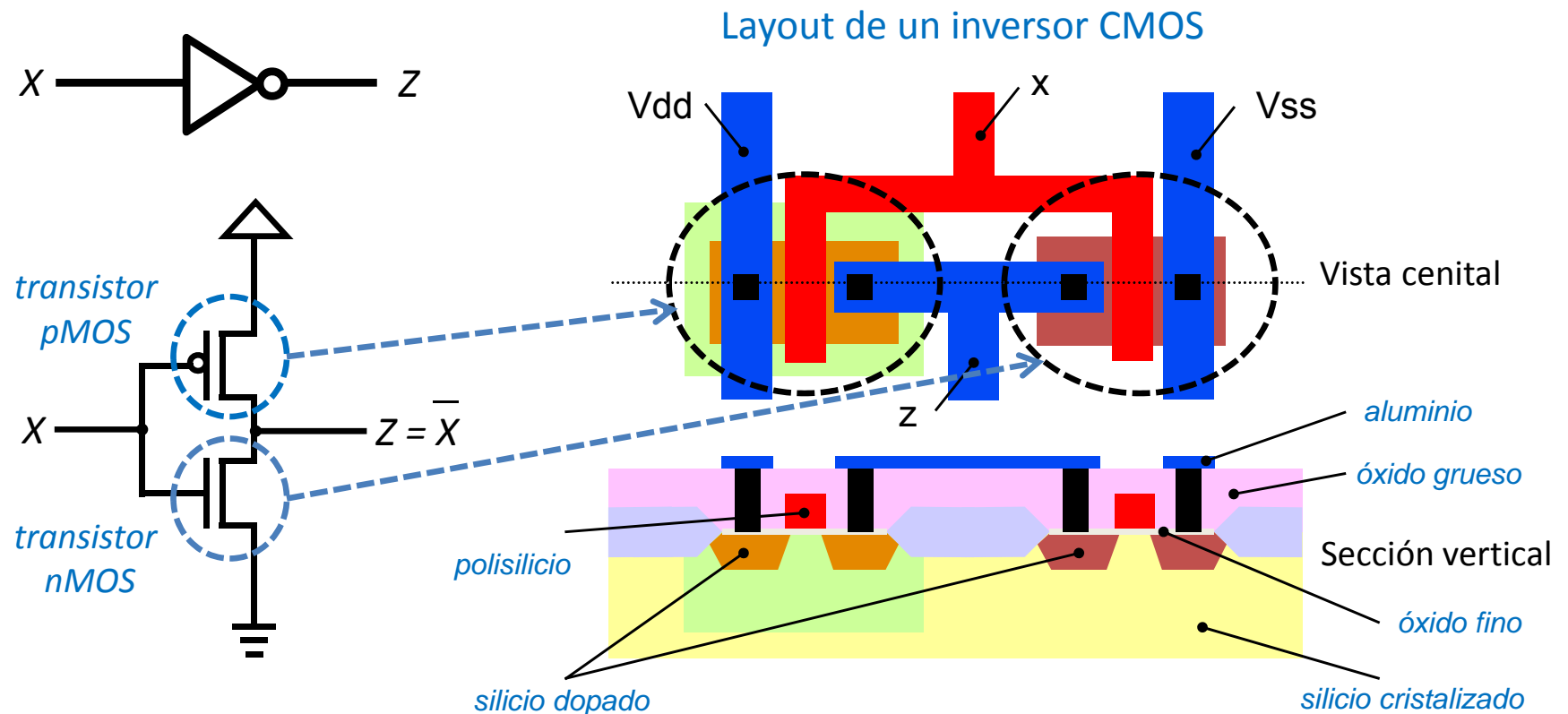
Consumo

- El **consumo de una puerta** depende de
 - la cantidad de corriente que por ella circule
 - el voltaje de alimentación
- **Consumo estático**: ocurre con el dispositivo en régimen permanente (conectado pero en reposo)
 - En tecnología CMOS es muy pequeño
- **Consumo dinámico**: ocurre con el dispositivo en régimen transitorio (realizando cálculos)
 - **Por conmutación**: al cargar y descargar los condensadores de carga.
 - **Por cortocircuito**: a través del camino directo que momentáneamente existe entre alimentación y tierra cada vez que el dispositivo conmuta
 - los transistores no son conmutadores perfectos.
 - las señales no cambian instantáneamente.

Aspectos tecnológicos

Coste

- El **coste** de un circuito depende del **área** que ocupe:
 - el área de las difusiones de los transistores.
 - el área del interconexionado.



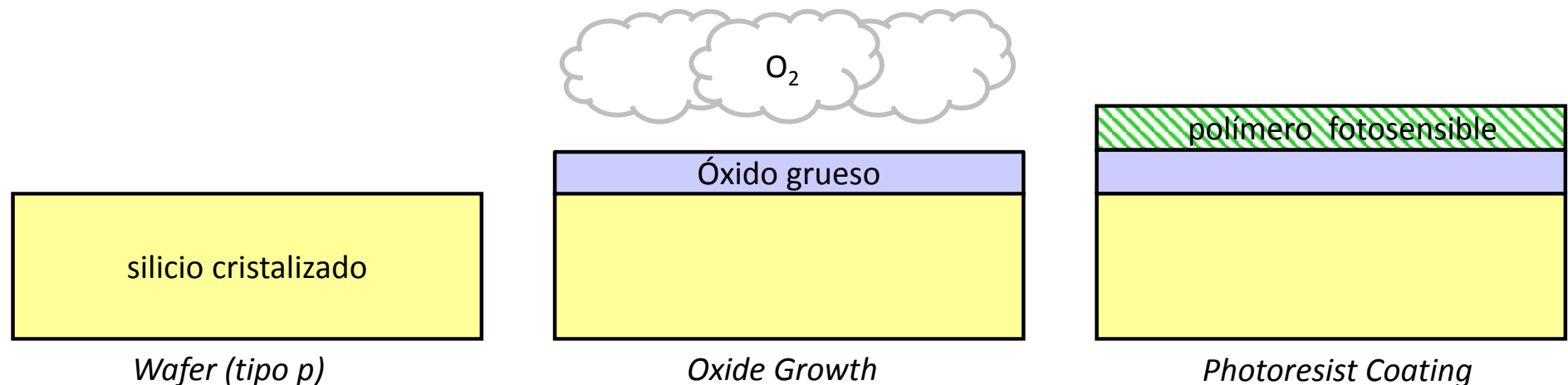


Aspectos tecnológicos

Fabricación

■ El proceso de fabricación de un circuito VLSI:

- Parte de un lingote (ingot) de silicio cristalizado.
- Que se corta en discos (wafer) que se pulen.
- Sobre el que se depositan distintos materiales mediante una serie de procesos **fotolitográficos**:
 - Difunden materiales sobre la oblea.
 - Protegen secciones de material **usando máscaras** trazadas por el diseñador.
 - Eliminan, dopan o metalizan las secciones no protegidas.



Aspectos tecnológicos

Fabricación

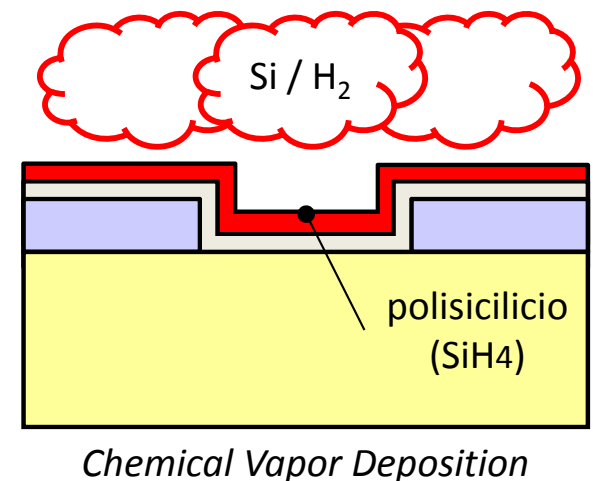
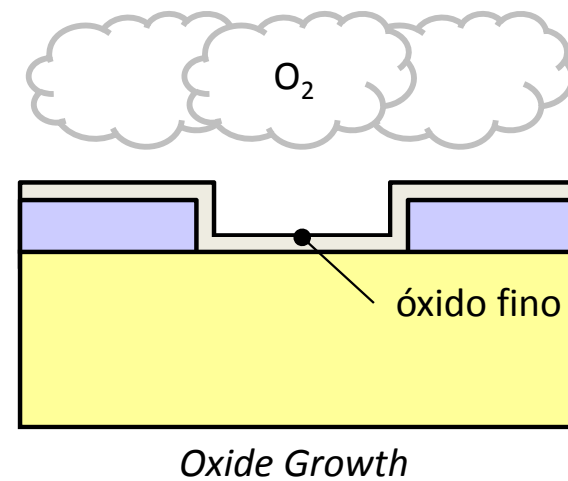
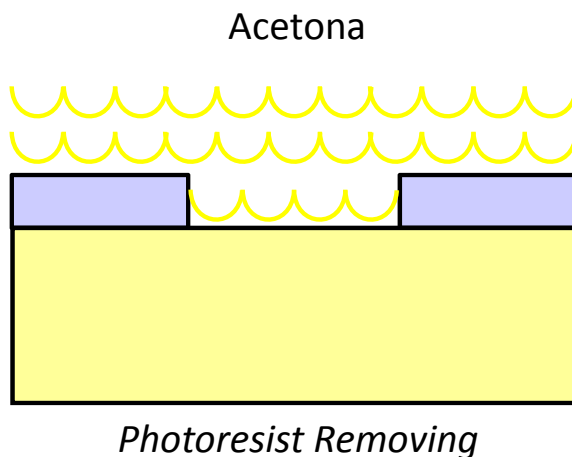
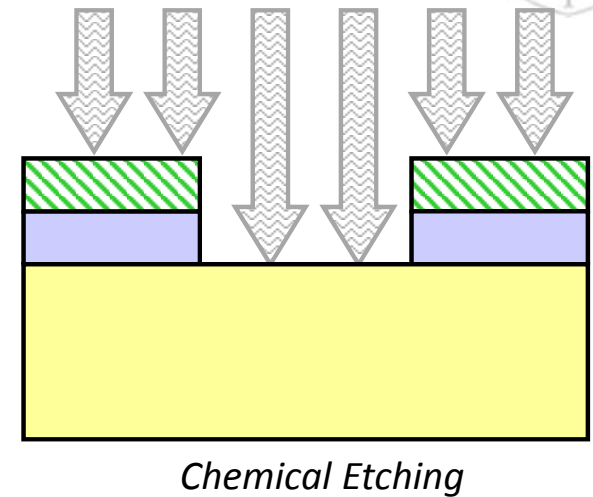
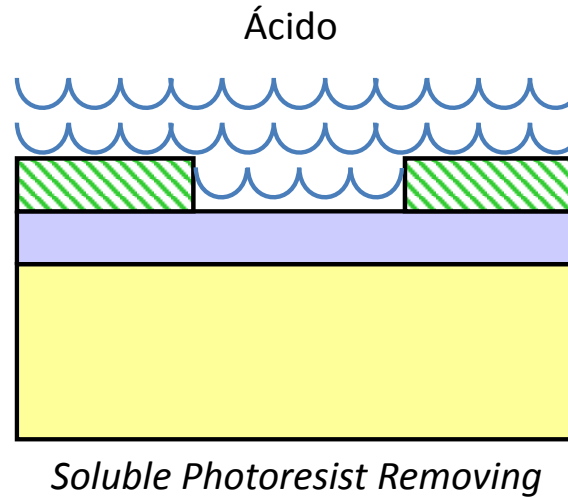
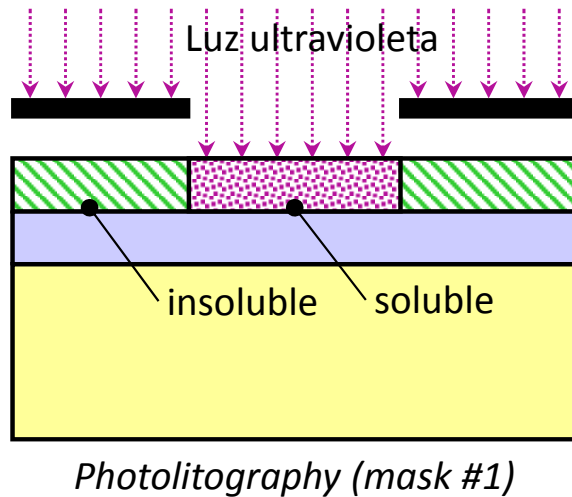


versión 12/09/14

tema 3:
Implementación de sistemas combinacionales

FC

42



Aspectos tecnológicos

Fabricación

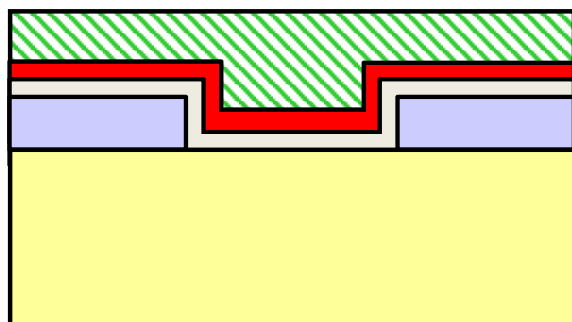


versión 12/09/14

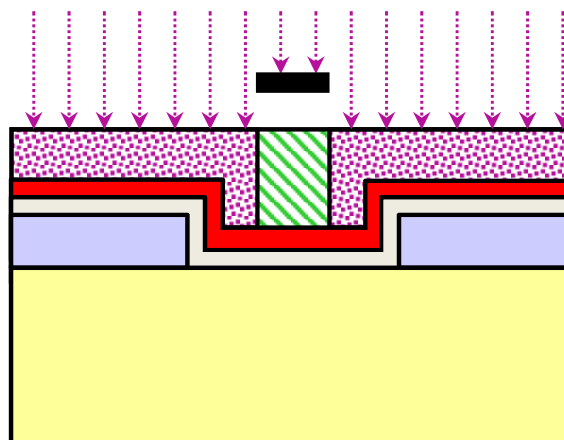
tema 3:
Implementación de sistemas combinatoriales

FC

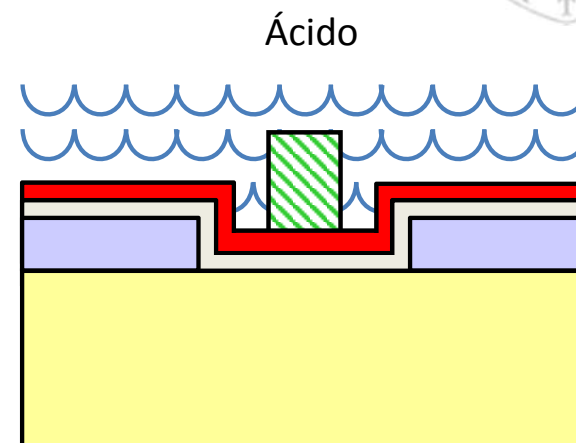
43



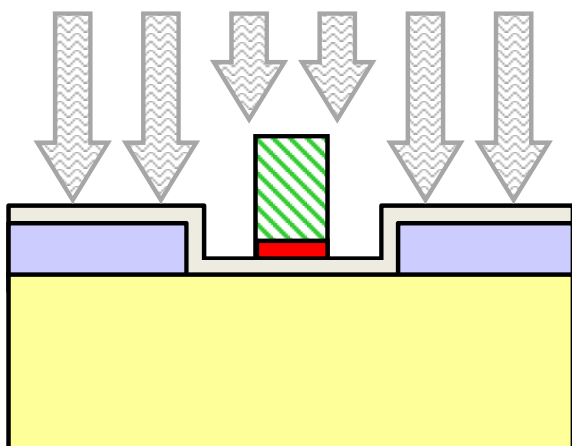
Photoresist Coating



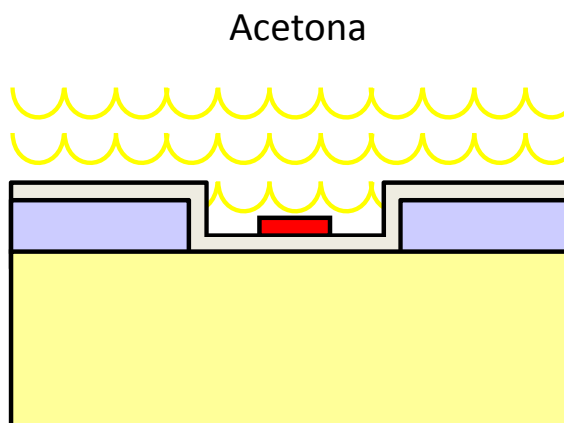
Photolithography (mask #2)



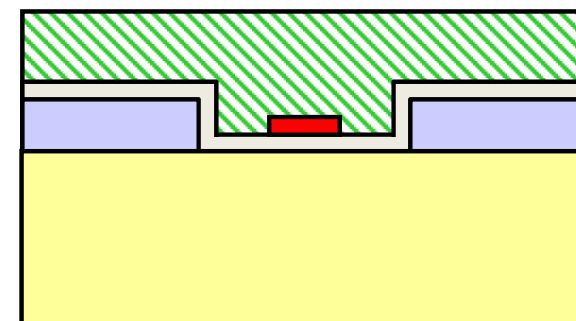
Soluble Photoresist Removing



Plasma Etching



Photoresist Removing



Photoresist Coating

Aspectos tecnológicos

Fabricación

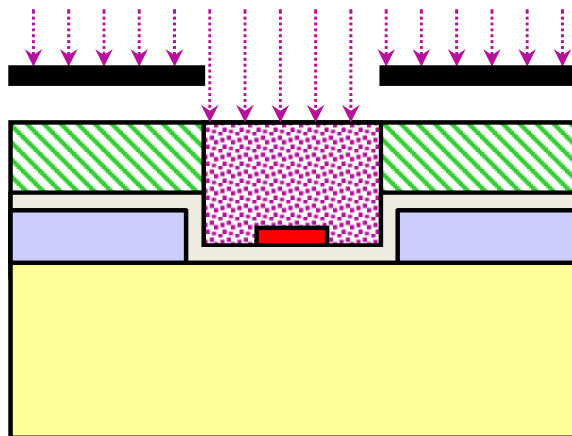


versión 12/09/14

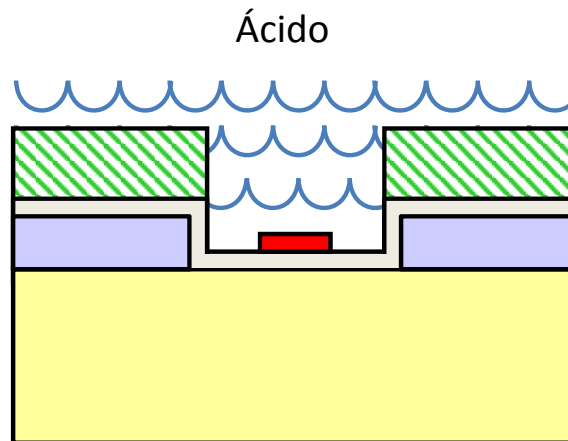
tema 3:
Implementación de sistemas combinatoriales

FC

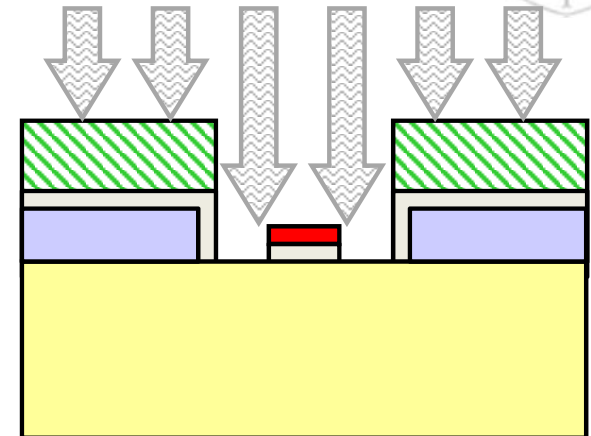
44



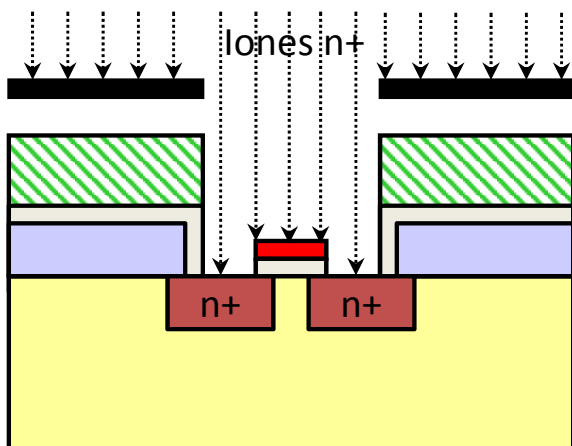
Photolithography (mask #3)



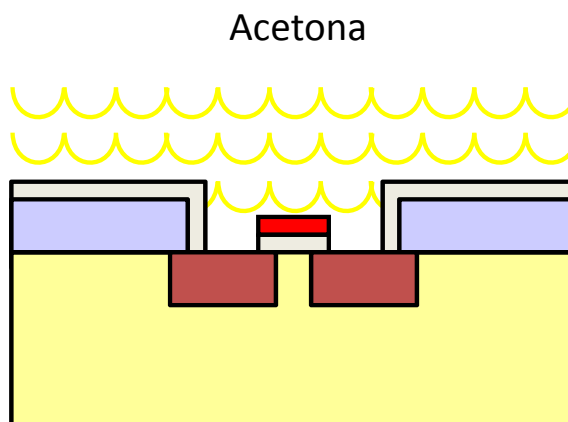
Soluble Photoresist Removing



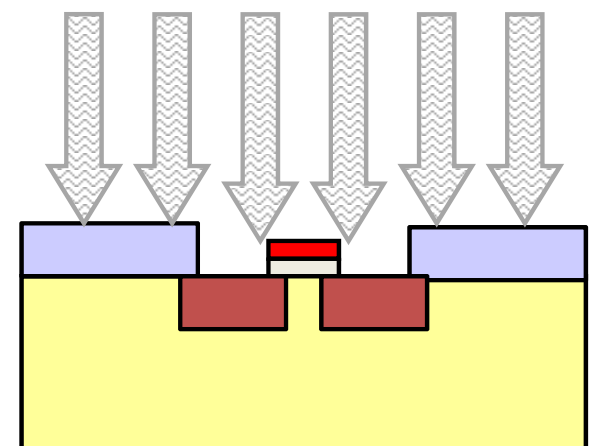
Chemical Etching



Ion Implantation (mask #4)



Photoresist Removing



Chemical Etching

Aspectos tecnológicos

Fabricación

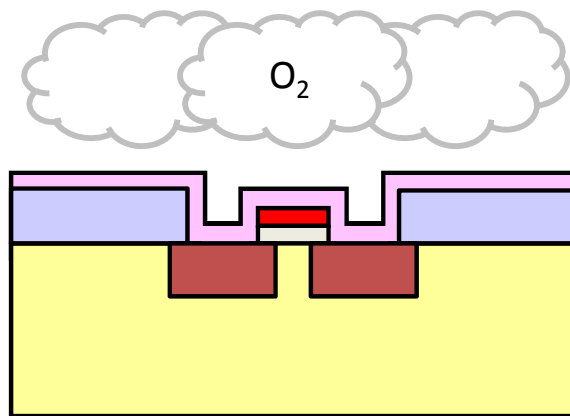


versión 12/09/14

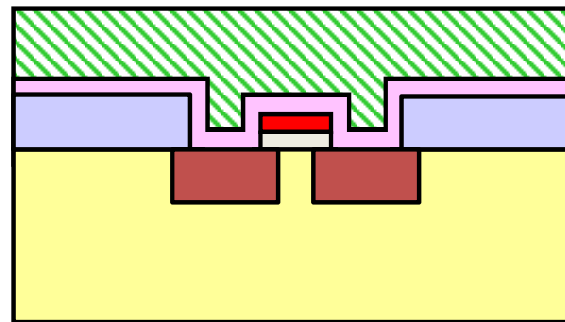
tema 3:
Implementación de sistemas combinacionales

FC

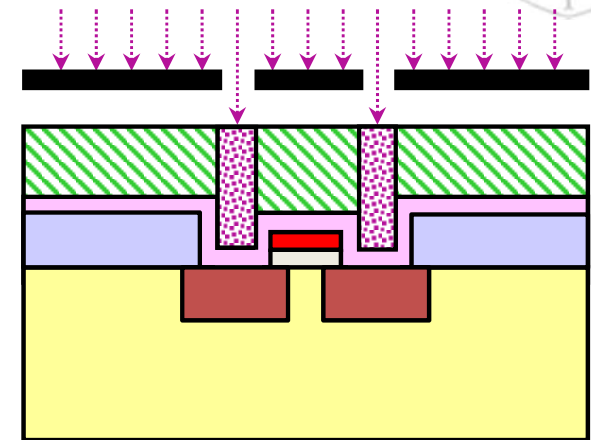
45



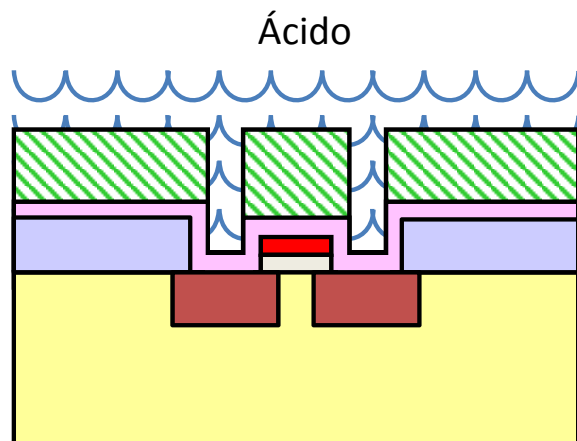
Oxide Growth



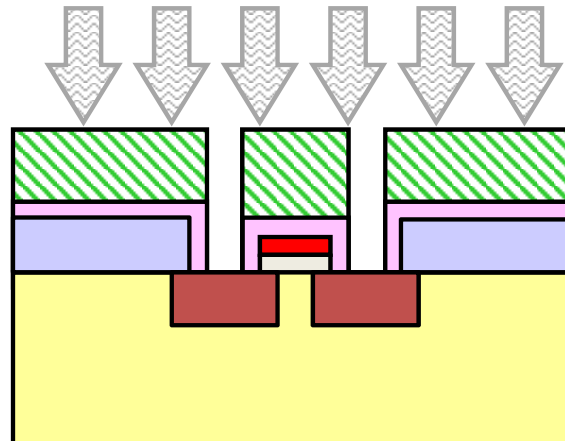
Photoresist Coating



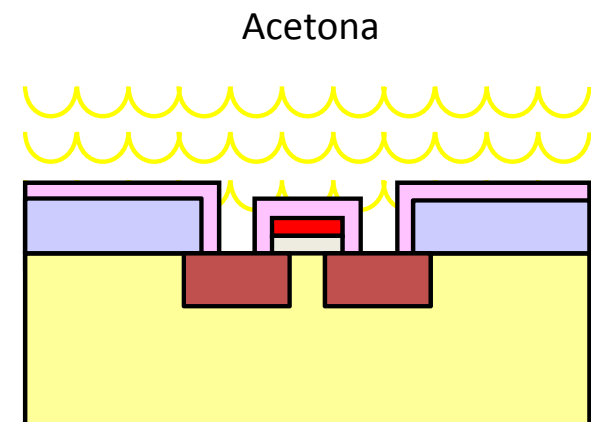
Photolithography (mask #5)



Soluble Photoresist Removing



Chemical Etching



Photoresist Removing

Aspectos tecnológicos

Fabricación

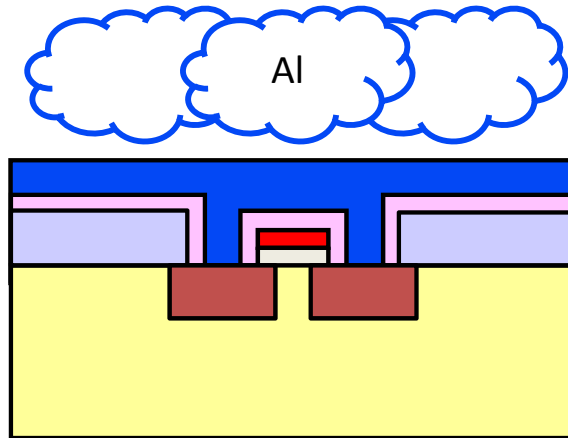


versión 12/09/14

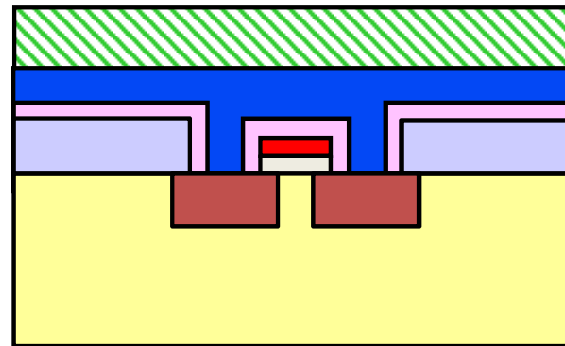
tema 3:
Implementación de sistemas combinacionales

FC

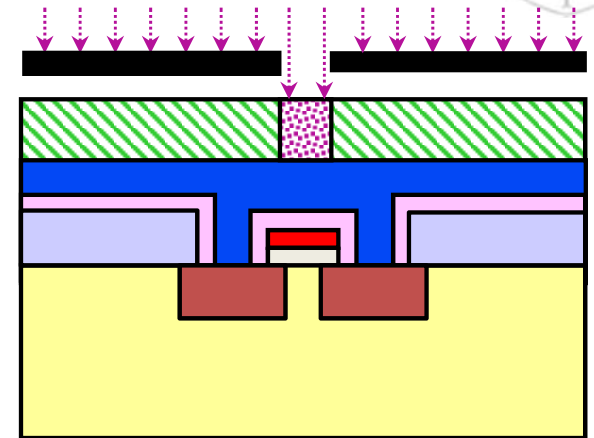
46



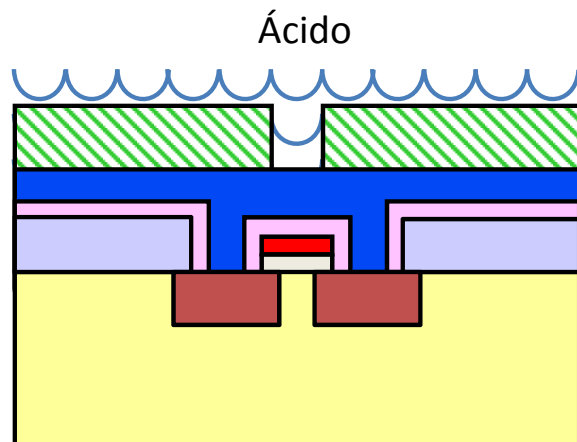
Metal Vapor Deposition



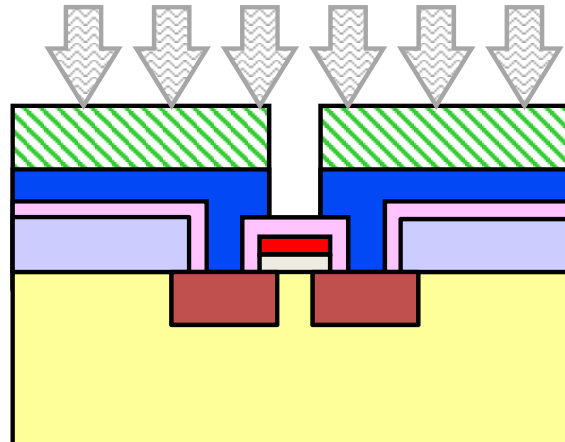
Photoresist Coating



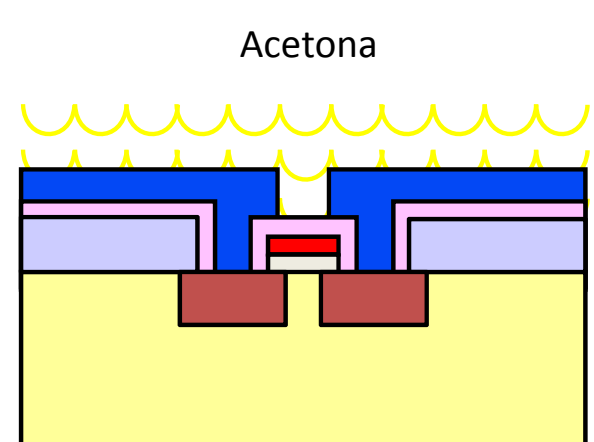
Photolithography (mask #6)



Soluble Photoresist Removing



Chemical Etching



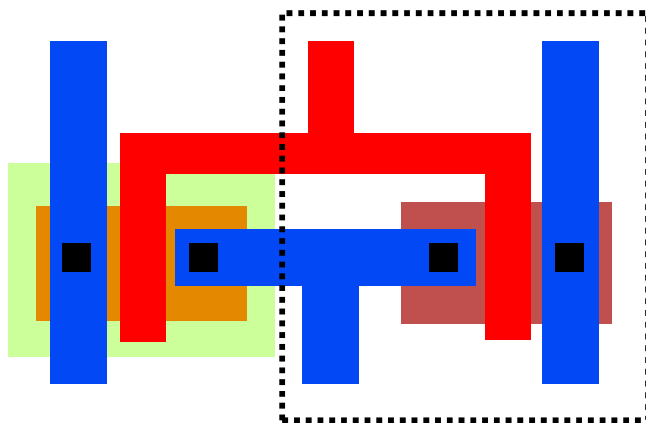
Photoresist Removing

Aspectos tecnológicos

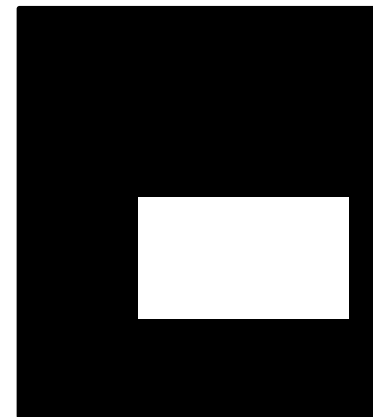
Fabricación

- El fabricante extrae las máscaras a usar durante el proceso de fabricación a partir del layout trazado por el diseñador.

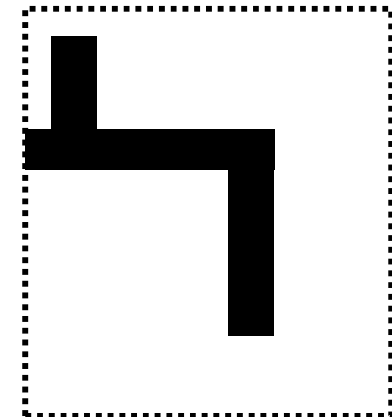
Layout de un inversor CMOS



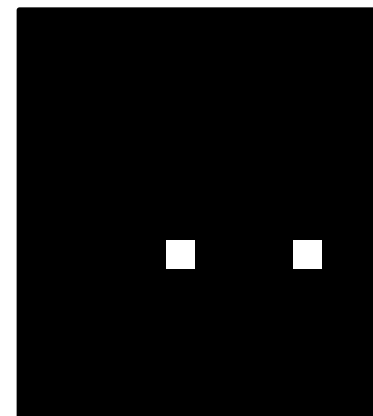
transistor n-mos



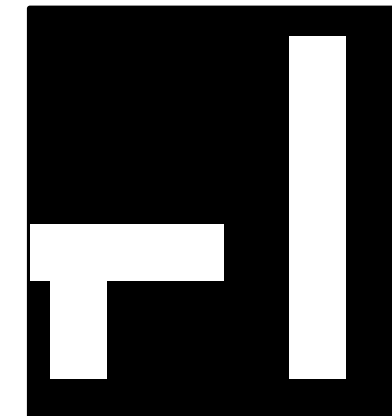
Mask #1, #3, #4



Mask #2



Mask #5



Mask #6



Aspectos tecnológicos

Fabricación

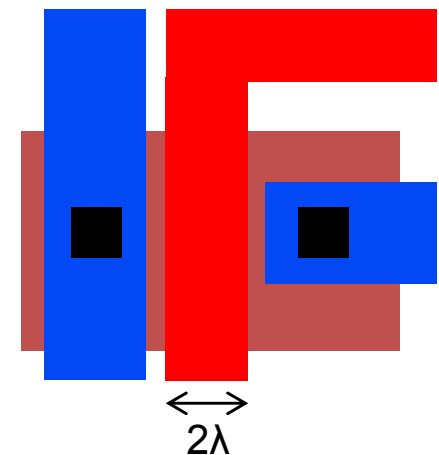
- El **trazado del layout** (forma y ubicación de cada capa de material) es un proceso muy complejo que puede hacerse:
 - Desde cero: **diseño full-custom**
 - Ubicando y/o interconectando celdas prediseñadas a nivel físico o incluso ya prefabricadas: **diseño semi-custom**
- Existen distintas tecnologías semi-custom
 - Standard cells, Gate arrays, Sea of gates, FPGA, etc.
- Pero una muy popular es la basada en **standard cells**:
 - El fabricante facilita bibliotecas de celdas prediseñadas a nivel físico.
 - Cada celda realiza una función lógica simple.
 - Geométricamente es un rectángulo de altura fija y anchura variable (+ancha cuanto +compleja es su función lógica).
 - El diseñador implementa circuitos usando solo celdas de la biblioteca.
 - El layout se traza ubicando las celdas en filas e interconectándolas.



Aspectos tecnológicos

Fabricación

- La geometría de un layout se define en términos de un único parámetro λ
 - Representa la **dimensión más pequeña definible en un proceso tecnológico**, típicamente es la mitad de la longitud mínima de canal.
 - Todas las dimensiones se expresan como múltiplos enteros de λ , permitiendo el escalado proporcional de todo el circuito.
- Su valor absoluto disminuye en cada generación tecnológica:
 - 2004: **90nm** , 2006: **65nm**, 2008: **45nm**, 2010: **32nm**, 2012: **22nm**
- Conforme λ disminuye, la densidad de integración aumenta.
 - Evolución de las NAND Flash (Samsung):
 - **2 Gb** (90nm), **8 Gb** (65nm), **16 Gb** (50nm), **32Gb** (32nm), **64 Gb** (22nm)

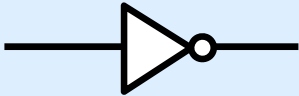










Aspectos tecnológicos

Biblioteca de celdas: CMOS 90 nm

$V_{dd} = 1.2V$, $T=25^{\circ}C$, $C_L = 13 \text{ fF}$

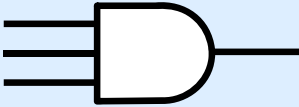

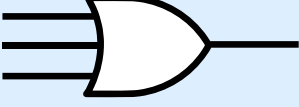





Puerta	# transistores	Área (μm^2)	Retardo (ps)	Consumo estático (nW)	Consumo dinámico (nW/MHz)
	2	6.4512	100	52	618
	6	7.3728	180	56	6545
	6	7.3728	171	58	6859
	4	5.5296	132	78	5208
	4	6.4512	132	49	6190
	14	13.8240	237	89	8702
	12	13.8240	136	82	16372

fuelle: Synopsys (SAED EDK 90 nm)



Aspectos tecnológicos

Biblioteca de celdas: CMOS 90 nm

Puerta	# transistores	Área (μm^2)	Retardo (ps)	C. estático (nW)	C. dinámico (nW/MHz)
	8	8.2944	206	59	8222
	10	10.1376	214	63	8557
	8	9.2160	184	62	7396
	10	10.1376	199	64	7698
	6	11.9808	192	102	12200
	8	12.9024	178	161	15214
	6	11.9808	153	104	16521
	8	15.6672	126	119	14991

fuelle: Synopsys (SAED EDK 90 nm)



Aspectos tecnológicos

Biblioteca de celdas: CMOS 90 nm

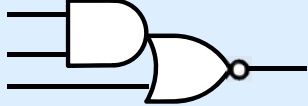
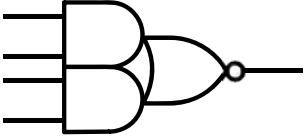
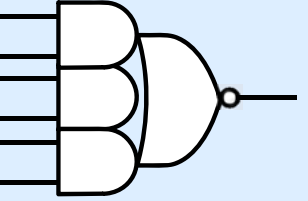
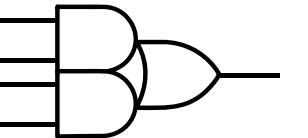
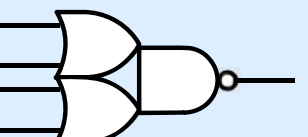
versión 12/09/14

tema 3:
Implementación de sistemas combinatoriales

FC

52

fuelle: Synopsys (SAED EDK 90 nm)

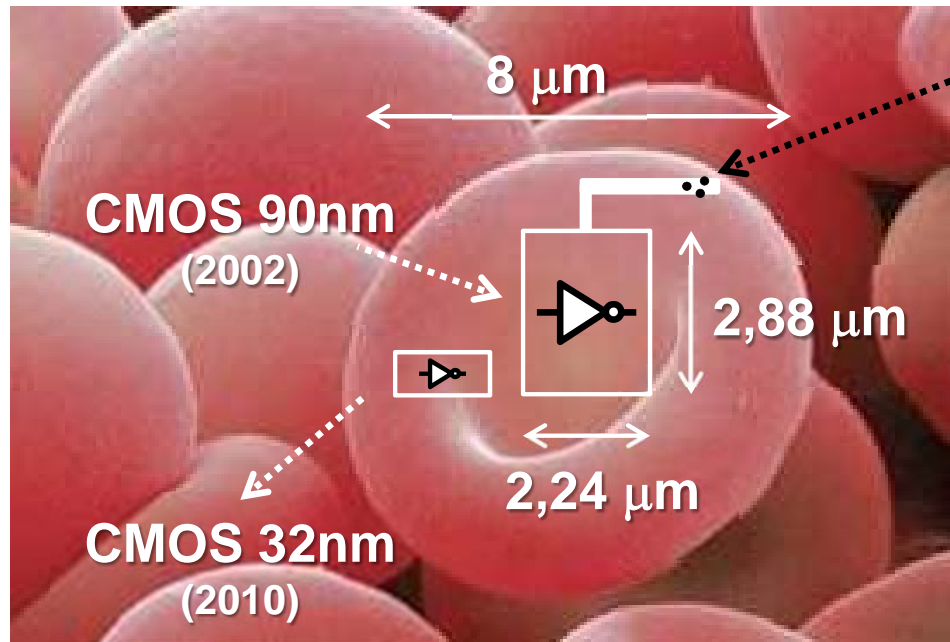
Puerta	# transistores	Área (μm^2)	Retardo (ps)	Consumo estático (nW)	Consumo dinámico (nW/MHz)
	6	11.9808	181	86	13912
	8	12.9024	204	89	13290
	12	15.6672	221	109	13982
	10	11.9808	238	63	10662
	8	12.9024	174	98	10666

Aspectos tecnológicos

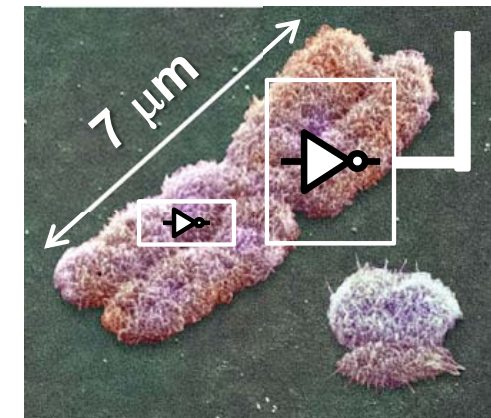
Biblioteca de celdas: CMOS 90 nm



fuelle: Learn.Genetics (UTAH Univ.)



virus de gripe
vs. interconexión



- **Área de un inversor:** $6.4512 \mu\text{m}^2$ (CMOS 90 nm), $1.27072 \mu\text{m}^2$ (CMOS 32 nm)
 - Área de un glóbulo rojo ($\varnothing 8\mu\text{m}$): $50.26 \mu\text{m}^2$
- **Anchura de una interconexión:** 140 nm
 - Longitud de un cromosoma X: 7000 nm, diámetro de un virus de gripe: 130 nm
- **Retardo medio de un inversor:** 100 ps (CMOS 90 nm), 38 ps (CMOS 32 nm)
 - La luz en 100 ps recorre 3 cm
- **Consumo de un inversor:** 670 nW (CMOS 90 nm, conmutando a 1 MHz)
 - Una pila alcalina AA (2890 mAh) alimentando al inversor duraría 740 años

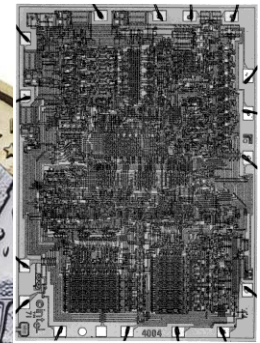
Aspectos tecnológicos

Evolución tecnológica

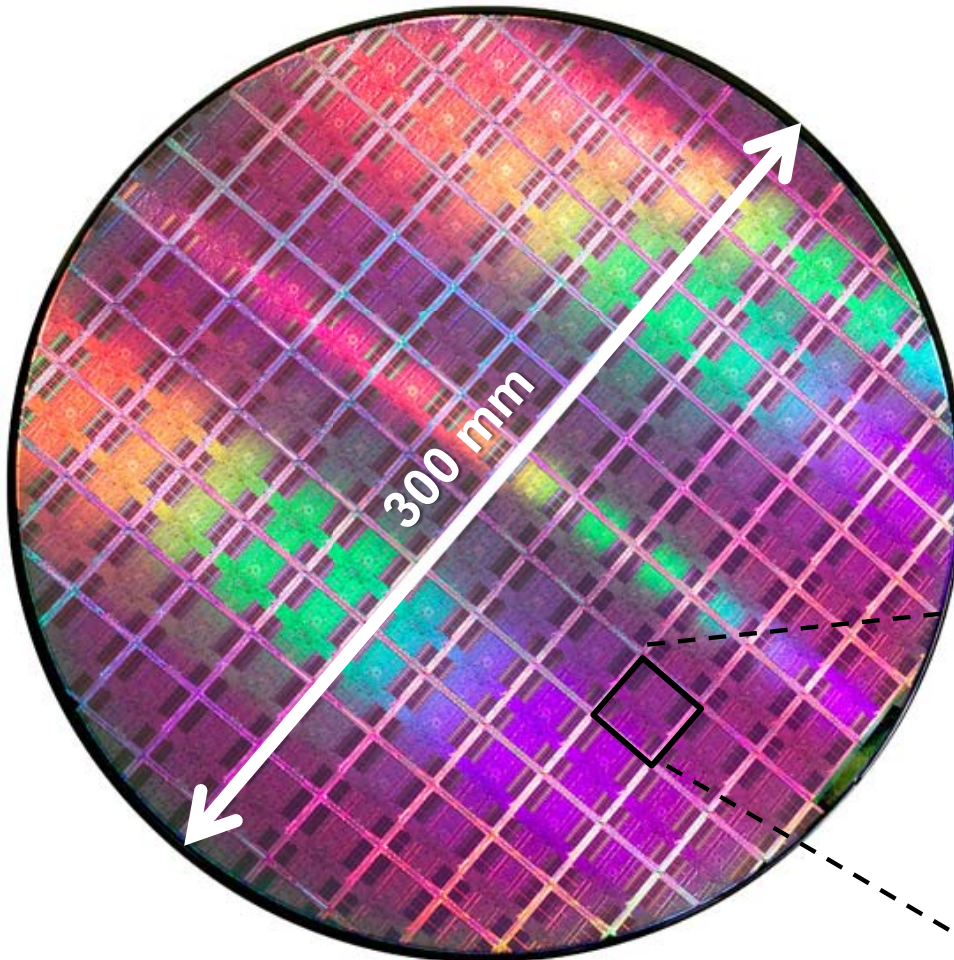


Intel 4004 (1971)

2.300 transistores
(full custom, MOSFET 10 μm)

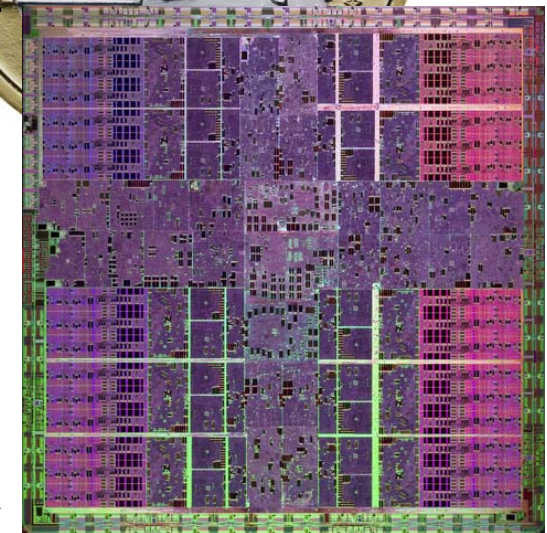


fuentes: NVIDIA, INTEL



NVIDIA GT200 GPU (2008)

1.400.000.000 transistores
(standard cells, CMOS 65 nm)



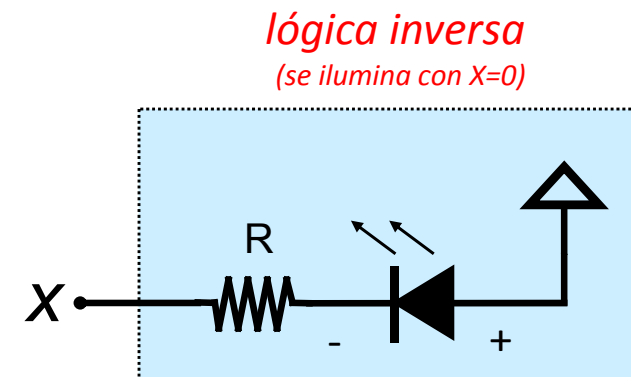
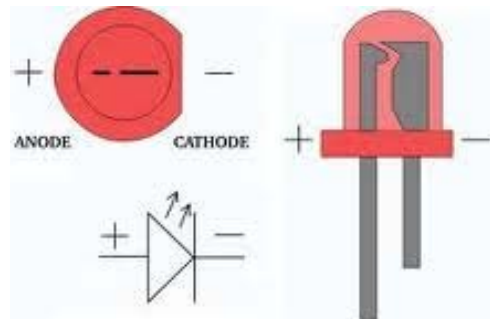
24 mm

24 mm

Aspectos tecnológicos

Entrada/salida elemental

- Un **LED** (Light-Emitting Diode) es el dispositivo más simple por el que un sistema digital puede mostrar su estado.
 - Típicamente se ilumina cuando entre cátodo (-) y ánodo (+) hay una diferencia de potencial superior a 1.7 V.
 - La máxima luminosidad se consigue cuando por él circula una intensidad de entre 10 y 20 mA.
 - Se conecta a un puerto de salida de un circuito a través de una **resistencia limitadora**.



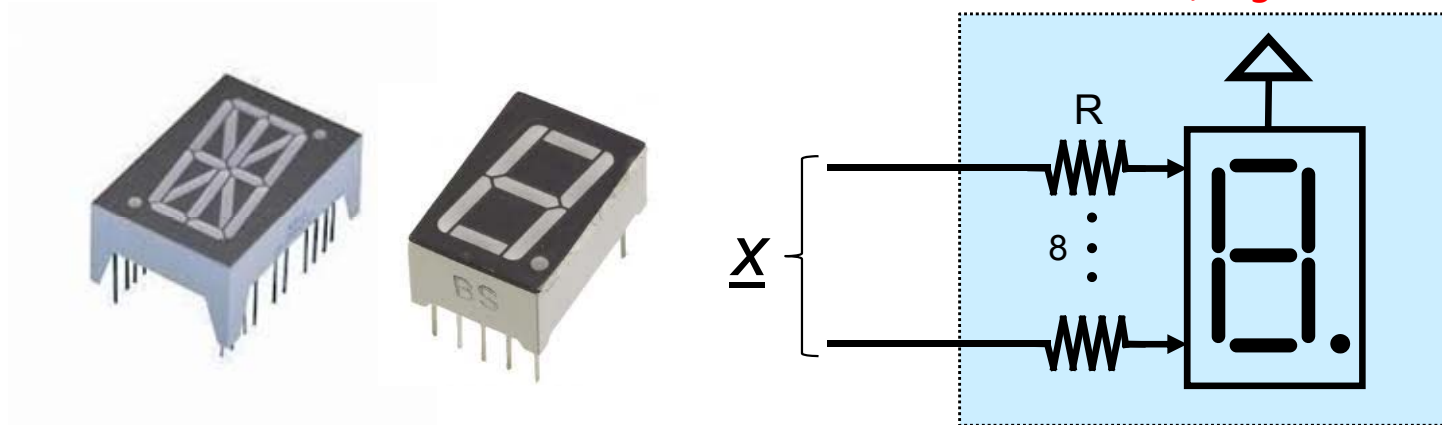
$$R \text{ (TTL)} = (5V - 1.7V) / 10 \text{ mA} = 330 \Omega$$

Aspectos tecnológicos

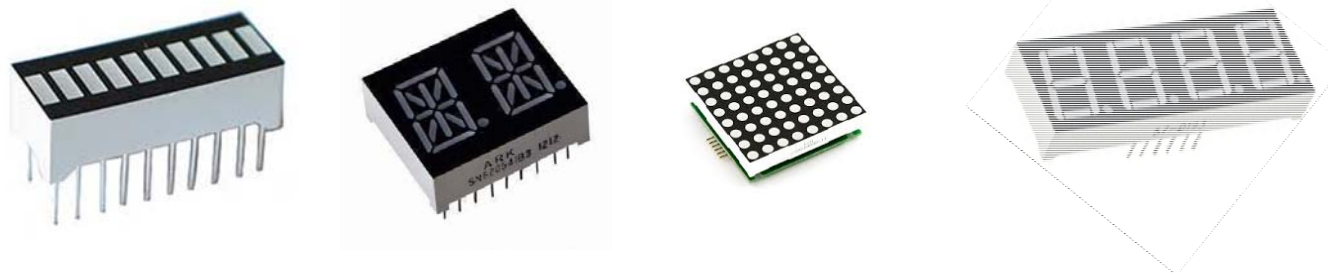
Entrada/salida elemental

- Un **display 7-segmentos** es un banco de 7/8/9 leds que comparten uno de los terminales.
 - Cada led debe disponer de su propia **resistencia limitadora**.

ánodo común, lógica inversa



- Existen un gran número de displays basados en leds





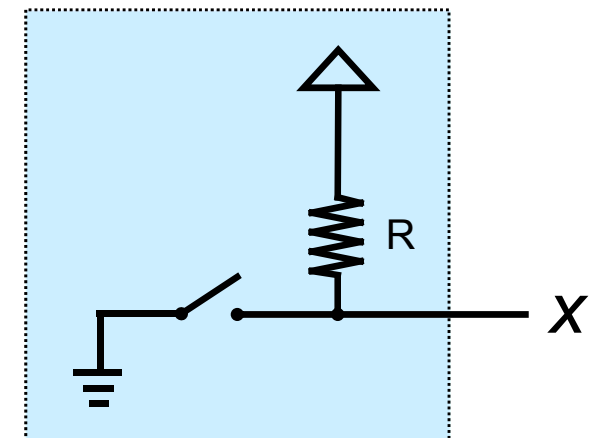
Aspectos tecnológicos

Entrada/salida elemental

- Un **switch/pulsador** es el dispositivo más simple por el que introducir datos a un sistema digital.
 - Se conecta a un puerto de entrada de un circuito a través de una **resistencia de pull-up (o pull-down)**
 - Asegura un nivel lógico por defecto cuando no hay pulsación.
 - Evita el cortocircuito se crearía en su ausencia cuando hay pulsación.
 - Debe ser alta para limitar la corriente que circula por el pulsador (y así reducir el consumo) cuando este se cierra.



lógica inversa
(al pulsar, X=0)



$$R \geq 10 \text{ K}\Omega$$

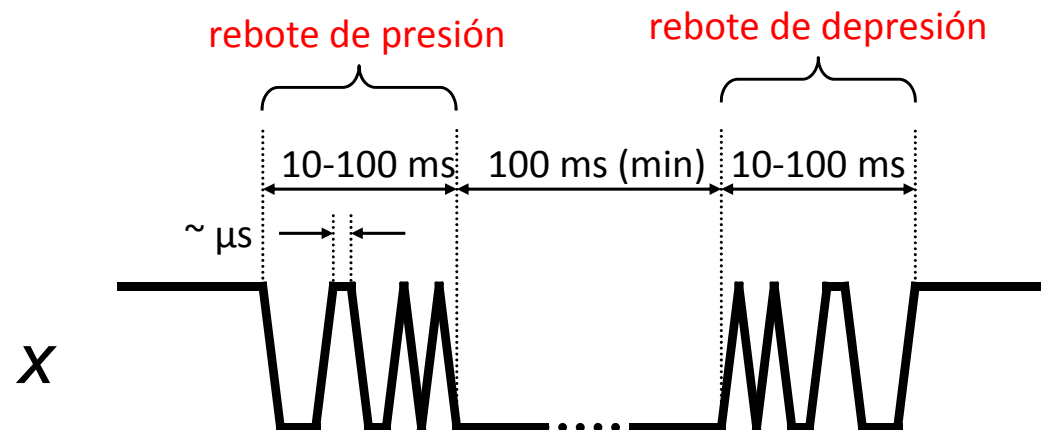
$$I (\text{TTL}) = 5 \text{ V} / 10 \text{ K}\Omega = 0.5 \text{ mA}$$



Aspectos tecnológicos

Entrada/salida elemental

- No obstante, cuando un sistema digital lee el estado de un interruptor encuentra los siguientes problemas:
 - Cada cambio de estado del interruptor, genera un vaivén transitorio en la señal de entrada (**rebote**).
 - Una pulsación puede interpretarse erróneamente como una serie de ellas
 - Los cambios de estado del interruptor son **asíncronos**.



- Por ello, los sistemas digitales incorporan mecanismos de **sincronización** y **filtrado de rebotes** en sus entradas externas.



Trade-offs

- El diseño digital es un **proceso de ingeniería**:
 - Debe elegirse el **mejor circuito posible** que realice una función.
 - Pero ... ¿cuál es el mejor cuando infinitas hacen lo mismo?
- Las **métricas de calidad** permiten tomar la decisión:
 - Coste, velocidad, consumo, robustez, reusabilidad, time-to-market...
 - Dado que la mejora en una métrica afecta al resto, hay que llegar a un compromiso (**trade-off**).
 - por ejemplo, típicamente una mejora en velocidad implica un aumento del coste
 - La importancia relativa de las mismas varía en cada producto.
 - por ejemplo, una misma funcionalidad se implementará de forma distinta si se integra en una lavadora o si lo hace en un satélite
- El conjunto de implementaciones posibles de una misma especificación se denomina **espacio de diseño**
 - el diseño digital es un problema de **optimización multi-objetivo**



Trade-offs

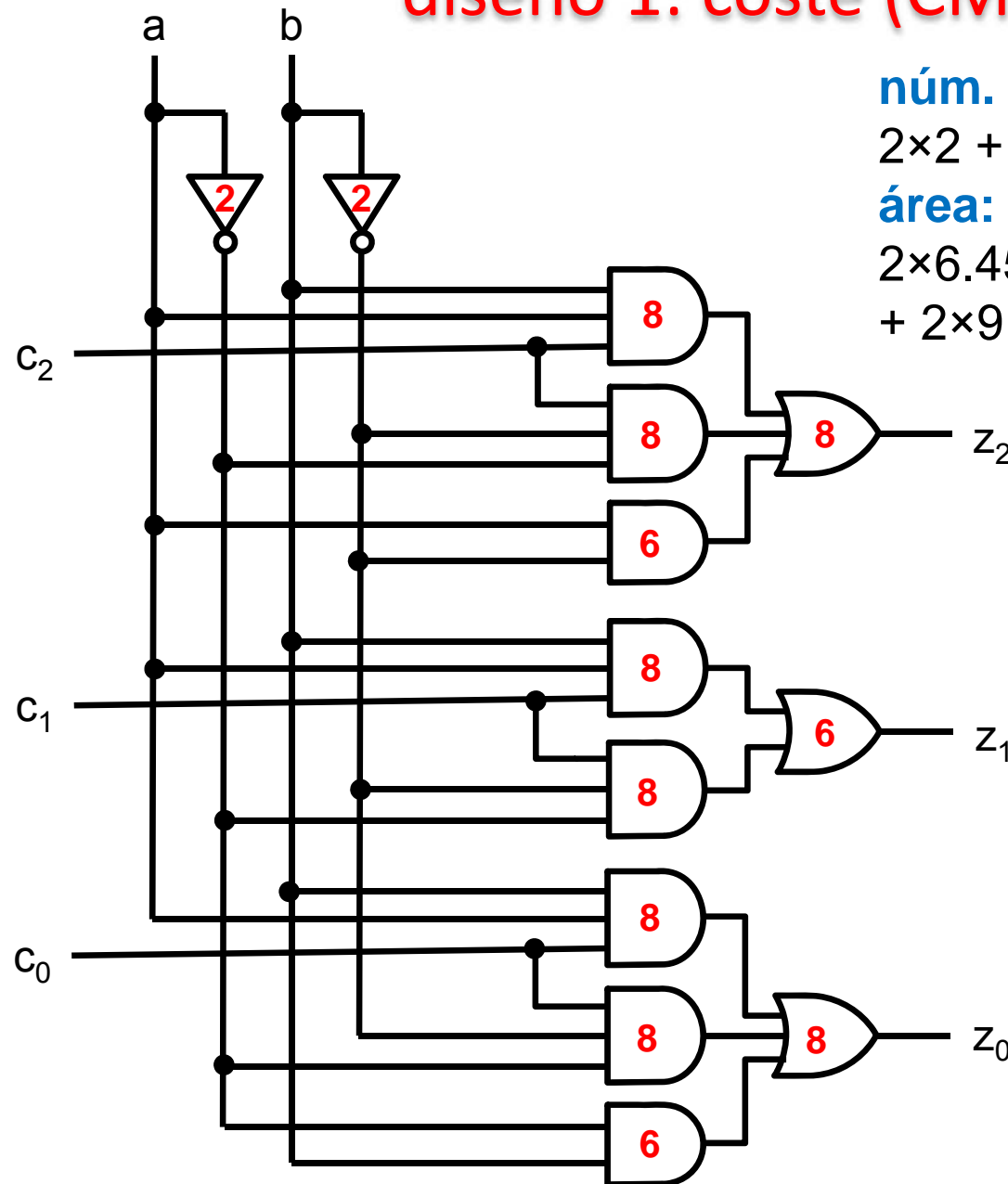
diseño 1: coste (CMOS 90 nm)

núm. transistores:

$$2 \times 2 + 6 \times 8 + 2 \times 6 + 2 \times 8 + 1 \times 6 = 86$$

área:

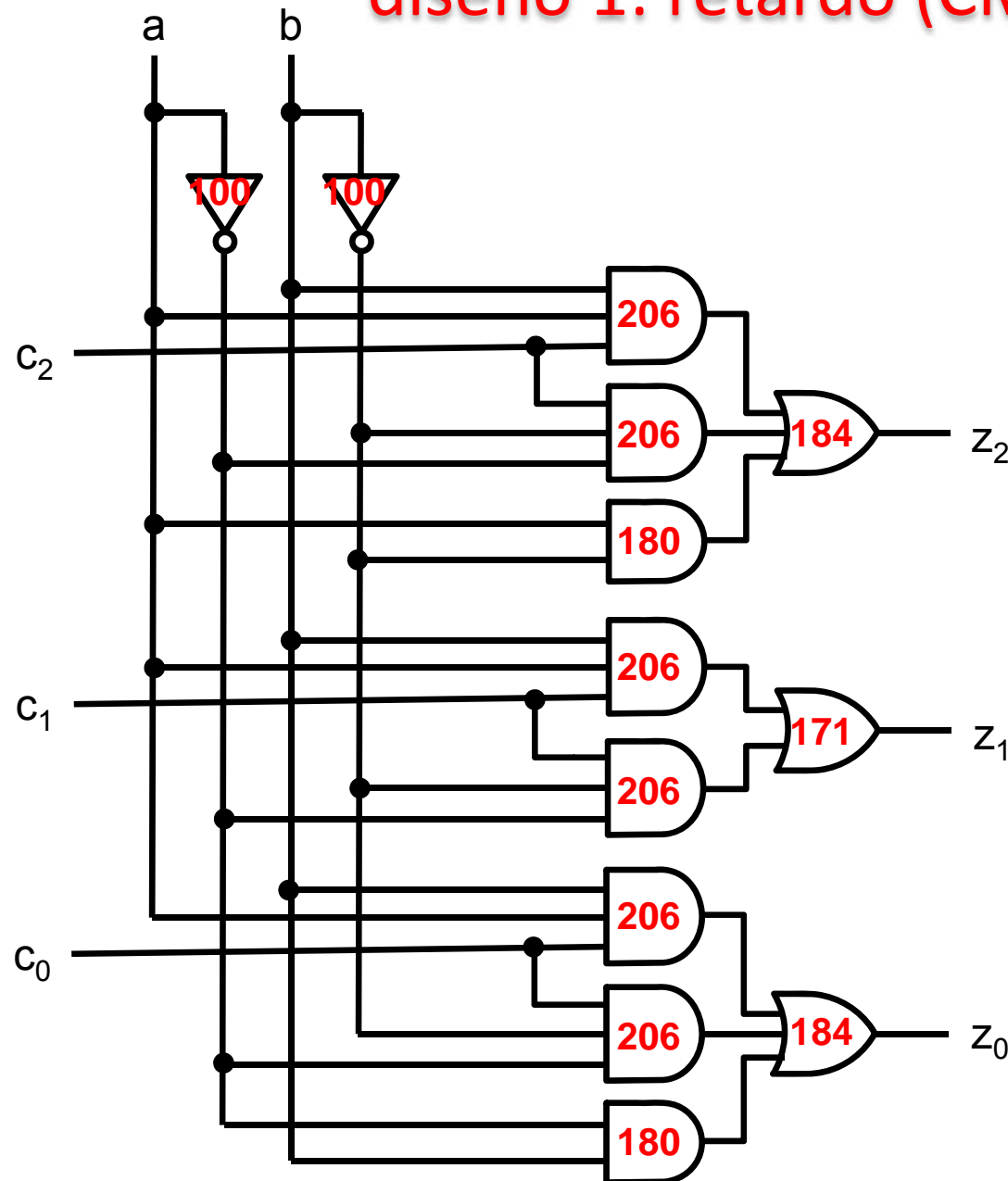
$$2 \times 6.4512 + 6 \times 8.2944 + 2 \times 7.3728 + 2 \times 9.2160 + 1 \times 7.3728 = 103.2 \mu\text{m}^2$$





Trade-offs

diseño 1: retardo (CMOS 90 nm)



$$t_d = 100 + 206 + 184 = 490 \text{ ps}$$

$$t_c = 180 + 184 = 364 \text{ ps}$$

$$t_d = 100 + 206 + 171 = 477 \text{ ps}$$

$$t_c = 206 + 171 = 377 \text{ ps}$$

$$t_d = 100 + 206 + 184 = 490 \text{ ps}$$

$$t_c = 180 + 184 = 364 \text{ ps}$$



Trade-offs

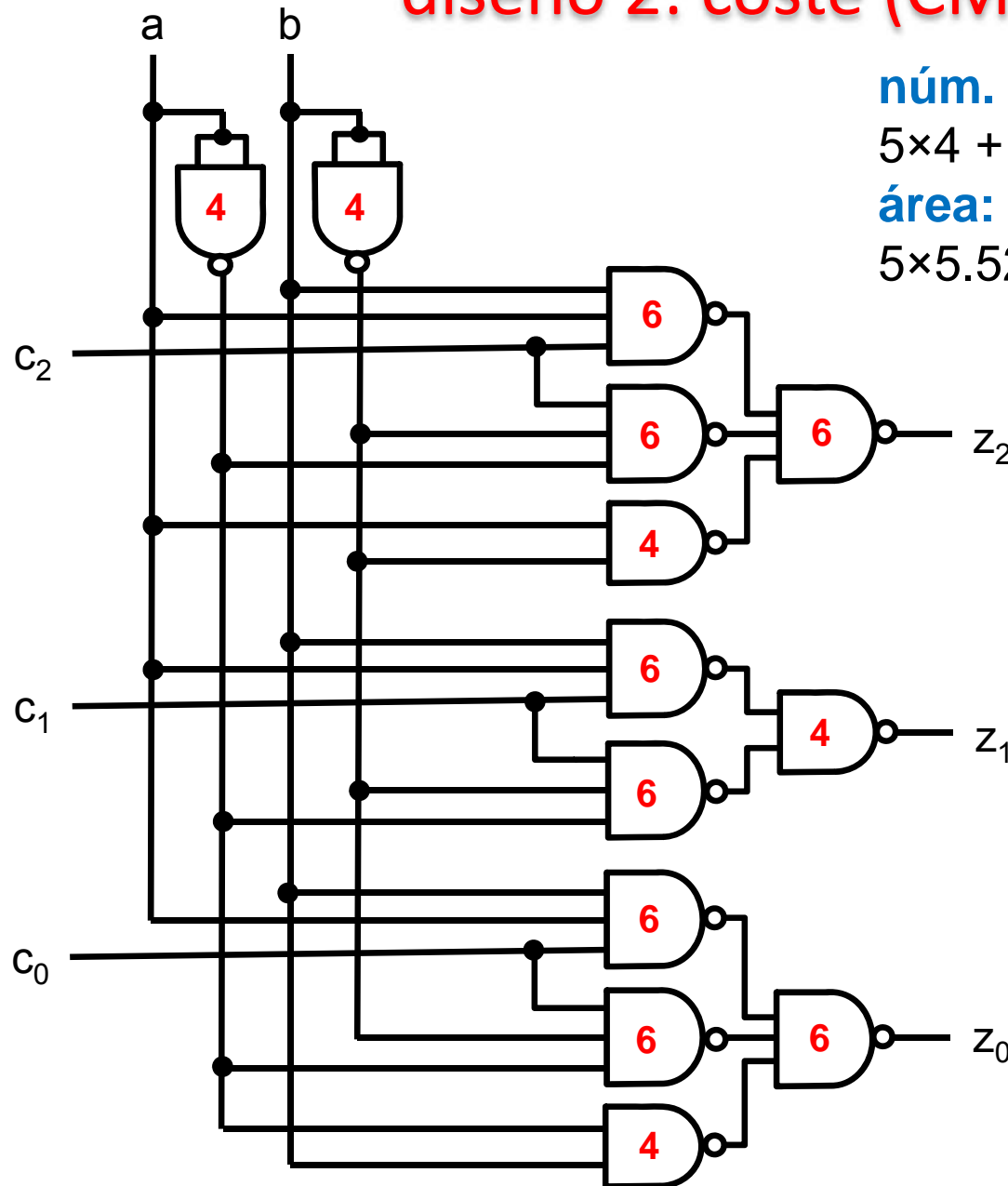
diseño 2: coste (CMOS 90 nm)

núm. transistores:

$$5 \times 4 + 8 \times 6 = 68$$

área:

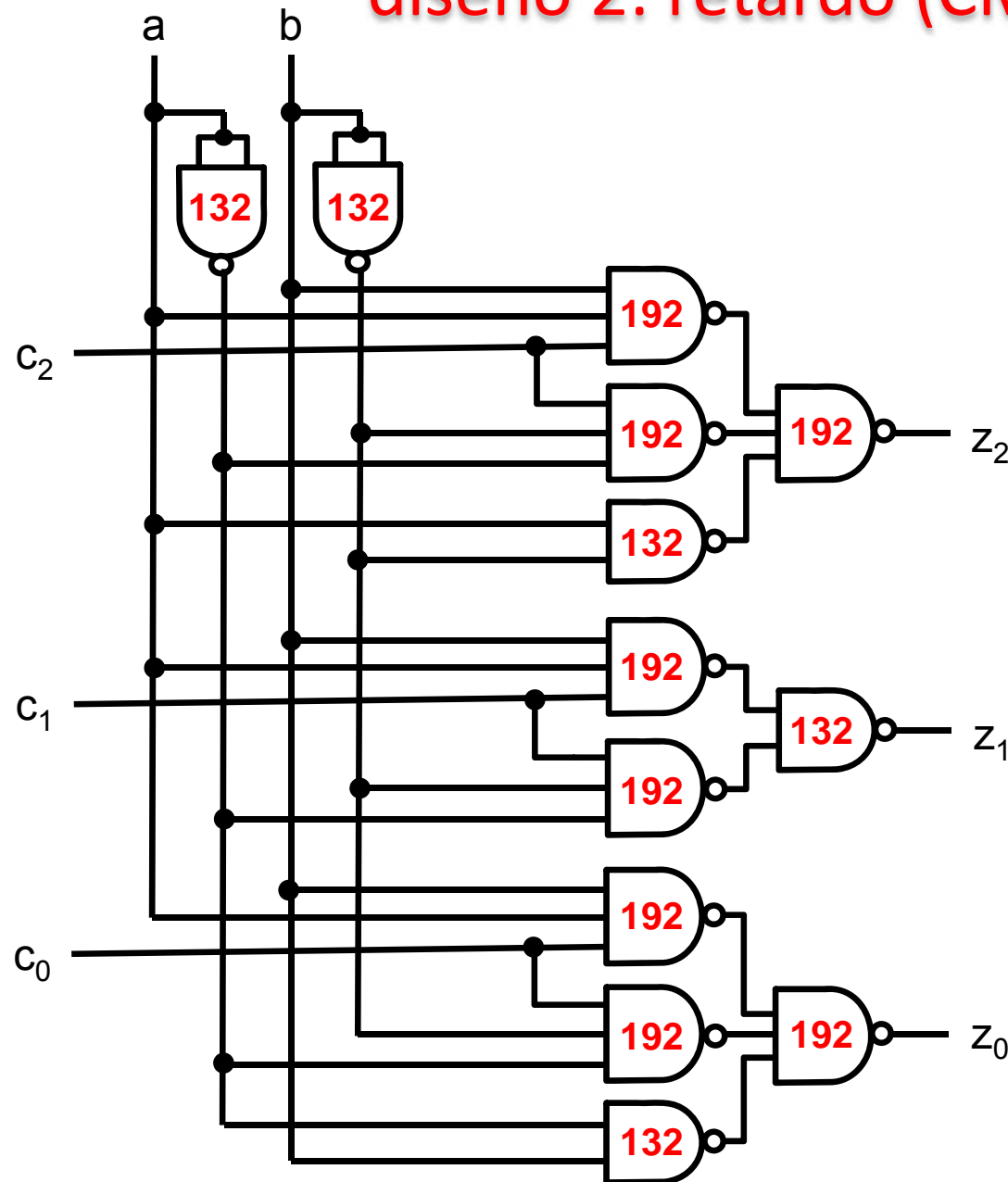
$$5 \times 5.5296 + 8 \times 11.9808 = 123.3 \mu\text{m}^2$$





Trade-offs

diseño 2: retardo (CMOS 90 nm)



$$t_d = 132 + 192 + 192 = 516 \text{ ps}$$

$$t_c = 132 + 192 = 324 \text{ ps}$$

$$t_d = 132 + 192 + 132 = 456 \text{ ps}$$

$$t_c = 192 + 132 = 324 \text{ ps}$$

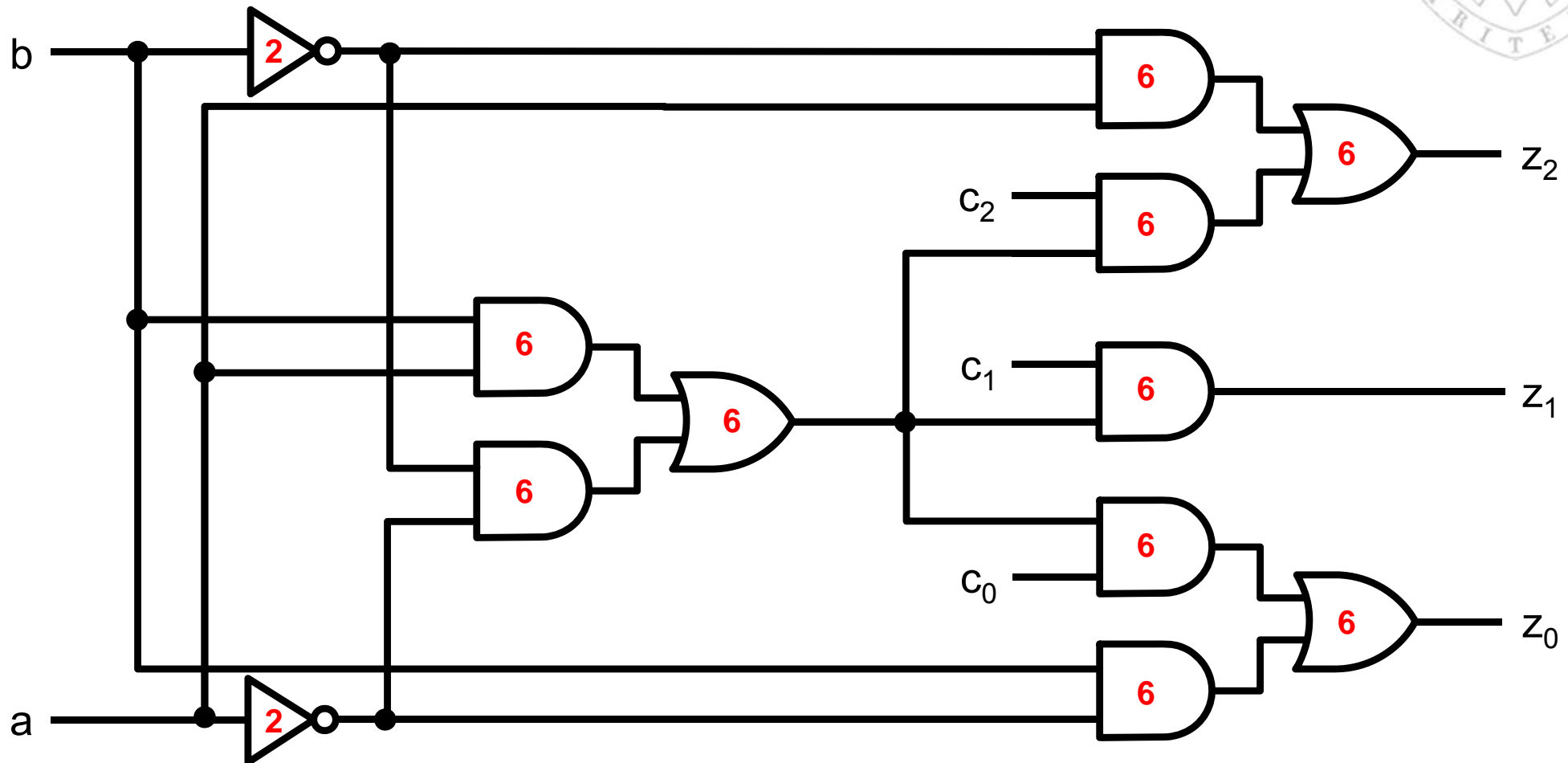
$$t_d = 132 + 192 + 192 = 516 \text{ ps}$$

$$t_c = 132 + 192 = 324 \text{ ps}$$



Trade-offs

diseño 3: coste (CMOS 90 nm)



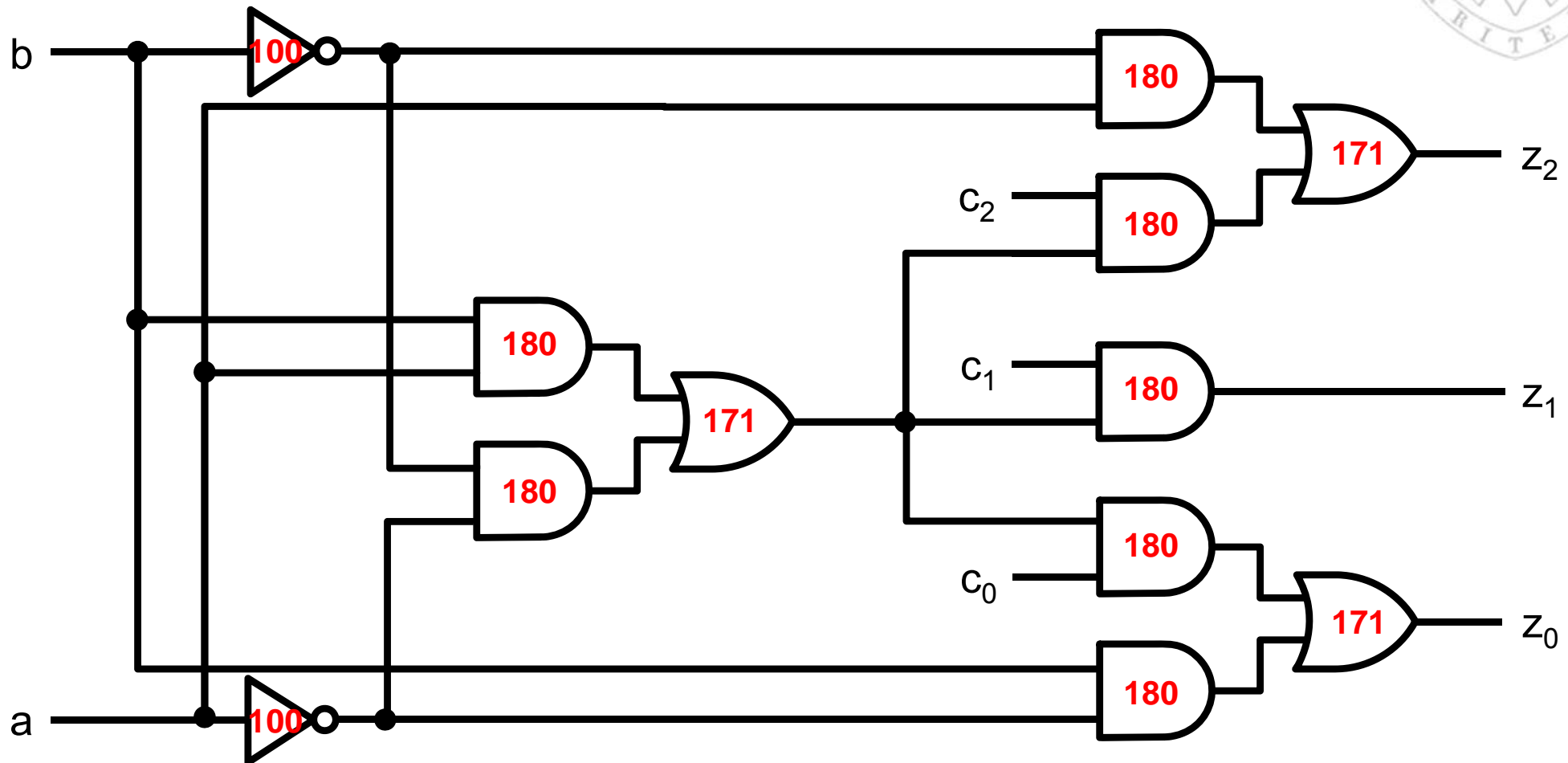
núm. transistores: $7 \times 6 + 3 \times 6 + 2 \times 2 = 64$

área: $7 \times 7.3728 + 3 \times 7.3728 + 2 \times 6.4512 = 86.63 \mu\text{m}^2$



Trade-offs

diseño 3: retardo (CMOS 90 nm)



$$z_2: t_d = 100 + 180 + 171 + 180 + 171 = 802 \text{ ps}$$

$$t_c = 180 + 171 = 315 \text{ ps}$$

$$z_1: t_d = 100 + 180 + 171 + 180 = 631 \text{ ps}$$

$$t_c = 180 \text{ ps}$$

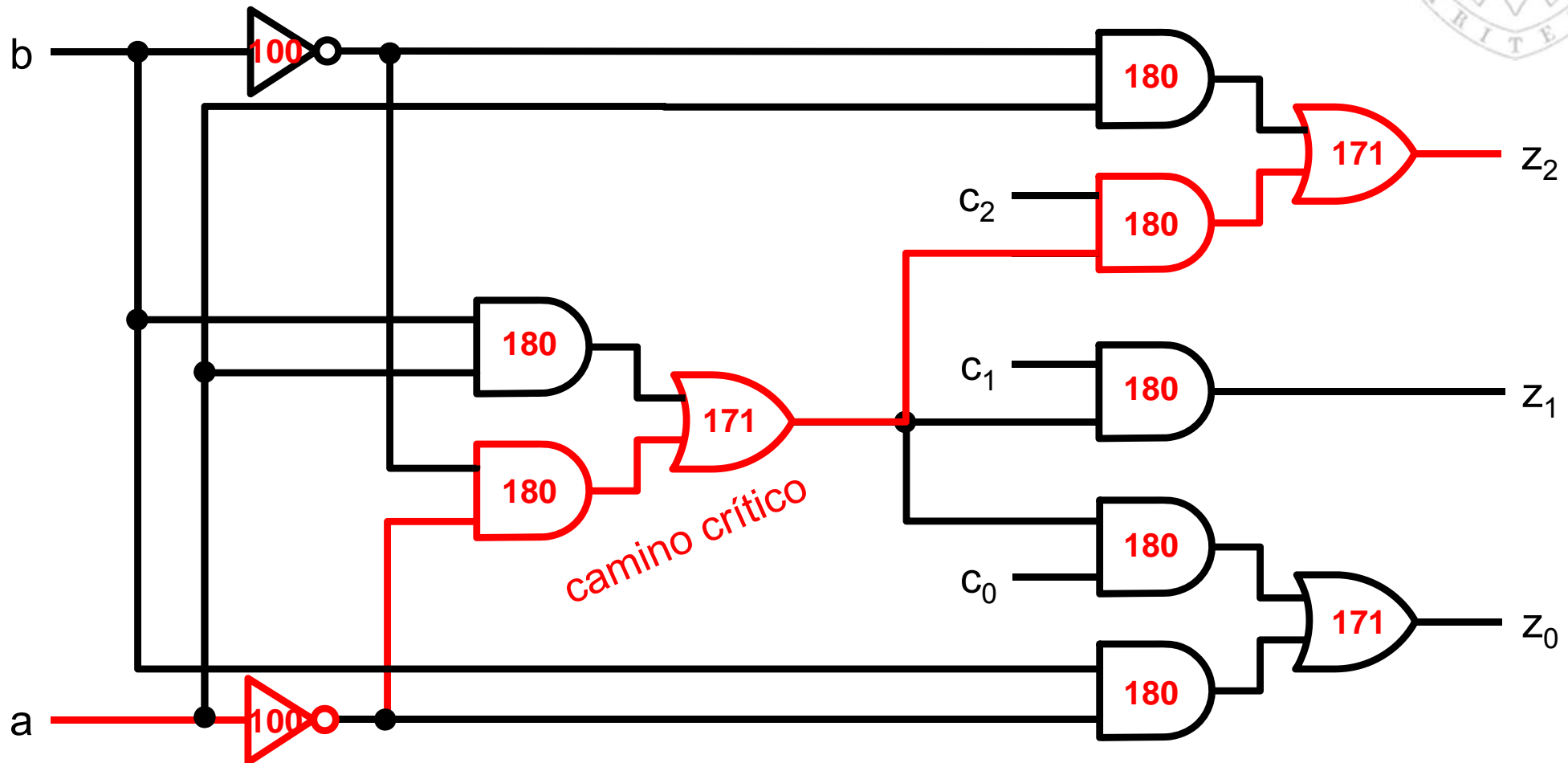
$$z_0: t_d = 100 + 180 + 171 + 180 + 171 = 802 \text{ ps}$$

$$t_c = 180 + 171 = 315 \text{ ps}$$



Trade-offs

diseño 3: retardo (CMOS 90 nm)



$$Z_2: t_d = 100 + 180 + 171 + 180 + 171 = \mathbf{802 \text{ ps}}$$

$$t_c = 180 + 171 = \mathbf{315 \text{ ps}}$$

$$Z_1: t_d = 100 + 180 + 171 + 180 = \mathbf{631 \text{ ps}}$$

$$t_c = \mathbf{180 \text{ ps}}$$

$$Z_0: t_d = 100 + 180 + 171 + 180 + 171 = \mathbf{802 \text{ ps}}$$

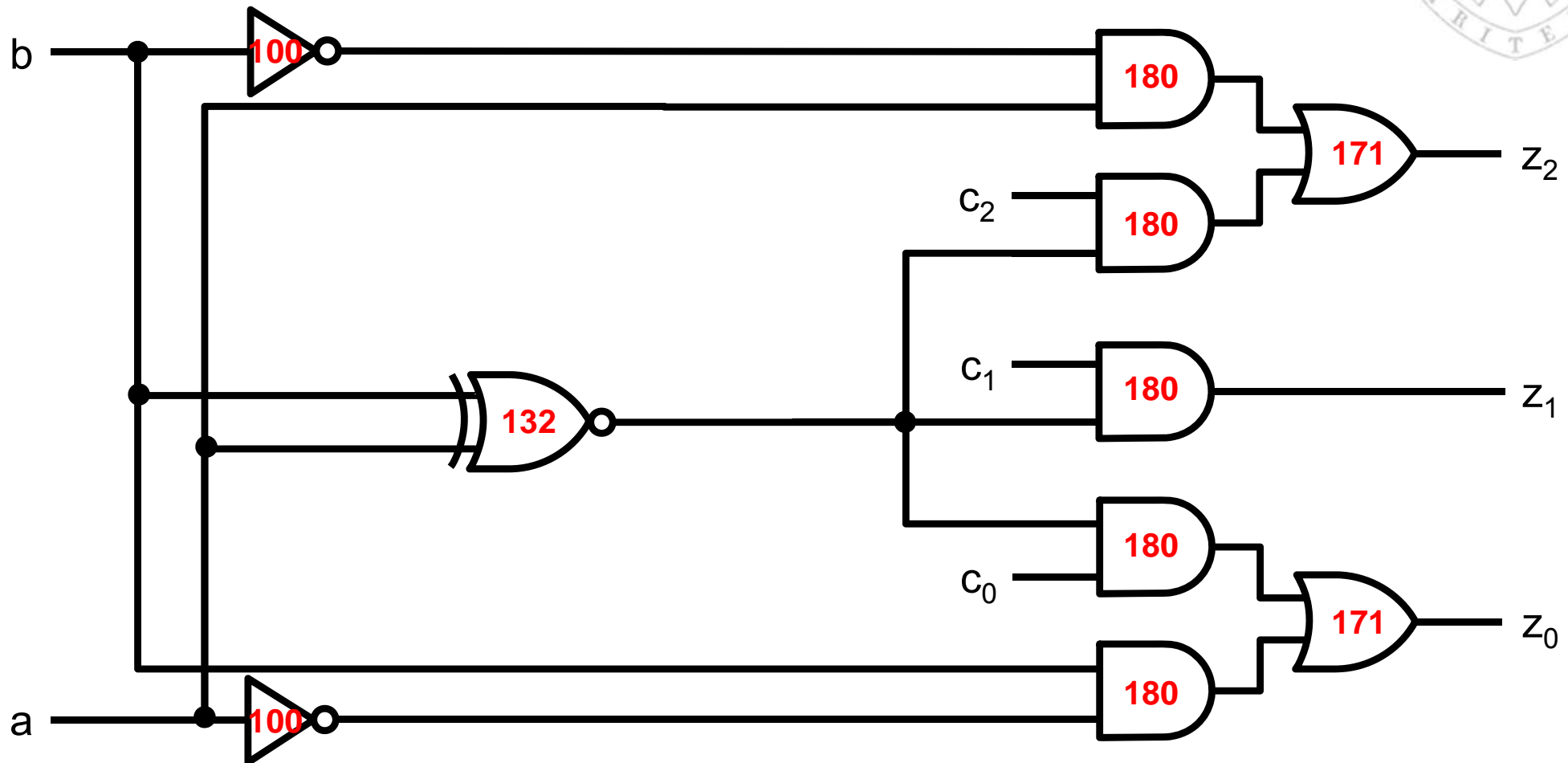
$$t_c = 180 + 171 = \mathbf{315 \text{ ps}}$$

diseño 4: coste (CMOS 90 nm)



Trade-offs

diseño 4: retardo (CMOS 90 nm)



$$z_2: t_d = 100 + 180 + 171 = 451 \text{ ps}$$

$$z_1: t_d = 132 + 180 = 312 \text{ ps}$$

$$z_0: t_d = 100 + 180 + 171 = 451 \text{ ps}$$

$$t_c = 180 + 171 = 315 \text{ ps}$$

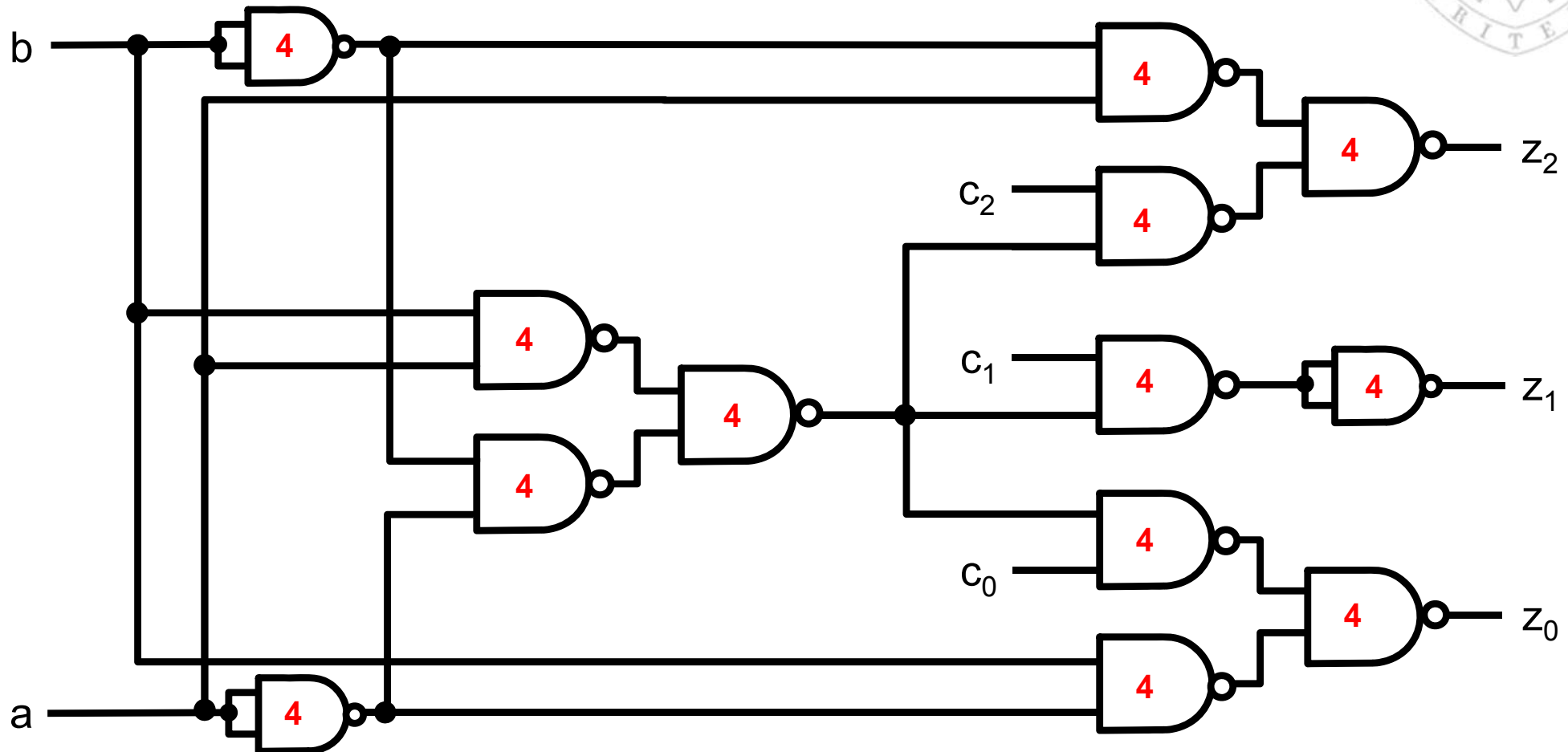
$$t_c = 180 \text{ ps}$$

$$t_c = 180 + 171 = 315 \text{ ps}$$



Trade-offs

diseño 5: coste (CMOS 90 nm)



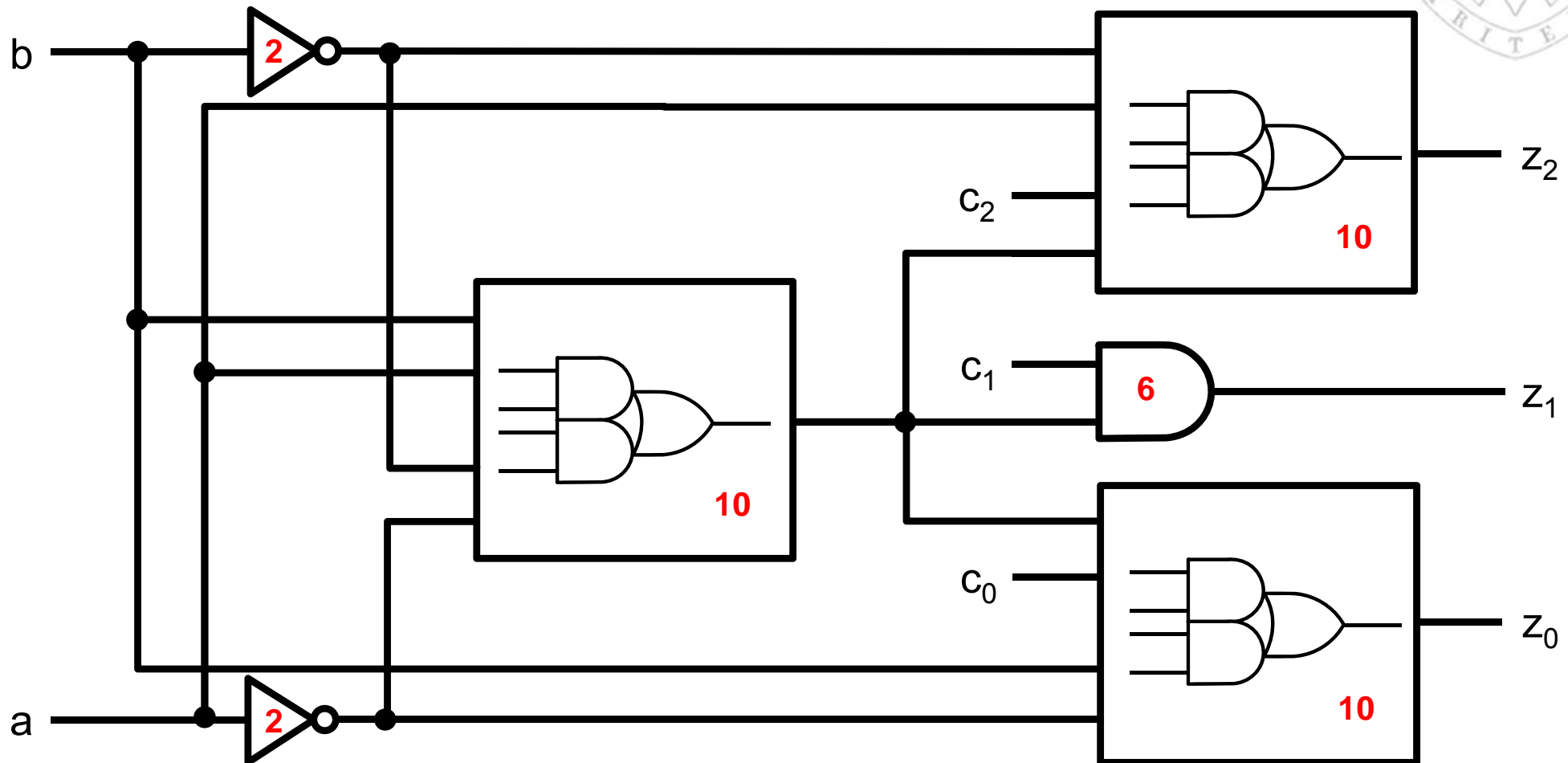
núm. transistores: $13 \times 4 = 52$

área: $13 \times 5.5296 = 71.88 \mu\text{m}^2$



Trade-offs

diseño 6: coste (CMOS 90 nm)



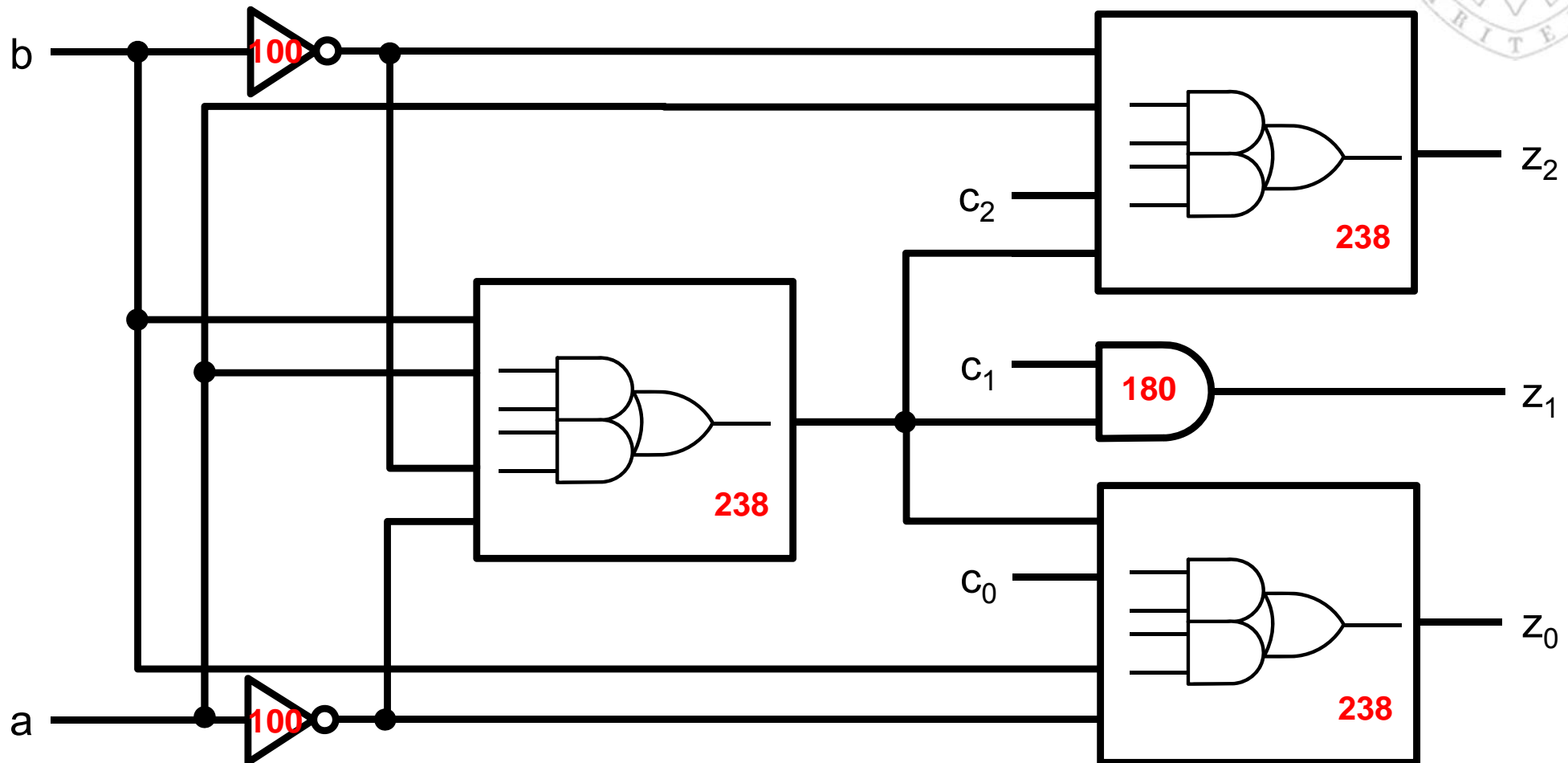
núm. transistores: $3 \times 10 + 6 + 2 \times 2 = 40$

área: $3 \times 11.9808 + 7.3728 + 2 \times 6.4512 = 56.22 \mu\text{m}^2$



Trade-offs

diseño 6: retardo (CMOS 90 nm)



$$z_2: t_d = 100 + 238 + 238 = 576 \text{ ps}$$

$$t_c = 238 \text{ ps}$$

$$z_1: t_d = 100 + 238 + 180 = 518 \text{ ps}$$

$$t_c = 180 \text{ ps}$$

$$z_0: t_d = 100 + 238 + 238 = 576 \text{ ps}$$

$$t_c = 238 \text{ ps}$$



Trade-offs

Espacio de diseño (CMOS 90 nm)

