

EA075

Memória



Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Prof. Rafael Ferrari

(Documento baseado nas notas de aula do Prof. Levy Boccato)

Introdução

- A funcionalidade de qualquer sistema embarcado é caracterizada por três aspectos básicos:
 - Processamento;
 - Armazenamento;
 - Comunicação.
- **Processador:** responsável por coordenar o comportamento do sistema. Em suma, é quem promove a manipulação (transformação) dos dados.
- **Possibilidades vistas:**
 - Processadores dedicados;
 - Processadores de propósito geral;
 - Periféricos.

Introdução

- **Armazenamento:**

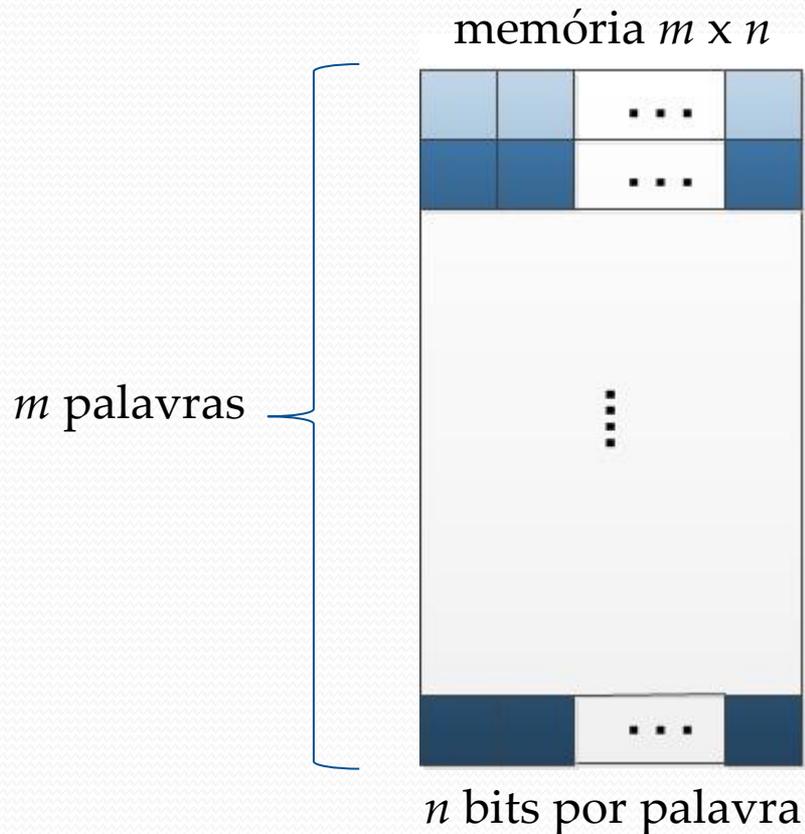
- Unidades de memória servem como depósito de informações para uso posterior.

- **Comunicação:**

- Entram em cena questões relativas aos barramentos (endereço, dados e controle) e também sobre protocolos de comunicações (serial, paralela, sem fio).

Conceitos básicos

- Capacidade:



- Preciso de $\log_2 m$ bits de endereçamento para referenciar uma palavra da memória.
- Palavras de n bits podem ser lidas ou inseridas na memória.

Conceitos básicos

- **Definições:**

- **Densidade:** quantidade de bits por área.
- **Tempo de acesso:** intervalo de tempo entre o recebimento de um endereço de entrada e a liberação do dado desejado na saída da memória.
- **Memória volátil:** requer a manutenção de uma fonte de alimentação para que os dados (bits) continuem a ser armazenados. Quando a alimentação é retirada, os dados são perdidos.
- **Memória dinâmica:** os dados não ficam armazenados mesmo com a presença de uma fonte de alimentação; é necessário atualizar (reescrever, i.e., efetuar um *refresh*) periodicamente o conteúdo da memória.
- **Memória programável no sistema (*in-system*):** permite que um processador presente no sistema embarcado escreva dados.

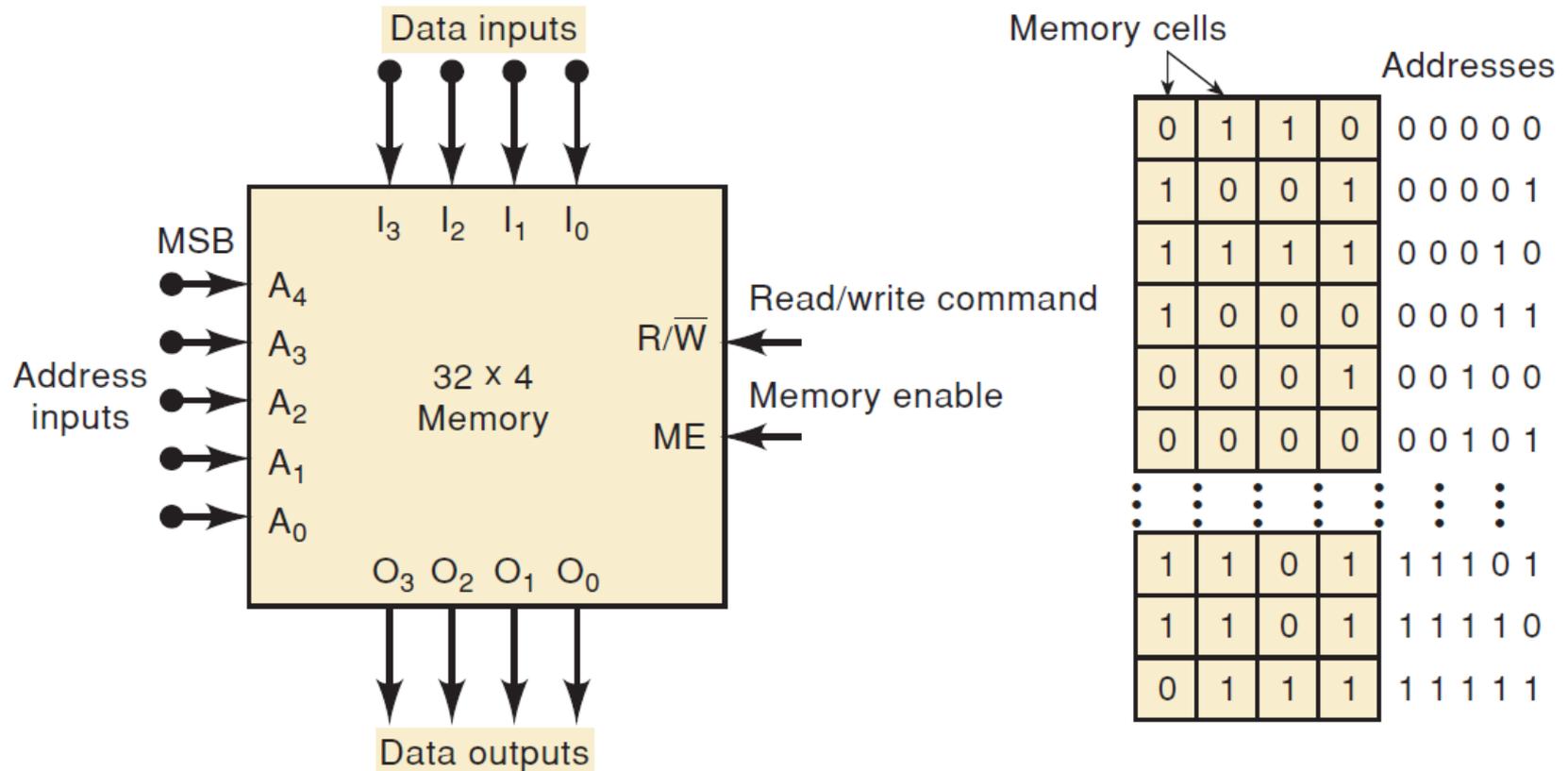
Conceitos básicos

- **Definições:**

- **SAM** (*sequential access memory*): o tempo de acesso varia com a posição que se deseja acessar. Para chegar na posição i (partindo do início), é preciso sequenciar através de todas as posições de memória anteriores a i .
 - **Exemplos:** fita magnética, memória de vídeo, DVDs.
- **RAM** (*random access memory*): o endereço físico de uma palavra na memória não afeta o tempo necessário para ler ou escrever naquela posição. Em outras palavras, o tempo de acesso é constante e independe do endereço.
- **RWM** (*read/write memory*): dispositivo que permite operações de leitura e escrita com a mesma facilidade.
- **ROM** (*read-only memory*): dispositivo em que operações de leitura são feitas de forma mais frequente e mais simples que operações de escrita.

Conceitos básicos

- Exemplo:



Conceitos básicos

- A distinção entre memórias ROM e RAM tem se tornado cada vez menos nítida devido às novas tecnologias empregadas na construção dos dispositivos.
- **Propriedades:**
 - **Habilidade ou facilidade de escrita:** refere-se ao modo e à velocidade com que uma memória permite / realiza uma operação de escrita.
 - **Possibilidades:**
 - De fácil escrita – basta fornecer o dado e o endereço, junto com sinais de controle.
 - De média facilidade – um pouco mais lentas.
 - Memórias que só podem ser escritas com o auxílio de um “*programmer*”, i.e., um dispositivo especial que aplica níveis de tensão específicos para escrever (queimar) a memória.
 - Memórias cujo conteúdo binário é determinado quando o próprio *chip* está sendo fabricado.

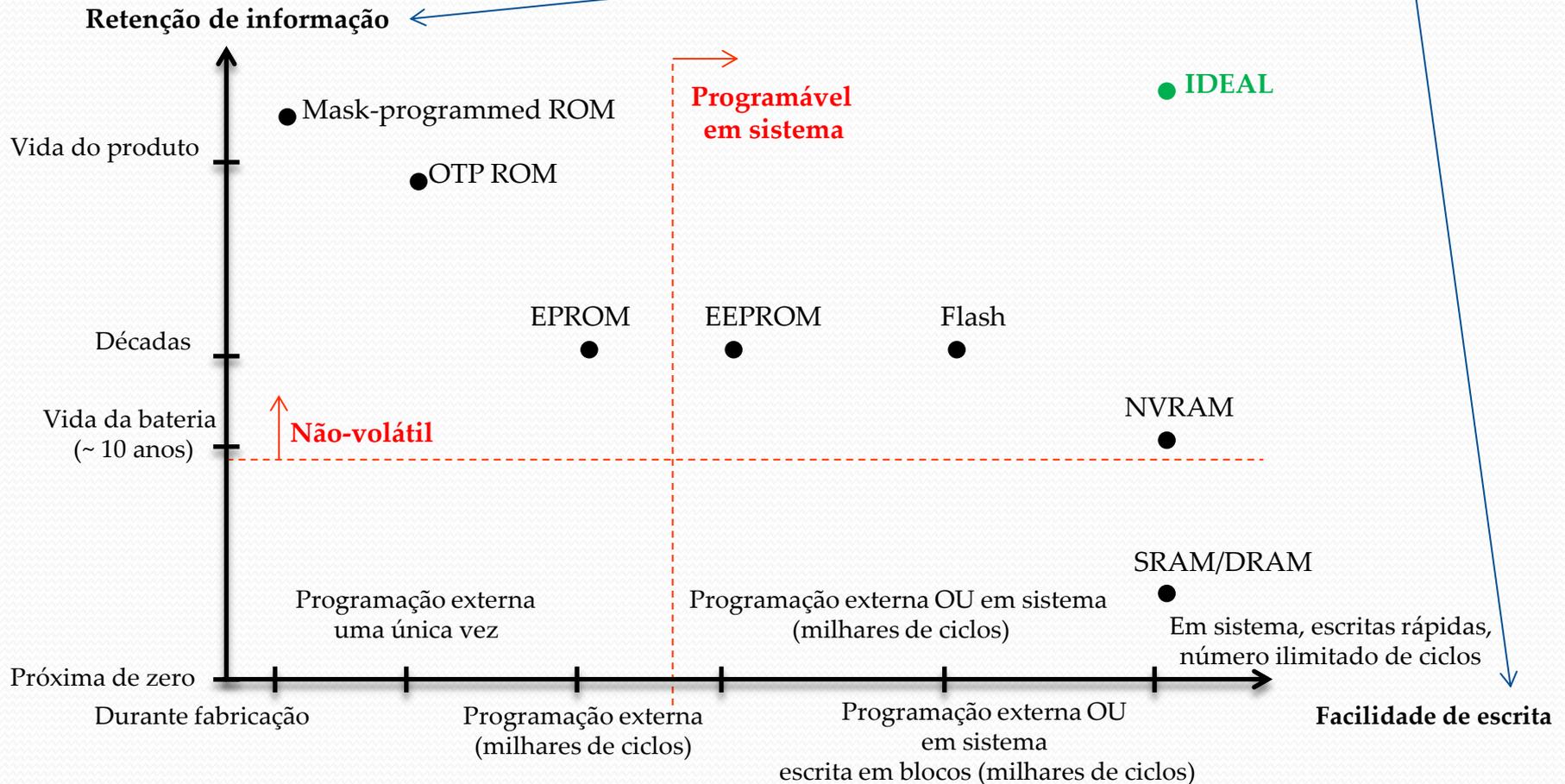
Conceitos básicos

- A distinção entre memórias ROM e RAM tem se tornado cada vez menos nítida devido às novas tecnologias empregadas na construção dos dispositivos.
- **Propriedades:**
 - **Retenção de informação:** refere-se à habilidade de a memória reter (preservar) os bits armazenados após eles serem escritos.
 - **Possibilidades:**
 - Máxima – essencialmente, nunca perde os bits armazenados.
 - Média – retém os bits por dias, meses ou anos após a fonte de energia ser desligada.
 - Baixa – armazena os bits somente enquanto houver fornecimento de energia.
 - Mínima – os bits começam a desaparecer pouco depois de terem sido escritos na memória, mesmo que haja fonte de energia.

Conceitos básicos

- **Panorama:**

Métricas que competem entre si (contraditórias)

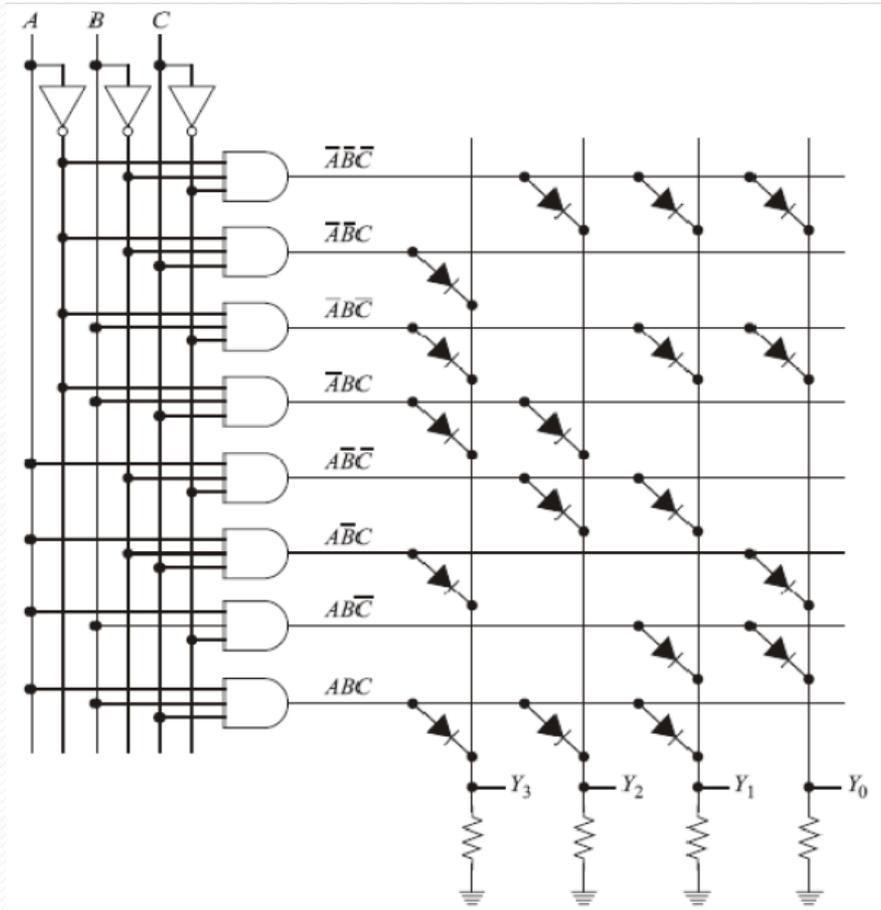


Memórias ROM

- Memórias **não-voláteis** utilizadas para guardar informações que – de modo geral – não devem mudar durante a operação normal do sistema.
- Podem ser lidas pelo processador do sistema embarcado, mas geralmente não permitem operações de escrita.
- O mecanismo de definição dos bits armazenados na ROM é geralmente feito de forma *offline*, antes que ela seja inserida no sistema embarcado.
- Os tipos de memória ROM possuem diferentes facilidades de escrita (as mais recentes, a rigor, nem poderiam ser chamadas de ROM) e alta retenção de informação.
- Aplicações:
 - Armazenamento de programas;
 - Armazenamento de constantes e tabelas;
 - Implementação de circuitos combinacionais.

Memórias ROM

- Exemplo: ROM de diodos.



A	B	C	Y3	Y2	Y1	Y0
0	0	0	0	1	1	1
0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	0	1	1
0	1	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	0

Memórias ROM

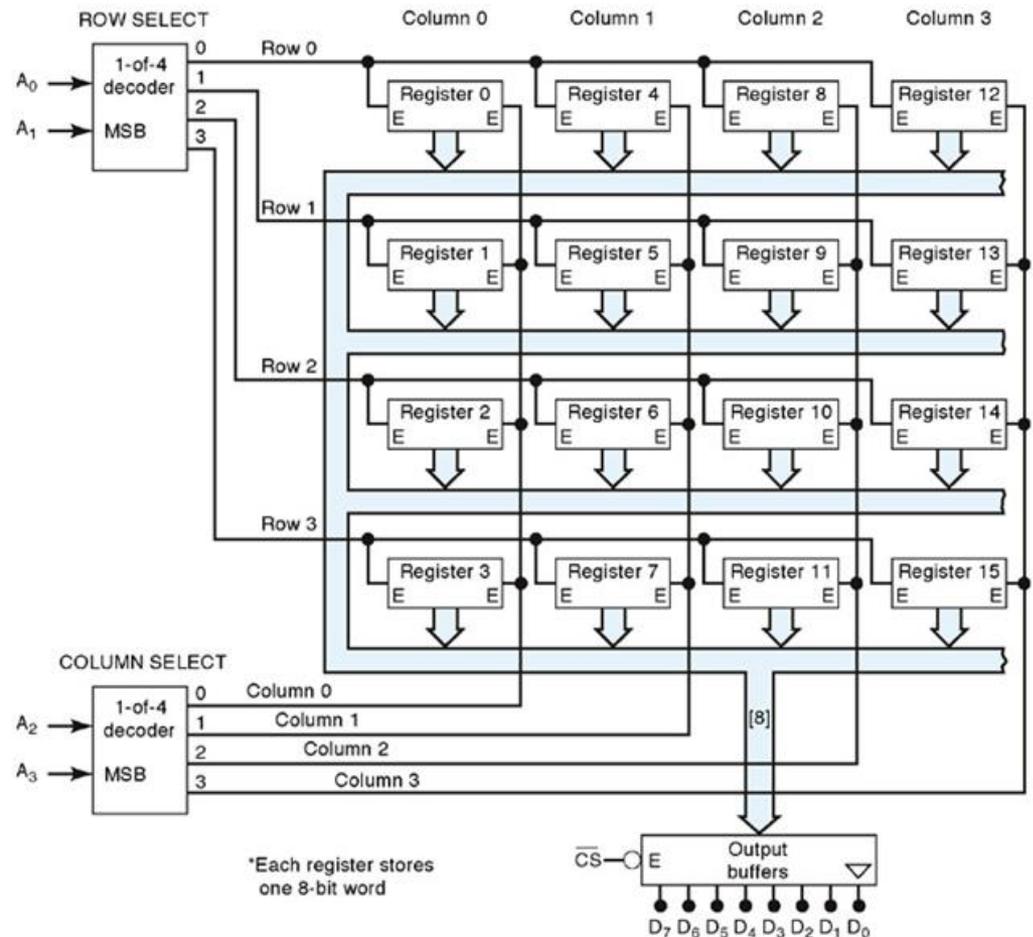
- Organização interna (simplificada)

Exemplo: ROM 16 x 8

✓ O endereço é decodificado em um índice de linha e um índice de coluna.

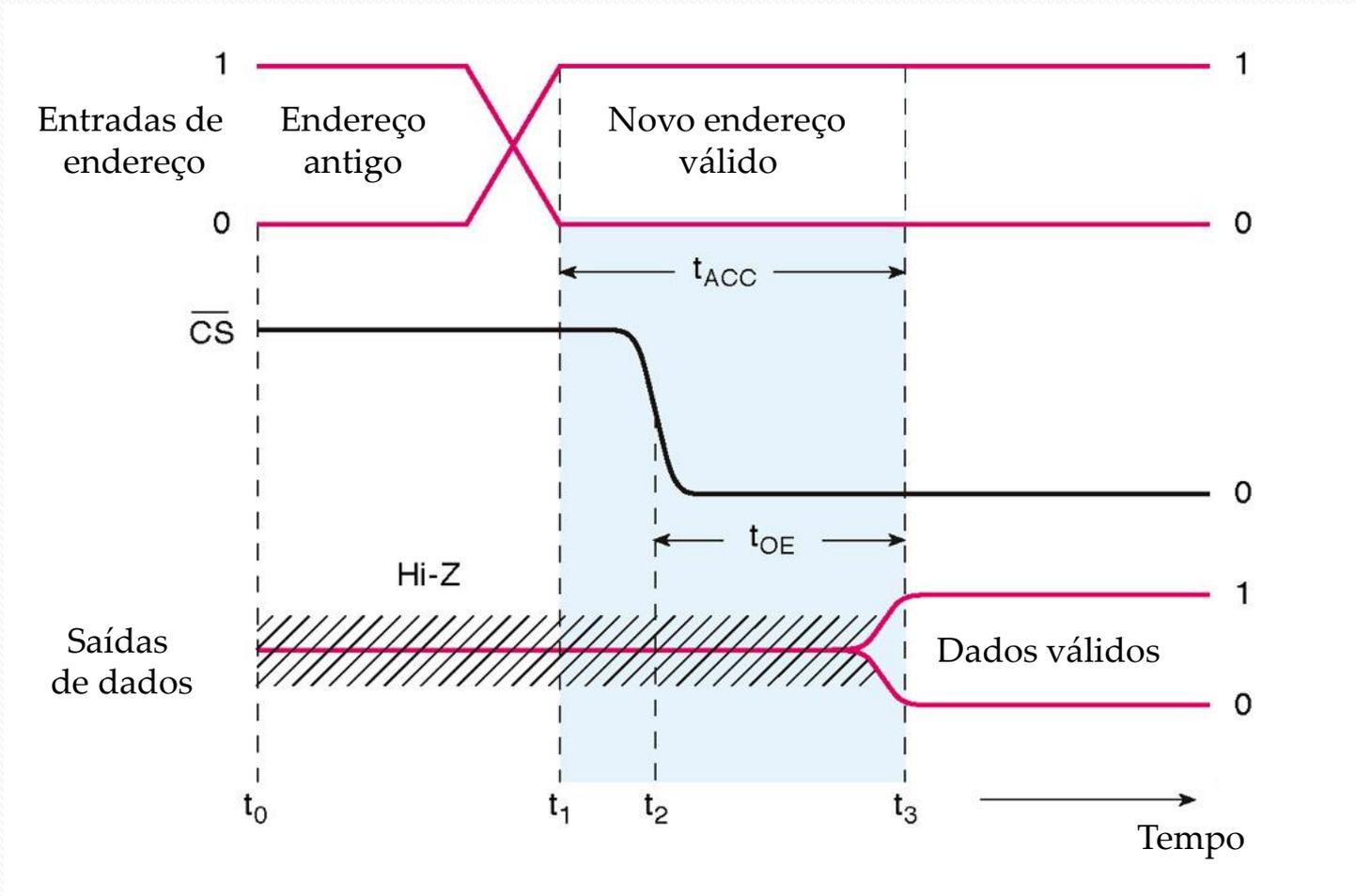
✓ Somente o registrador (a palavra) especificado tem seus dois *enables* (linha e coluna) ativados, podendo liberar seus dados no barramento interno.

✓ O buffer de saída disponibiliza estes dados desde que o *chip select* (\overline{CS}) esteja ativo, bem como o *output enable*.



Memórias ROM

- Diagrama de tempo



Memórias ROM

- **Mask-programmed ROM (MROM)**

- O conteúdo a ser armazenado na MROM é escrito (definido) no momento de fabricação do *chip*.
- A informação é gravada por meio da conexão ou não do *source* de transistores com a coluna de dados.
- O processo de escrita utiliza uma máscara para depositar metal sobre silício apenas nas posições em que as conexões precisam existir.
- As máscaras são bastante precisas; porém, caras e específicas para um certo conteúdo.
- **Vantagem:** máxima retenção de informação.
- **Desvantagem:** só podem ser escritas uma única vez.
- Tipicamente são usadas após o projeto do sistema estar completo e apenas em sistemas de larga escala (alto custo NRE amortizado pelo volume de produção).

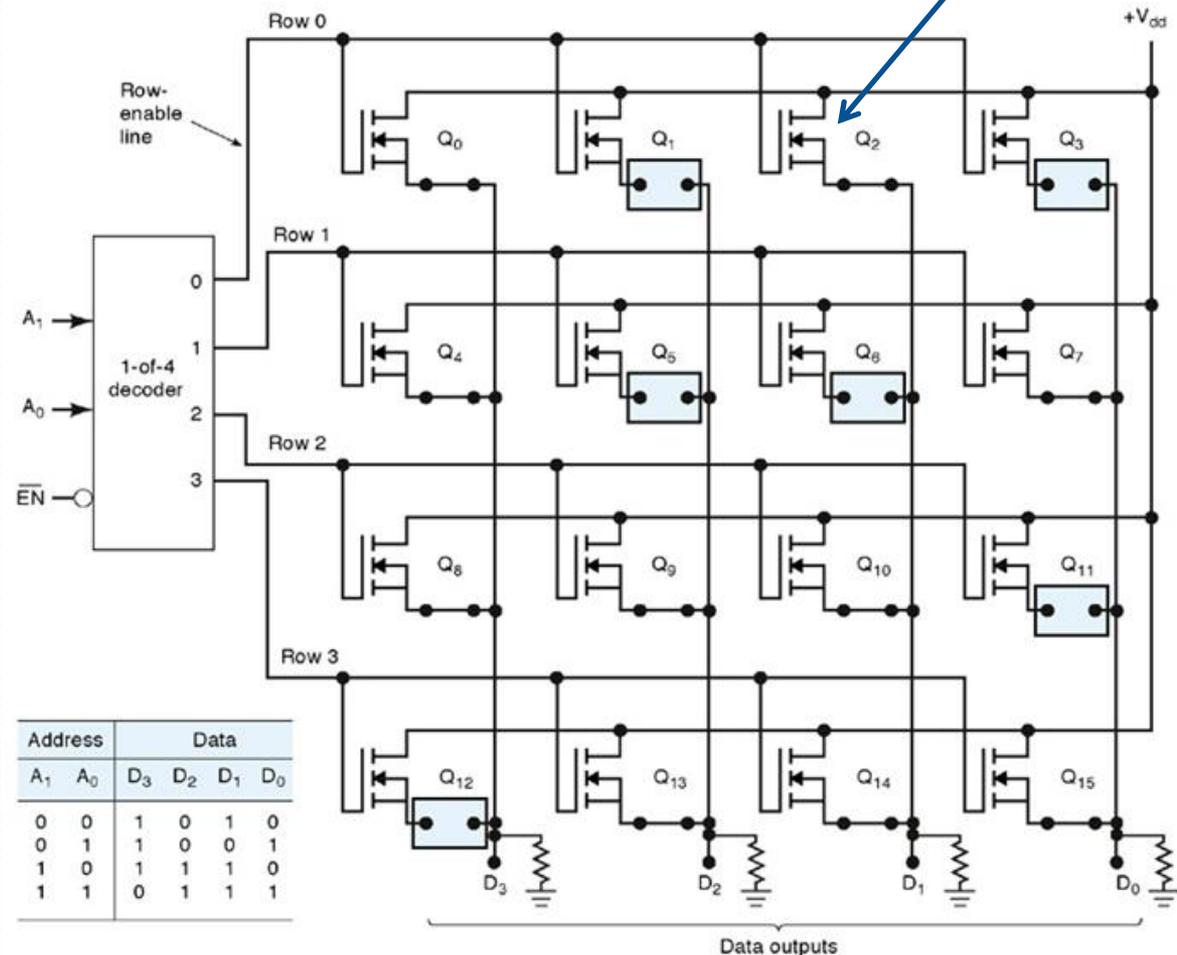
Memórias ROM

- **Mask-programmed ROM (MROM)**

N-channel
MOSFET
(dreno comum)

➤ Source aberto
(e.g., Q1): bit 0
armazenado.

➤ Source fechado
(e.g., Q0) bit 1
armazenado.



Memórias ROM

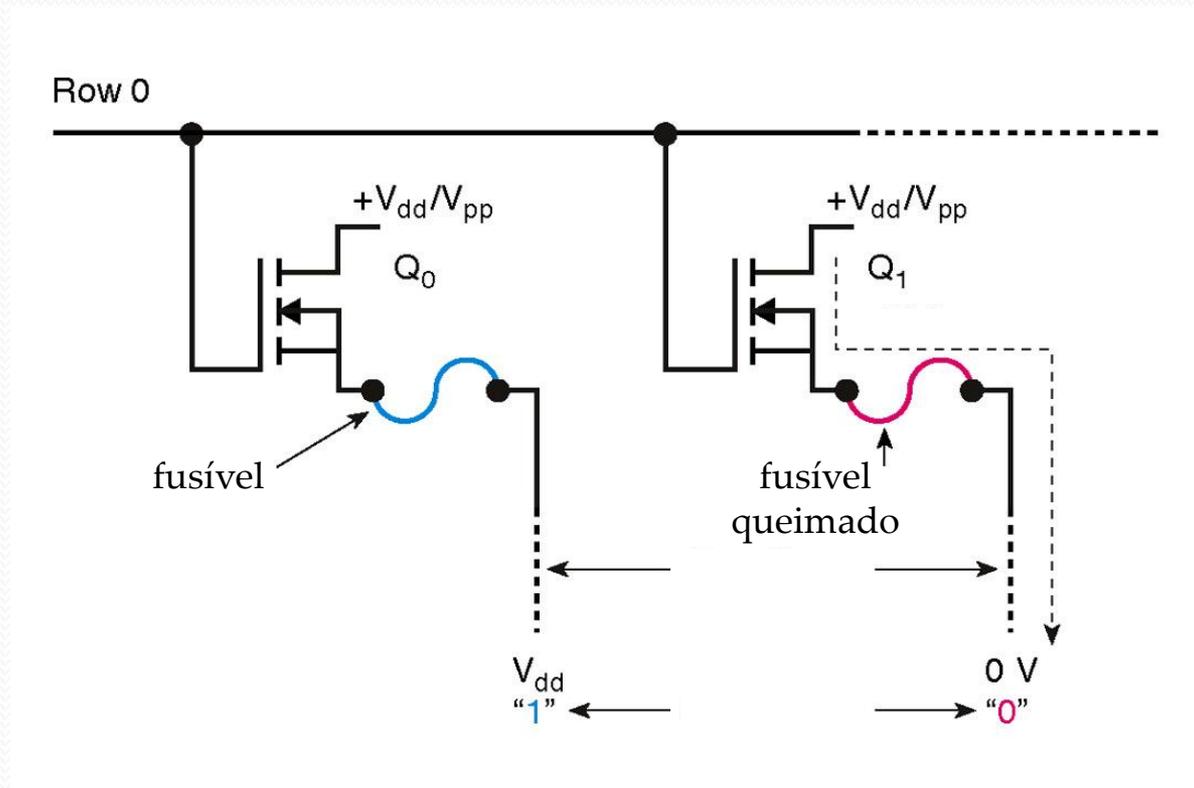
- Programmable ROM (PROM)

- Pode ser programada por um projetista em um laboratório muito depois de o chip ter sido fabricado.
- O projetista prepara um arquivo que descreve o conteúdo desejado da ROM.
- Um dispositivo especial, denominado programador, configura cada conexão queimando **fusíveis** por meio da passagem de uma alta corrente nos pontos onde uma conexão não deve existir (i.e., bit 0 deve ser armazenado) de acordo com o arquivo.
- Uma vez queimado o fusível, aquela conexão jamais pode ser restabelecida.
- Por isso, é também chamada de OTP (*one-time programmable*) ROM.

Memórias ROM

- Programmable ROM (PROM)

Por meio da aplicação de uma tensão acima do normal no dreno do transistor, o fusível "queima", deixando aquela conexão aberta, de modo que um bit zero é armazenado.



Memórias ROM

- **Programmable ROM (PROM)**

- Possui baixa capacidade (facilidade) de escrita: uma única vez; além disso, necessita do dispositivo de programação.
- Alta retenção de informação.
- OTP ROMs são mais baratas (por *chip*) que outras PROMs.
 - Mais atraentes para a composição da versão final de um produto.

Memórias ROM

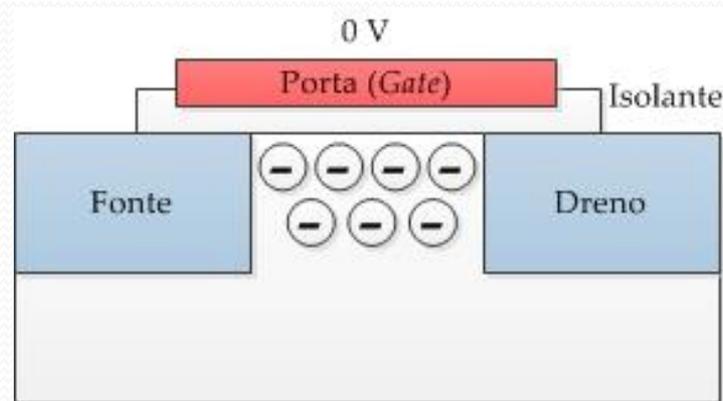
- **Erasable PROM (EPROM)**

- **Vantagem:** não apenas pode ser programada pelo usuário, mas também apagada e reprogramada muitas vezes.
- **Elemento de armazenamento:** transistor MOS com um *gate* (porta) que não possui conexão elétrica (*floating gate*), mas está bem próximo de um eletrodo.

Memórias ROM

- **Erasable PROM (EPROM)**

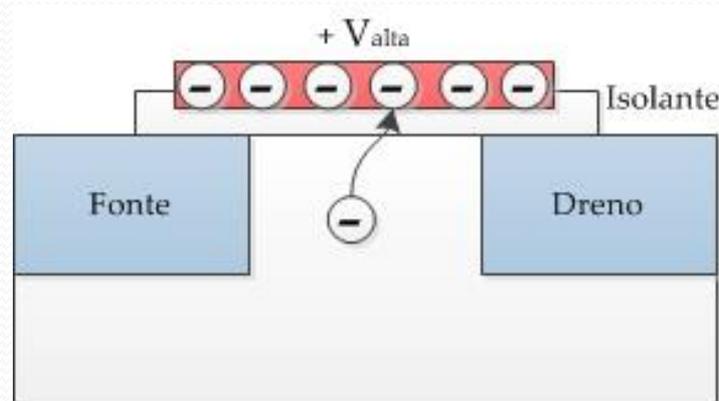
- Inicialmente, as cargas negativas formam um canal entre a fonte e o dreno, armazenando um valor lógico igual a 1 na célula.



Memórias ROM

- Erasable PROM (EPROM)

- Ao aplicar uma alta tensão positiva no *floating gate*, os elétrons saem do canal e ficam presos no *gate*.



- Quando a tensão é removida, os elétrons permanecem no *gate*, de modo que a célula passa a armazenar o valor lógico 0.

Memórias ROM

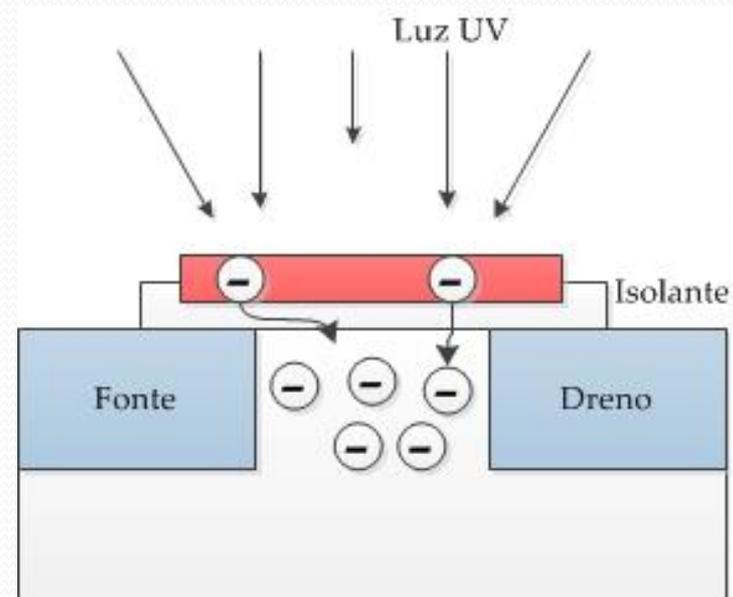
- **Erasable PROM (EPROM)**

➤ Para apagar o conteúdo, luz ultravioleta é utilizada para excitar os elétrons até que eles escapem do *floating gate* e a configuração inicial (nível lógico da célula igual a 1) seja restaurada.

✓ É preciso remover a EPROM do circuito para, então, apagá-la e reprogramá-la.

✓ Todo o conteúdo de uma EPROM é apagado (e não palavras ou blocos específicos).

✓ É necessário expor a EPROM à luz UV por vários minutos.

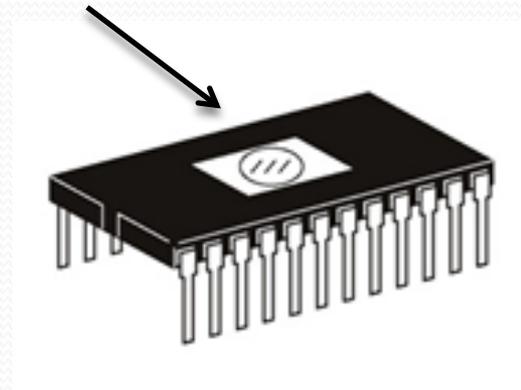


Memórias ROM

- **Erasable PROM (EPROM)**

- Uma operação de leitura é bem mais rápida que uma escrita.
- Possui maior facilidade de escrita que as OTP ROMs.
- Menor capacidade de retenção de informação: em torno de 10 anos.
- **OBS:** EPROMs são susceptíveis a mudanças indesejadas de seu conteúdo caso estejam em ambientes com muito ruído elétrico ou radiação.

janela de quartzo para exposição à luz UV



Memórias ROM

- **Electrically Erasable PROM (EEPROM)**

- Com a adição de uma fina camada de óxido sobre o dreno da célula de memória MOSFET, o conteúdo pode ser programado ou apagado eletricamente, tipicamente através da aplicação de níveis de tensão mais altos que o normal.

- **Vantagens:**

- Apagar uma EEPROM é bem mais rápido que uma EPROM.
- É possível apagar palavras (bytes) individuais de uma EEPROM, enquanto a EPROM é apagada em sua totalidade.
- Não é preciso remover o chip de memória do sistema para apagá-lo e reprogramá-lo: *in-system programmable*.

Memórias ROM

- **Electrically Erasable PROM (EEPROM)**

- Controladores de memória embutidos escondem do usuário os detalhes de acesso à memória - operações de apagar e reprogramar -, oferecendo uma interface simples de comunicação.
- Operação de escrita é mais lenta que a leitura: é preciso apagar (ou limpar) o conteúdo antes de reprogramar.
 - Um pino *busy* pode indicar ao processador que a EEPROM está ocupada realizando uma operação de escrita.

Memórias ROM

- **Electrically Erasable PROM (EEPROM)**

- Uma EEPROM pode ser apagada e escrita dezenas de milhares de vezes.

- **Desvantagens:**

- Custo bem mais elevado que uma EPROM.

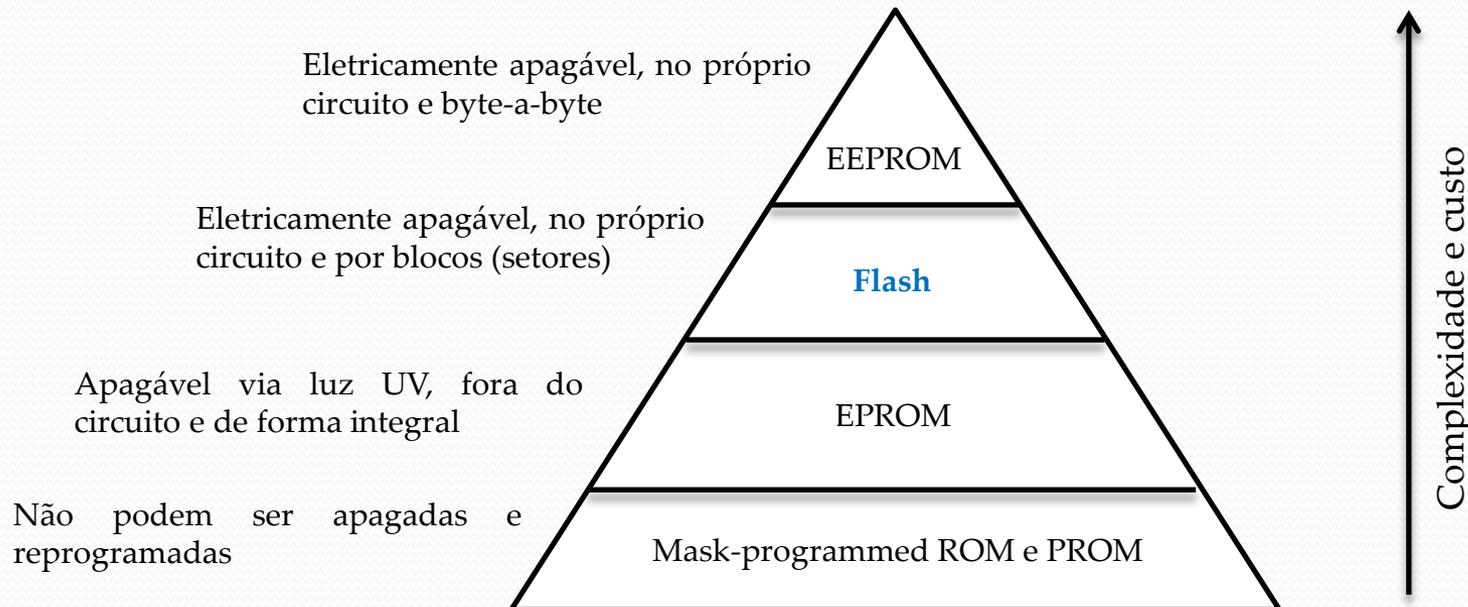
- Menor densidade, i.e., consegue armazenar menos bits de dados em uma mesma área de circuito integrado que uma EPROM.

Memórias ROM

- **Flash**

- **Desafios de projeto:**

- Unir as vantagens de custo e densidade da EPROM à possibilidade de efetuar operações de escrita no próprio sistema que a EEPROM oferece.
- Preservar a rapidez de execução das operações de leitura.



Memórias ROM

• Flash

- A célula de memória flash é como o transistor usado na EPROM, apenas um pouco maior.
- Uma camada mais fina de óxido é colocada no *gate* e possibilita o apagamento elétrico da memória, além de viabilizar a construção de *chips* com densidades bem maiores que a EEPROM.
- Grandes blocos de memória podem ser apagados de uma só vez, em vez de trabalhar com palavras (*bytes*) de forma isolada.
- Uma operação de escrita em uma única palavra pode ser mais lenta que na EEPROM.
 - O bloco inteiro tem de ser lido, a palavra atualizada e, então, todo o bloco reescrito.
- Utilizada em sistemas embarcados para o armazenamento de grandes quantidades de dados em memórias não-voláteis.
 - Exemplo: câmeras digitais, telefones celulares, sistemas de vídeo.

Memórias ROM

- **Aplicações:**

- Memórias ROMs são úteis quando armazenamento não-volátil de informação (dados ou códigos de programa) é necessário, ou quando os dados gravados raramente ou nunca mudam.

- **Exemplos:**

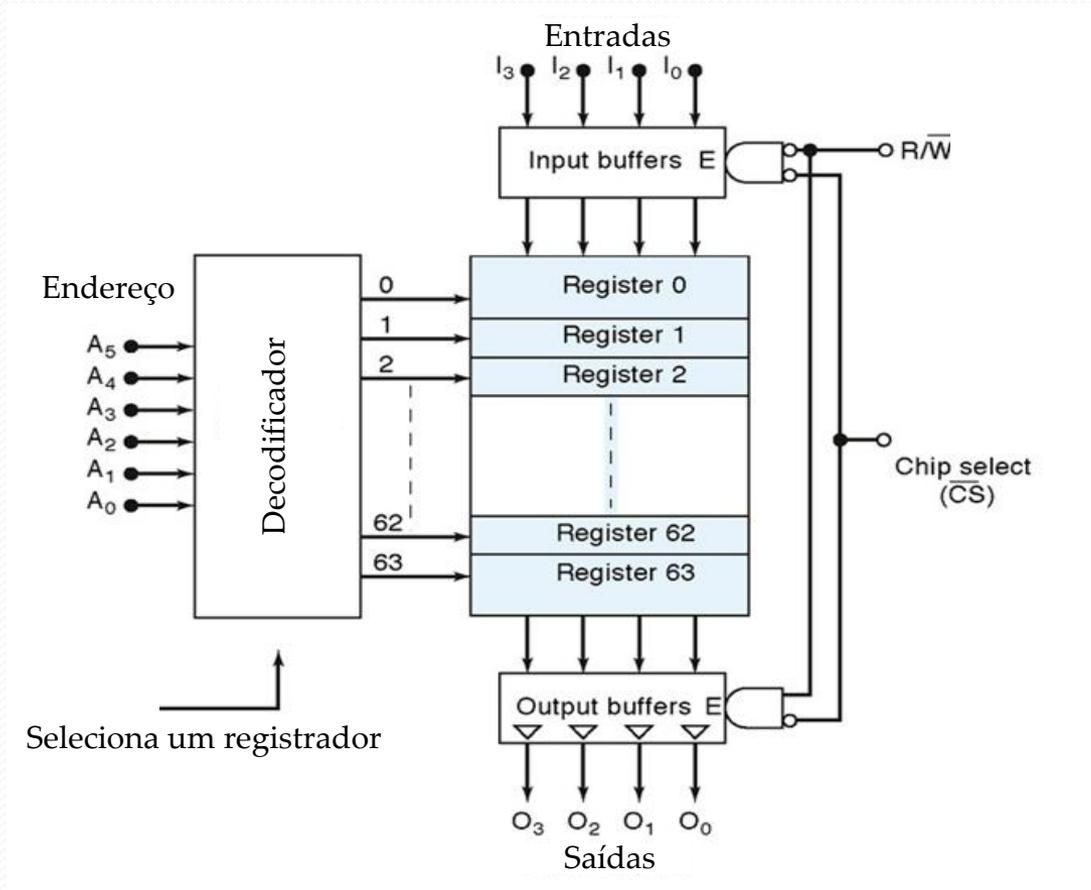
- Memória de programa de um microcontrolador.
- Transferência e mobilidade de dados (celulares, câmeras digitais, pendrives).
- Armazenamento de programa de inicialização (*bootstrap*) de um computador.
- Tabelas de dados (*lookup tables*): valores de funções trigonométricas, conversão de código (e.g., BCD para 7 segmentos).

Memórias RAM

- **Vantagem:** realizam operações de leitura e escrita com a mesma facilidade (*in-system*).
- **RAM:** o acesso a qualquer posição (endereço) de memória requer o mesmo tempo.
- **Uso:** armazenamento temporário de dados.
- **Desvantagem:** tipicamente voláteis.

Memórias RAM

- Arquitetura simplificada



Memórias RAM

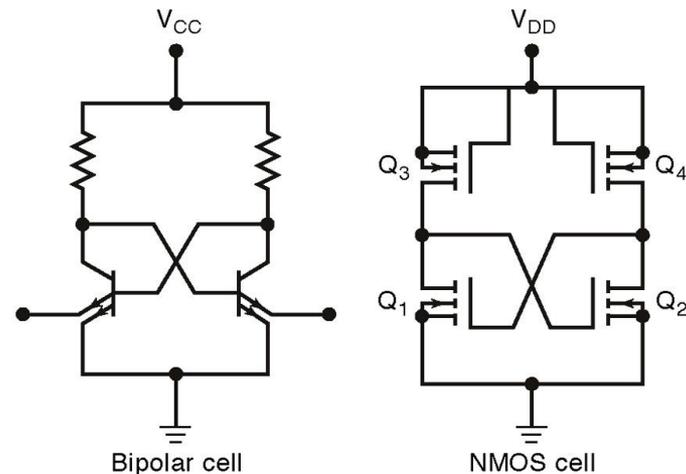
- **SRAM (Static RAM)**

- Os dados são mantidos enquanto houver alimentação de energia.
- Célula básica de armazenamento: flip-flop (~ 6 transistores).

✓ **Vantagem:** alta velocidade de operação (leitura/escrita).

✓ **Trade-offs:**

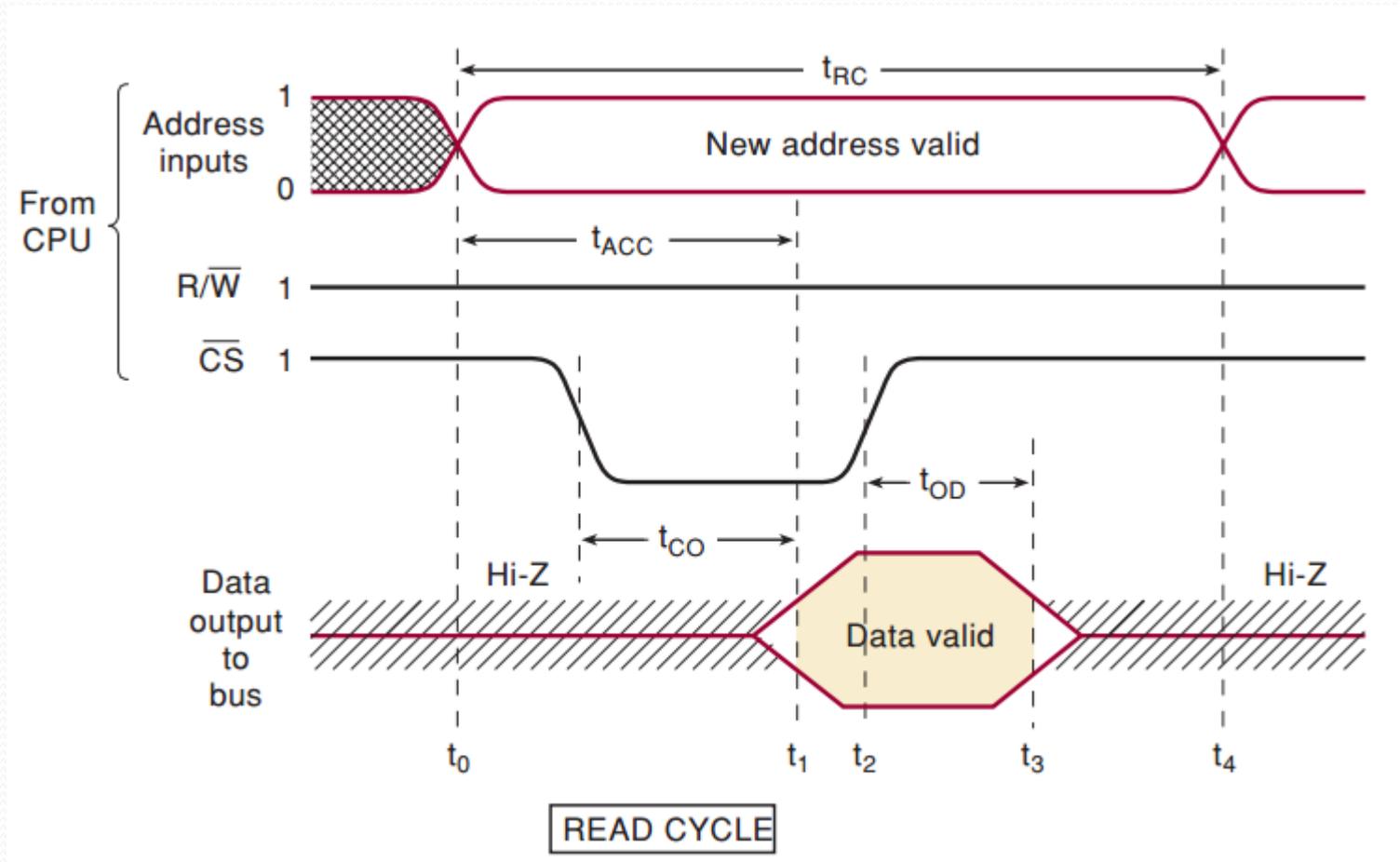
- Maior ocupação de espaço.
- Custo elevado.



- **Uso:** partes de alto desempenho de um sistema (e.g., *cache*).

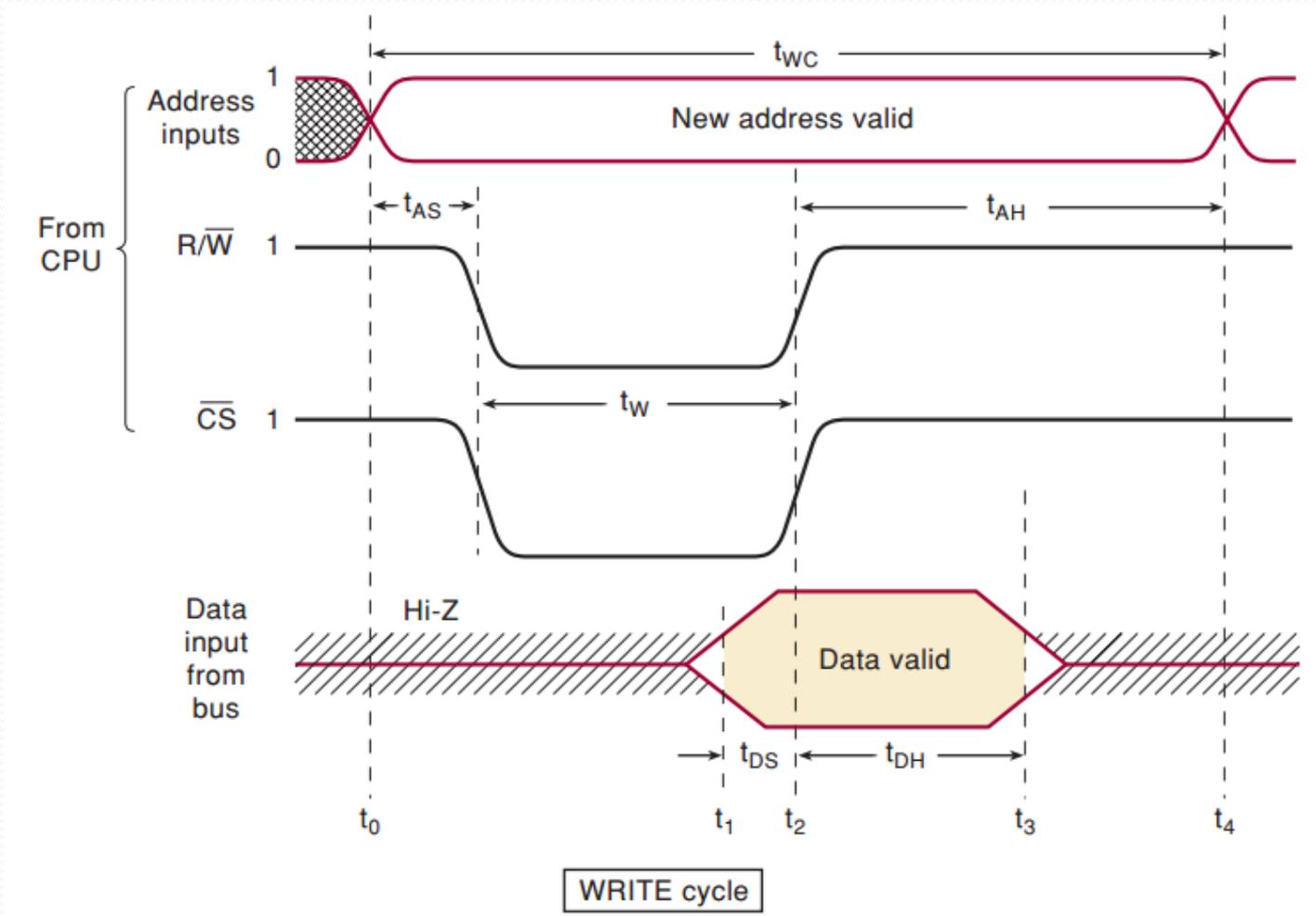
Memórias RAM

- **SRAM (Static RAM) – Ciclo de Leitura**



Memórias RAM

- **SRAM (Static RAM) – Ciclo de Escrita**



Memórias RAM

- **NVRAM (Nonvolatile RAM)**

- Retém os dados após a fonte de energia ser desligada.
 - RAM com bateria: SRAM com bateria permanentemente conectada – nesse caso, operações de escrita e leitura são rapidamente executadas e não há limites para o número de escritas, ao contrário das memórias ROM.
 - SRAM com EEPROM ou *flash*: armazena o conteúdo completo da memória RAM na EEPROM ou *flash* antes de a fonte de energia ser desligada.

Memórias RAM

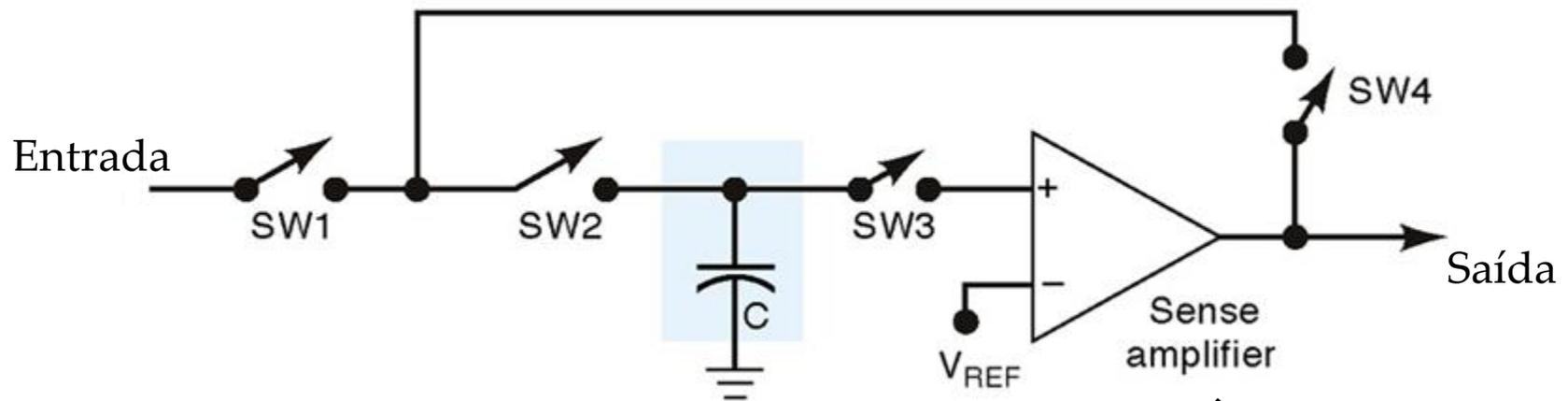
- **DRAM (Dynamic RAM)**

- A célula básica de memória é um capacitor MOS.
- **Vantagens:**
 - Memória mais densa que a SRAM, isto é, que possibilita o armazenamento de mais bits em uma mesma área de circuito integrado.
 - Mais barata que a SRAM.
- A carga armazenada no capacitor gradualmente desaparece, sendo possível a perda dos dados existentes na memória.
- Por isso, há um circuito de *refresh* que regularmente atualiza ou recarrega as células da memória.

Memórias RAM

- **DRAM (Dynamic RAM)**

- A célula básica de memória é um capacitor MOS.



- **Escrita:** SW1 e SW2 fecham.

- **Leitura:** apenas SW1 fica aberta.

O caminho de retorno (via SW4 e SW2) serve para o *refresh* do valor de tensão que o capacitor deve guardar.

Amplifica os valores de tensão armazenados (pequenos) para níveis lógicos normais.

Memórias RAM

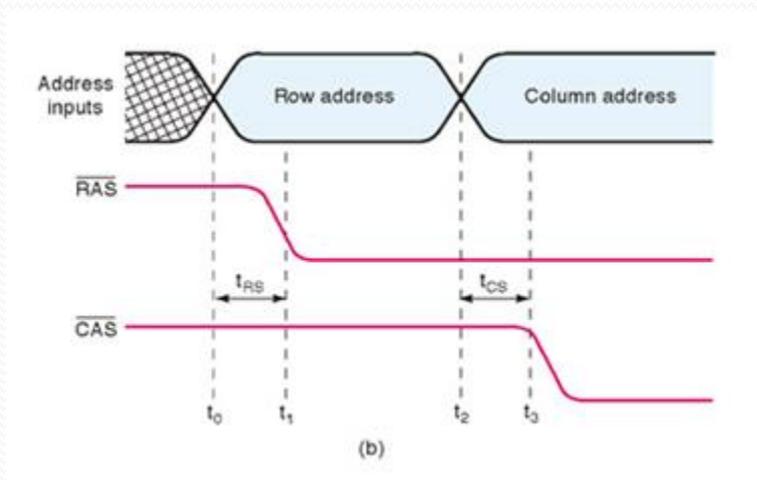
- **DRAM (Dynamic RAM)**

- Devido às vantagens de densidade, custo e consumo de potência, as DRAMs são opções mais interessantes quando os requisitos cruciais em um sistema embarcado são tamanho, custo e potência.
- O acesso a DRAMs é mais lento que a SRAMs: quando velocidade representar a métrica crítica, será vantajoso utilizar SRAMs.

Memórias RAM

- **DRAM (Dynamic RAM)**

- A fim de reduzir o número de pinos em chips DRAM de alta capacidade, fabricantes exploram a noção de **multiplexação de endereços**.
- O endereço a ser acessado é fornecido em duas partes separadas: os bits mais significativos formam o endereço de linha, enquanto os bits menos significativos definem o endereço de coluna.

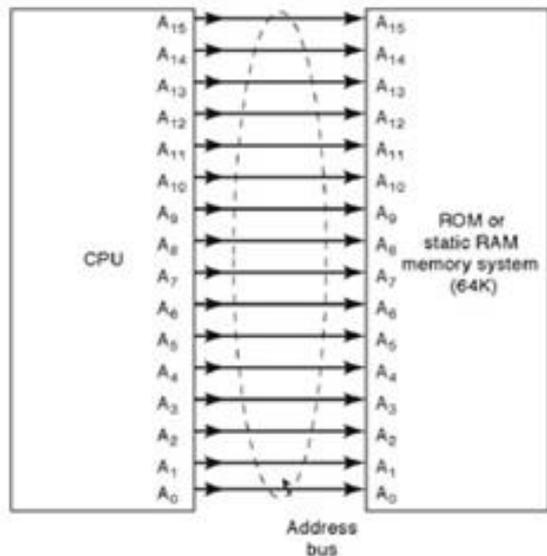


✓ Cada parte do endereço é colocada em um registrador específico e decodificada, identificando assim a posição de memória que será lida ou escrita.

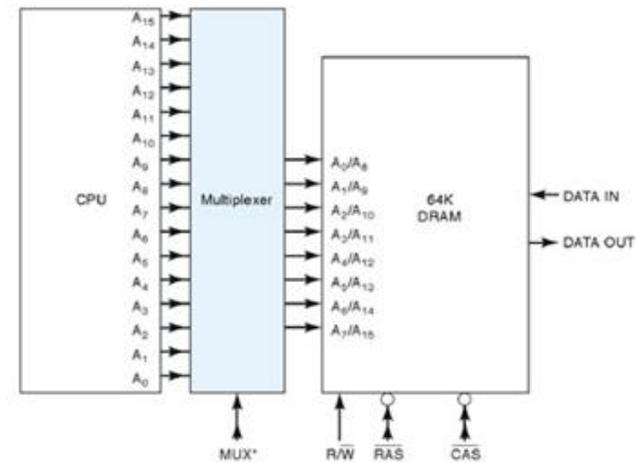
Memórias RAM

- **DRAM (Dynamic RAM)**
 - Multiplexação de endereços

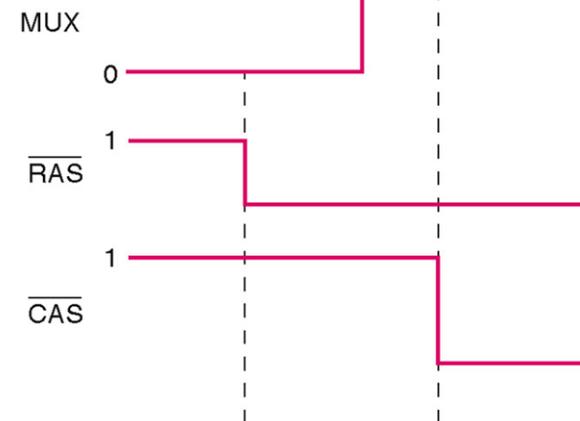
Uso de um multiplexador para reduzir o número de conexões com a DRAM.



Processador conectado diretamente a uma ROM ou SRAM.



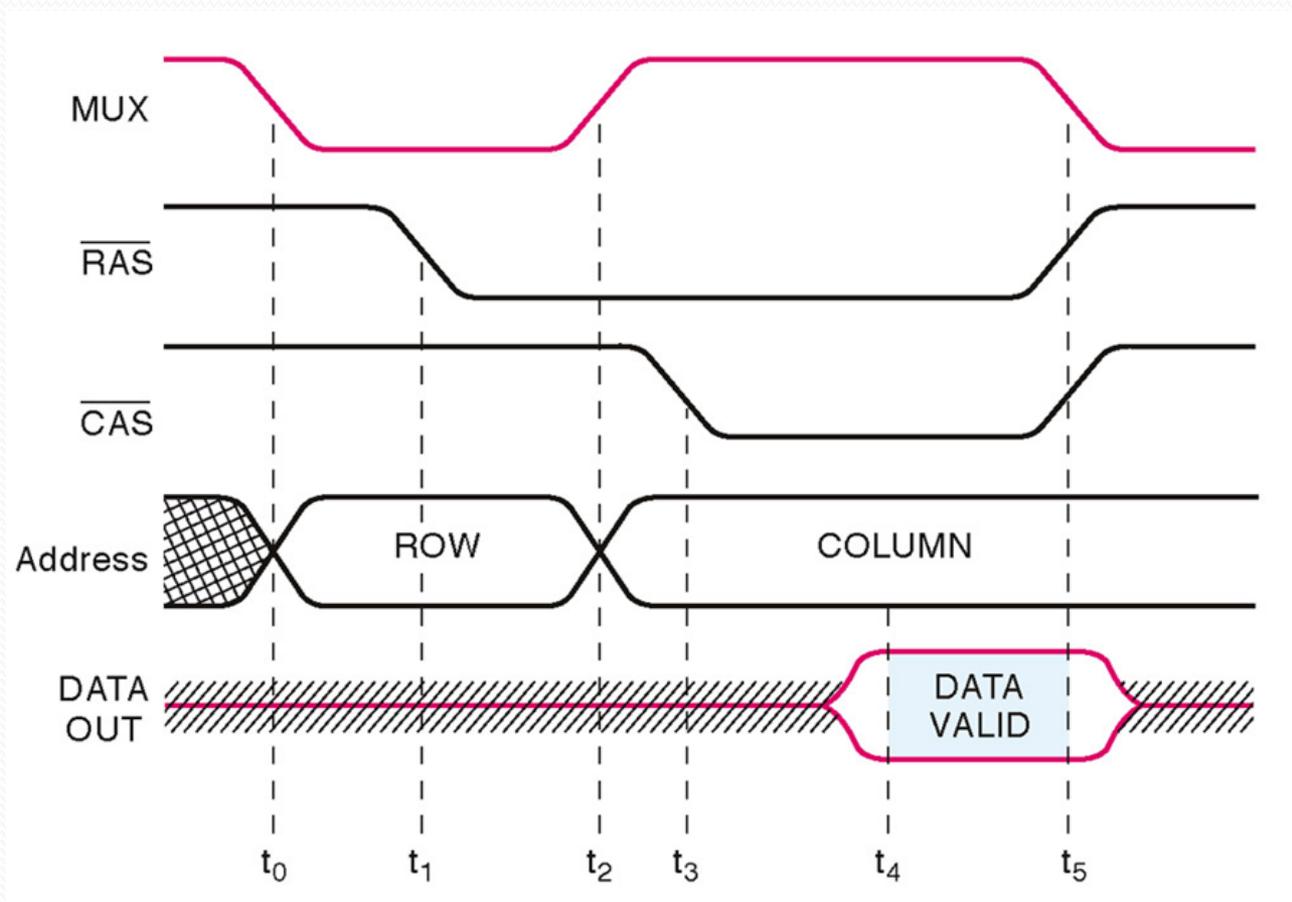
Sinais de controle.



Memórias RAM

- **DRAM (Dynamic RAM)**

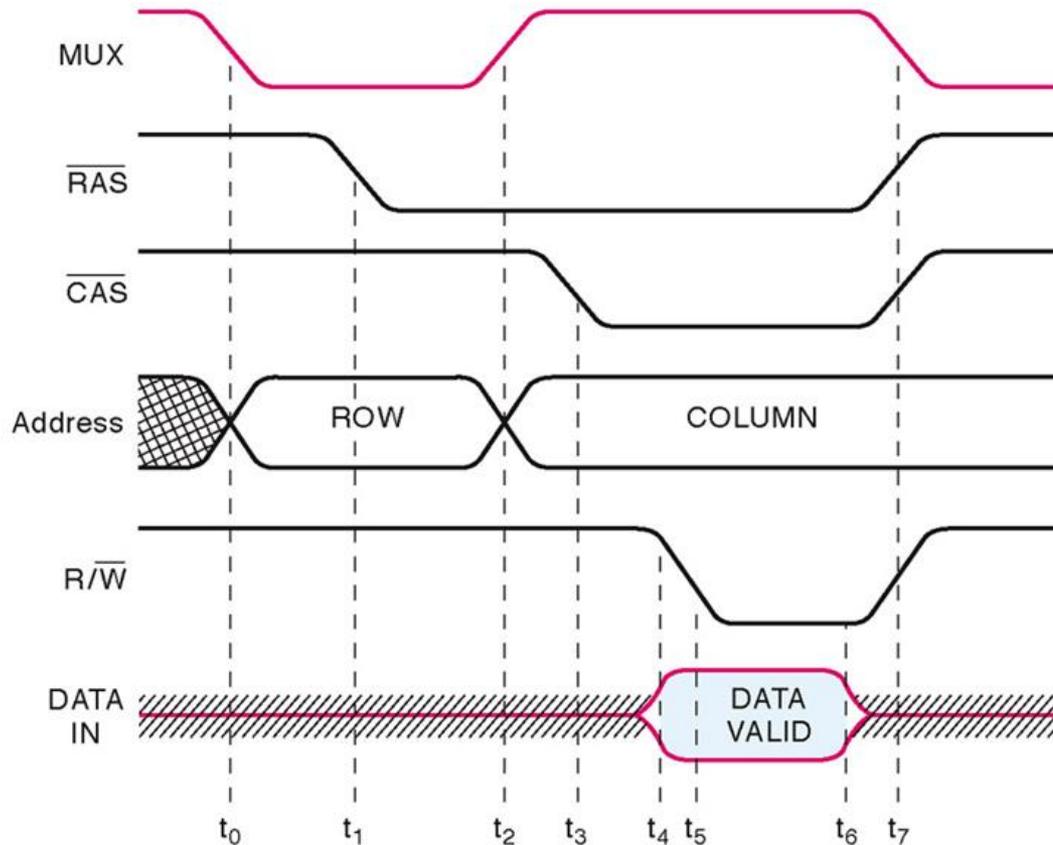
- Ciclo de leitura



Memórias RAM

- **DRAM (Dynamic RAM)**

- Ciclo de escrita



Memórias RAM

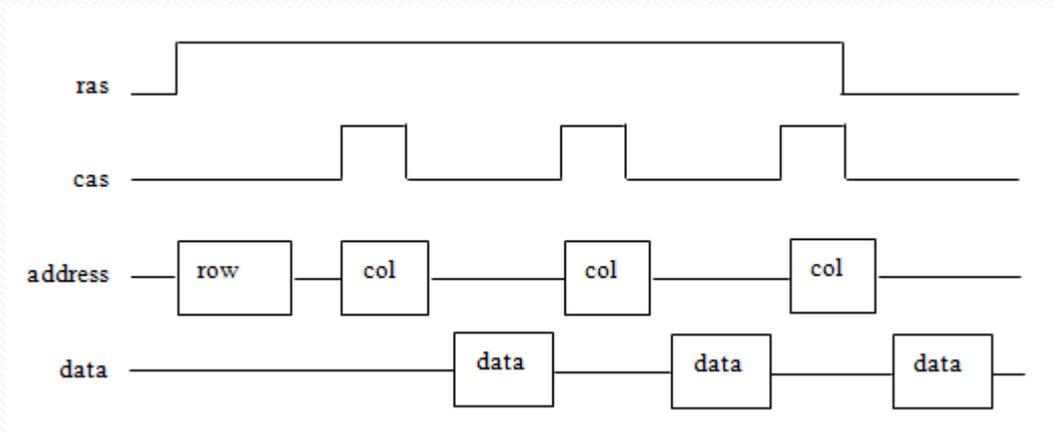
- **DRAM (Dynamic RAM)**

- **Refresh:** toda vez que uma célula DRAM é lida, seu valor é recarregado no capacitor.
 - Para manter os dados atualizados, toda a memória teria que ser lida regularmente – abordagem inviável para chips DRAM de alta capacidade.
 - Para acelerar este processo, toda vez que uma operação de leitura é feita em uma célula, todas as células daquela linha são atualizadas ou recarregadas.
 - **Modo *burst* (rajada):** a operação normal da memória é suspensa e cada linha da DRAM é recarregada em sucessão até que todas tenham sido atualizadas.
 - **Modo distribuído:** a recarga de linha é intercalada com as operações normais de acesso à memória.

Memórias RAM

- **Fast page mode DRAM (FPM DRAM)**

- Cada linha da memória é vista como uma página, que contém várias palavras que são endereçadas por endereços de coluna.
- O *sense amplifier* amplifica uma página inteira uma vez que o endereço é passado para o buffer de linha.
- Cada palavra daquela página pode ser lida ou escrita através do acionamento do endereço de coluna correspondente.

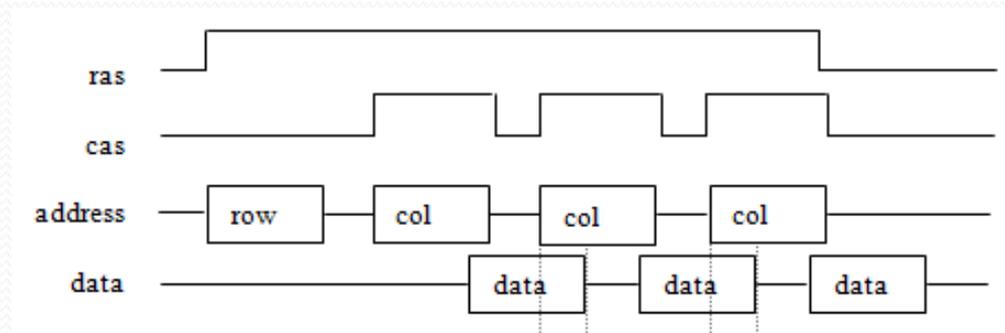


- Este modo elimina um ciclo extra em cada leitura/escrita em uma mesma página quando comparado à operação da DRAM básica.

Memórias RAM

- **Extended data out DRAM (EDO DRAM)**

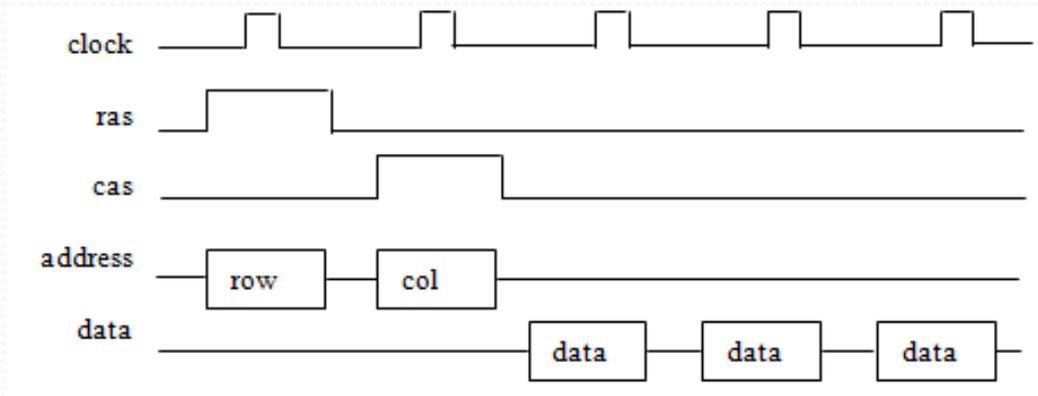
- Permite a sobreposição de uma seleção de coluna e uma operação de leitura de dados (há um *latch* adicional antes do buffer de saída).
- Ou seja, enquanto a palavra anterior está sendo lida do buffer de saída, um novo endereço de coluna pode ser acionado e decodificado.



Memórias RAM

- **DRAM síncrona (SDRAM)**

- Um sinal de *clock* controla a entrada e saída de dados.
- Após a configuração da página e da coluna, a SDRAM pode guardar internamente o endereço inicial e fornecer novos dados de saída, guardados em posições consecutivas de memória, a cada subida da borda do *clock*.



Memórias RAM

- **DRAM síncrona (SDRAM)**

- **Enhanced SDRAM:** permite a sobreposição do endereço de coluna com a leitura do dado anterior (como ocorre com a EDO DRAM).
- **DDR SDRAM** (*double data rate*): dados são transferidos na subida e descida do relógio.
 - DDR3 – taxa de transferência é 8 vezes mais rápida.

Composição de memória

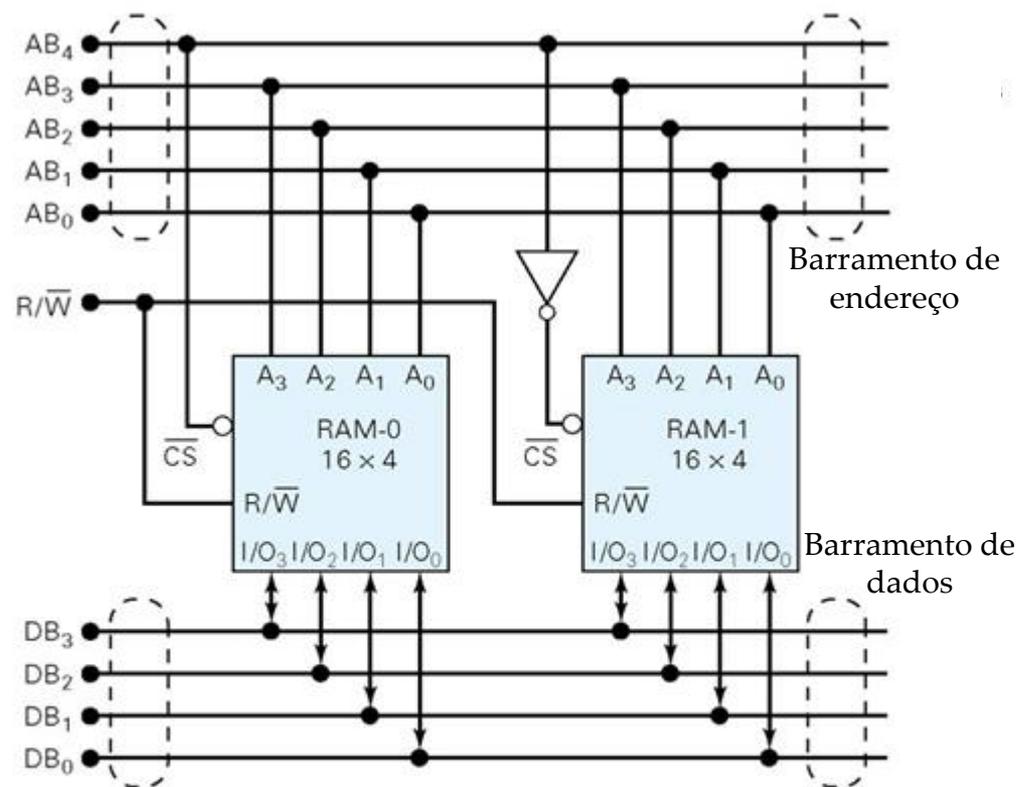
- Considere que o projeto de um determinado sistema embarcado requer o uso de uma unidade de memória com uma dada capacidade (e.g., 64k x 32).
- **Solução imediata:** utilizar um módulo de memória com a capacidade necessária.
- Quando esta opção não é possível, a alternativa consiste em **combinar** módulos de memória menores.
- Para isto, é preciso organizar as conexões e a lógica de endereçamento às unidades a fim de garantir o acesso à posição desejada.

Composição de memória

- Há dois cenários básicos possíveis:
 - O número desejado de palavras é maior que o disponível em cada um dos módulos de memória.
 - **Ideia:** combinar adequadamente os pinos de endereçamento dos diferentes dispositivos e usar um barramento de dados comum (pinos de dados dos dispositivos “curto-circuitados”).
 - O número de bits por palavra é insuficiente.
 - **Ideia:** combinar adequadamente os pinos de dados dos diferentes dispositivos e usar um barramento de endereços comum (pinos de endereçamento dos dispositivos “curto-circuitados”).
- O terceiro cenário está ligado à necessidade de ampliar tanto o número de palavras quanto o tamanho das palavras.
 - Neste caso, a solução é combinar as estratégias acima.

Composição de memória

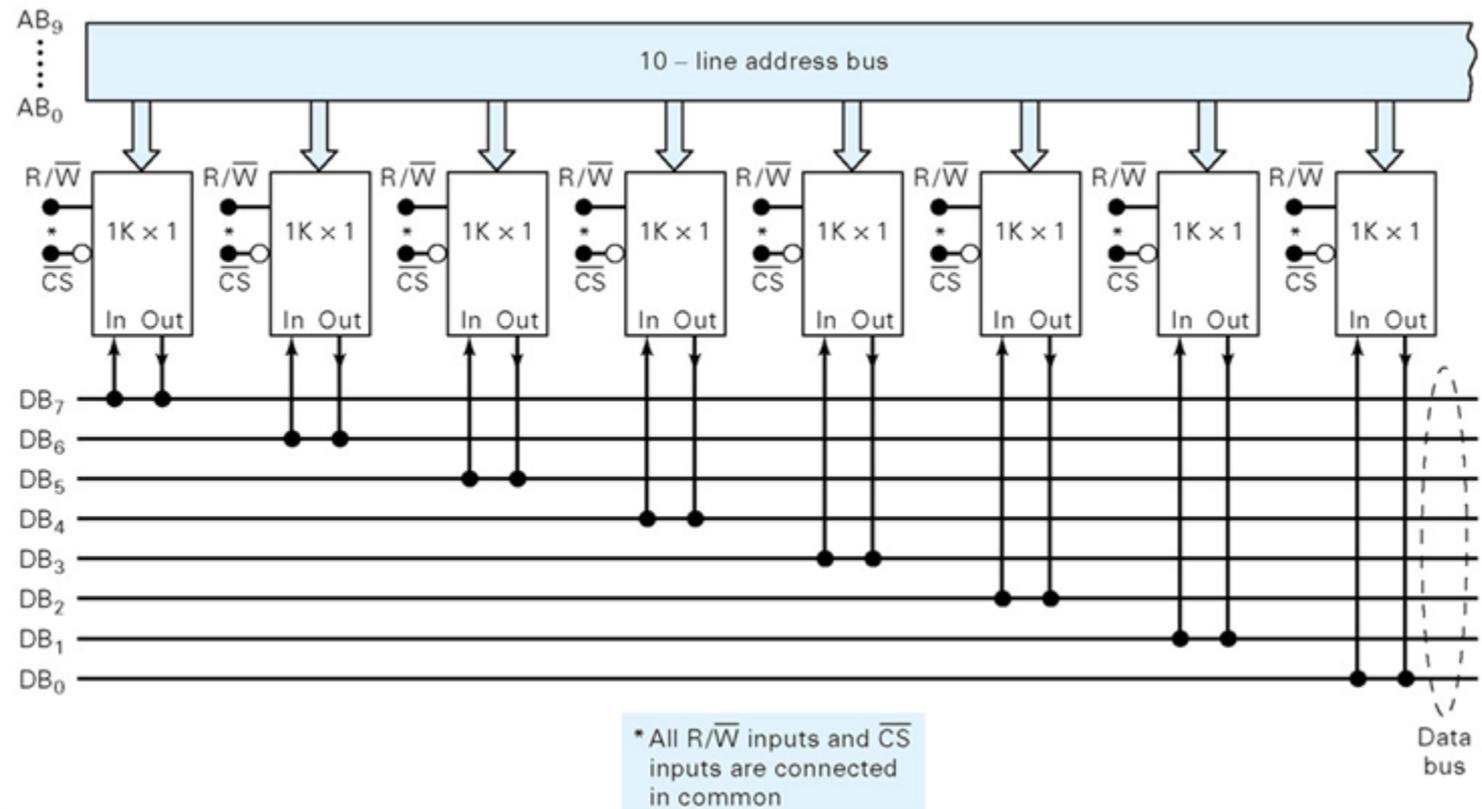
- **Aumento do número de palavras:** memória de 32 x 4 bits a partir de duas memórias 16 x 4 bits



Faixa de endereços	00000 to 01111 – RAM-0 10000 to 11111 – RAM-1
Total	00000 to 11111 – (32 words)

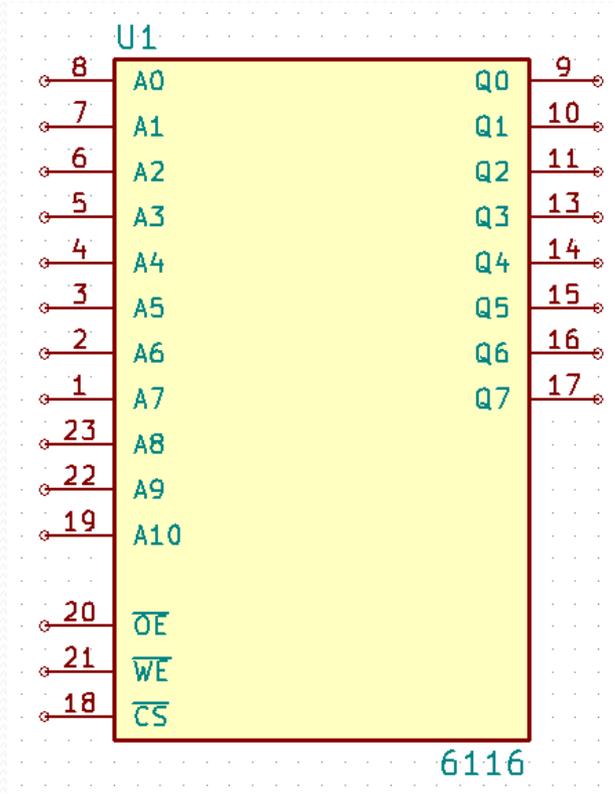
Composição de memória

- **Aumento do tamanho das palavras:** memória de 1k x 8 bits a partir de 8 memórias de 1k x 1 bits



Composição de memória

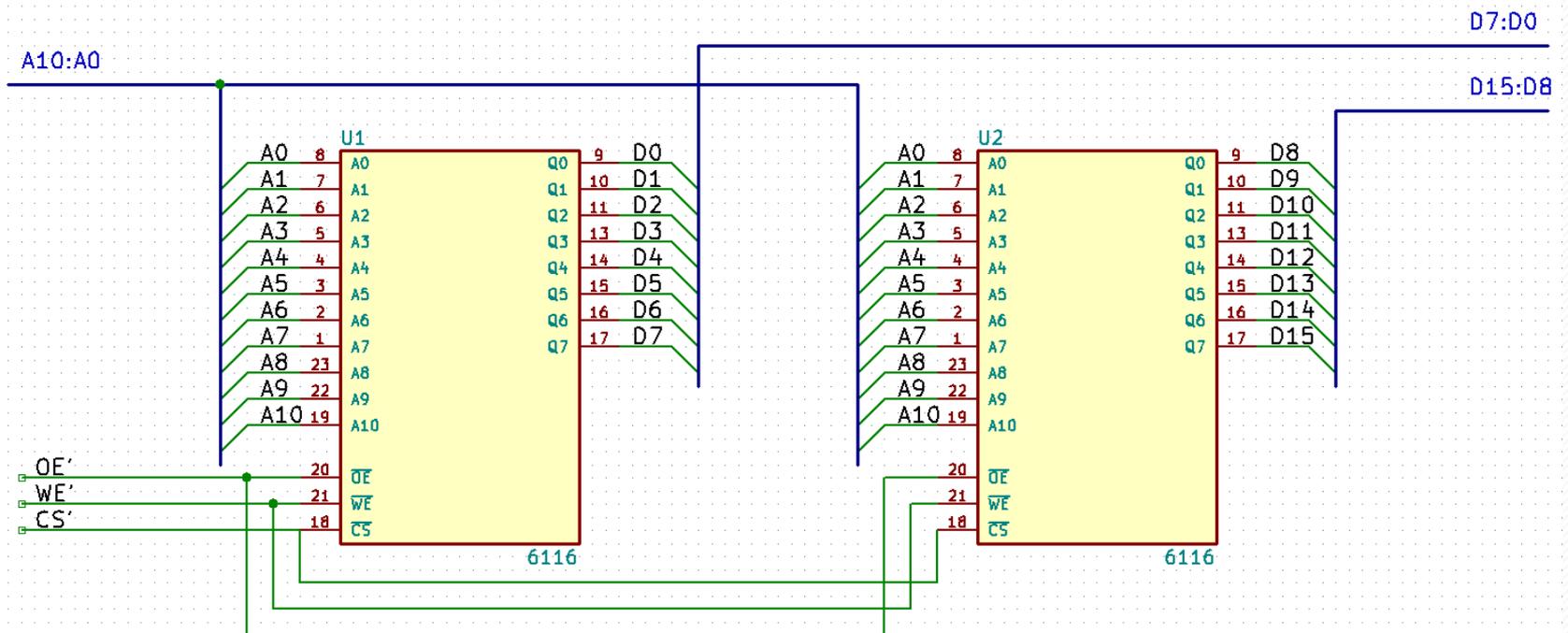
- **Exemplo:** memória com 4k palavras de 16 bits
 - Cada módulo 6116 de memória possui uma capacidade de 2k x 8 bits.



Mode	\overline{CS}	\overline{OE}	\overline{WE}	I/O
Standby	H	X	X	High-Z
Read	L	L	H	DATA _{OUT}
Read	L	H	H	High-Z
Write	L	X	L	DATA _{IN}

Composição de memória

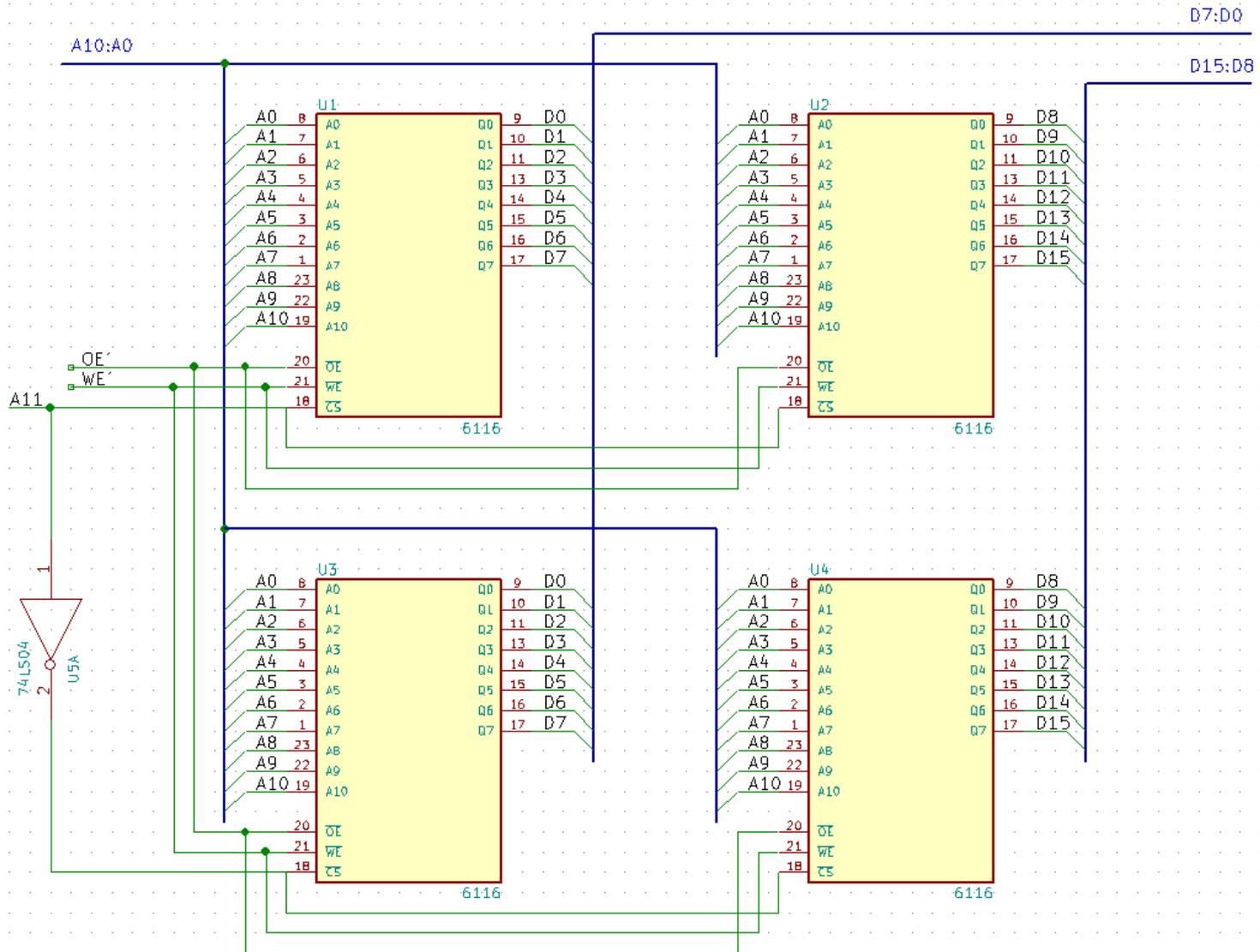
- **Exemplo:** memória com 4k palavras de 16 bits.
 - **Primeiro passo:** composição de uma memória 4k x 8 ou 2k x 16. Vamos compor uma memória 2k x 16 usando 2 módulos 6116.



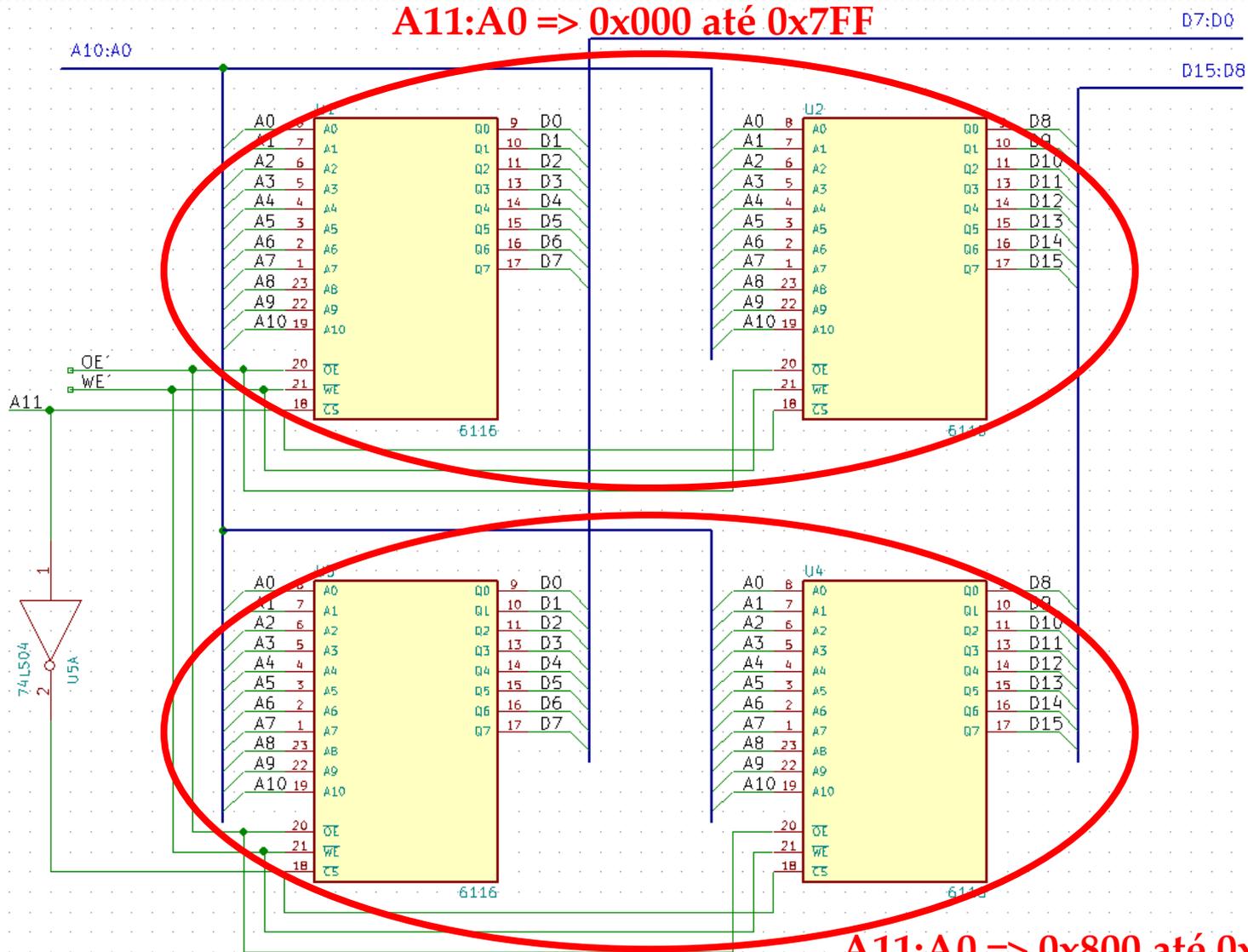
Composição de memória

- **Exemplo:** memória com 4k palavras de 16 bits.
 - **Segundo passo:** combinar duas composições para atingir a capacidade desejada. Vamos combinar duas composições 2k x 16 para obter 4k x 16.

Composição de memória



Composição de memória



A11:A0 => 0x800 até 0xFFF 57

Bibliografía

- Vahid, Frank, and Tony Givargis. *Embedded system design: a unified hardware/software introduction*. Vol. 4. New York, NY: John Wiley & Sons, 2002.
- Tocci, Ronald J., Widmer, Neal S., Moss, Gregory L., *Digital Systems: principles and applications*. Pearson Education India, 2007. (capítulo 12)