

## Aulas 20 e 21

- Tecnologias de memória
- Organização genérica de um circuito de memória a partir de uma célula básica
- Memória SRAM (*Static Random Access Memory*):
  - organização de células básicas num array
  - ciclos de acesso para leitura e escrita: diagramas temporais
  - construção de módulos de memória SRAM
- Memória DRAM (*Dynamic Random Access Memory*) :
  - célula básica; organização interna
  - ciclos de acesso para leitura e escrita: diagramas temporais
  - refrescamento: modo "RAS only"
  - construção de módulos de memória DRAM

José Luís Azevedo, Bernardo Cunha, Tomás Oliveira e Silva

# Introdução – conceitos básicos

- RAM – Random Access Memory
  - Designação para memória volátil que pode ser lida e escrita
  - Acesso "random"
- ROM – Read Only Memory
  - Memória não volátil que apenas pode ser lida
  - Acesso "random"

(Acesso "random" - tempo de acesso é o mesmo para qualquer posição de memória)

# Introdução – conceitos básicos

- Tecnologias:
  - Semicondutor
  - Magnética
  - Ótica
  - Magneto-ótica
- Memória volátil:
  - Informação armazenada perde-se quando o circuito é desligado da alimentação: RAM (SRAM e DRAM)
- Memória não volátil:
  - A informação armazenada mantém-se até ser deliberadamente alterada: EEPROM, Flash EEPROM, tecnologias magnéticas

# Memória não volátil – evolução histórica

- **ROM** – programada durante o processo de fabrico (1965)
- **PROM** – Programmable Read Only Memory: programável uma única vez (1970)
- **EPROM** – Erasable PROM: escrita em segundos, apagamento em minutos (ambas efectuadas em dispositivos especiais) (1971)
- **EEPROM** – Electrically Erasable PROM (1976)
  - O apagamento e a escrita podem ser efetuados no próprio circuito em que a memória está integrada
  - O apagamento é feito byte a byte
  - Escrita muito mais lenta que leitura
- **Flash EEPROM** (tecnologia semelhante à EEPROM) (1985)
  - A escrita pressupõe o prévio apagamento das zonas de memória a escrever
  - O apagamento é feito por blocos (por exemplo, blocos de 4 kB) o que torna esta tecnologia mais rápida que a EEPROM
  - O apagamento e a escrita podem ser efetuados no próprio circuito em que a memória está integrada
  - Escrita muito mais lenta que leitura

# Tecnologias de memória

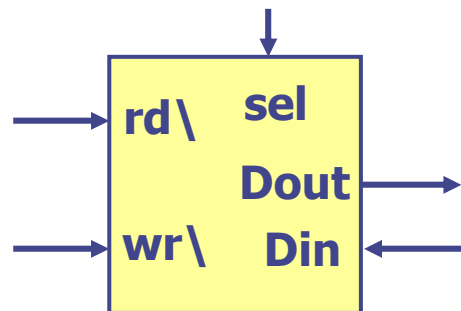
<b>Tecnologia</b>	<b>Tempo Acesso</b>	<b>\$ / GB</b>
SRAM	0,5 – 2,5 ns	\$500 - \$1000
DRAM	35 - 70 ns	\$10 - \$20
Flash	5 – 50 us	\$0,75 - \$1
Magnetic Disk	5 - 20 ms	\$0,005 - \$0,1

**(Dados de 2012)**

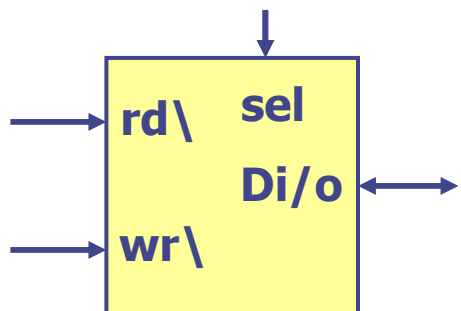
- SRAM - Static Random Access Memory
- DRAM - Dynamic Random Access Memory
- Dadas estas diferenças de custo e de tempo de acesso, é vantajoso construir o sistema de memória como uma hierarquia onde se utilizem todas estas tecnologias

# Organização básica de memória

- Uma memória pode ser encarada como uma coleção de N registos de dimensão K ( $N \times K$ )
- Cada registo é formado por K células, cada uma delas capaz de armazenar 1 bit
- Uma célula de memória (de 1 bit) pode ser representada por:



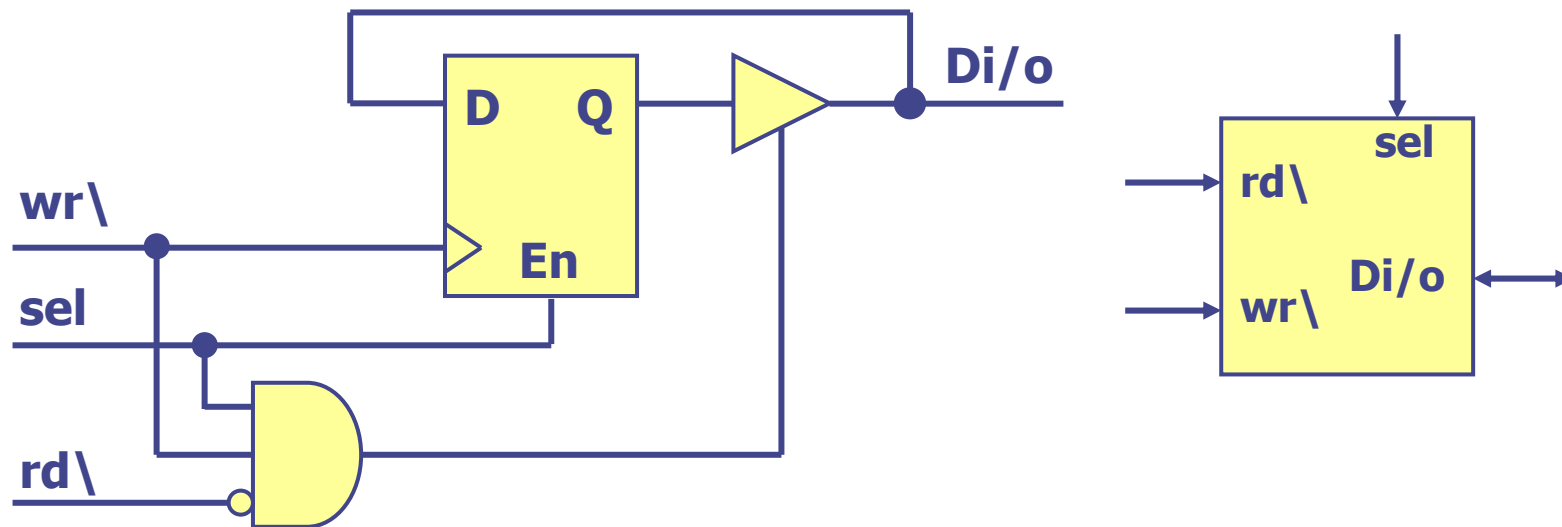
Din	– Data In (1 bit)
Dout	– Data Out (1 bit)
sel	– Select
rd\'	– Read\'
rw\'	– Write\'



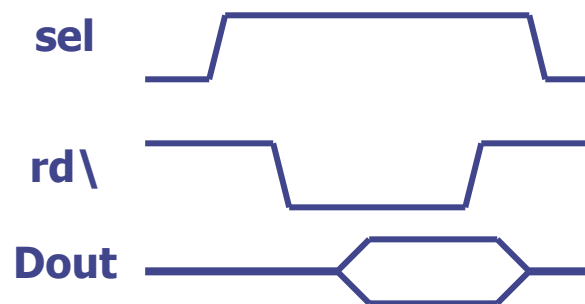
Di/o	– Data In/Out (1 bit)
sel	– Select
rd\'	– Read\'
rw\'	– Write\'

# Organização básica de memória

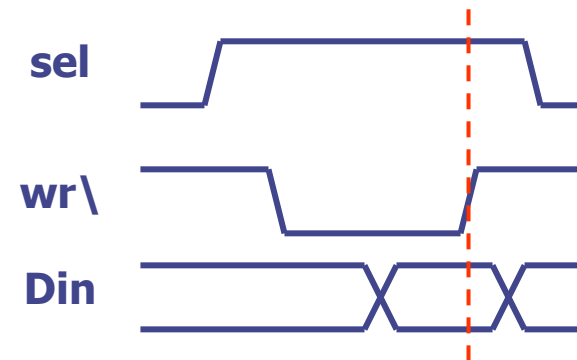
- Uma possível implementação de uma célula de memória é:



**Operação de leitura**



**Operação de escrita**



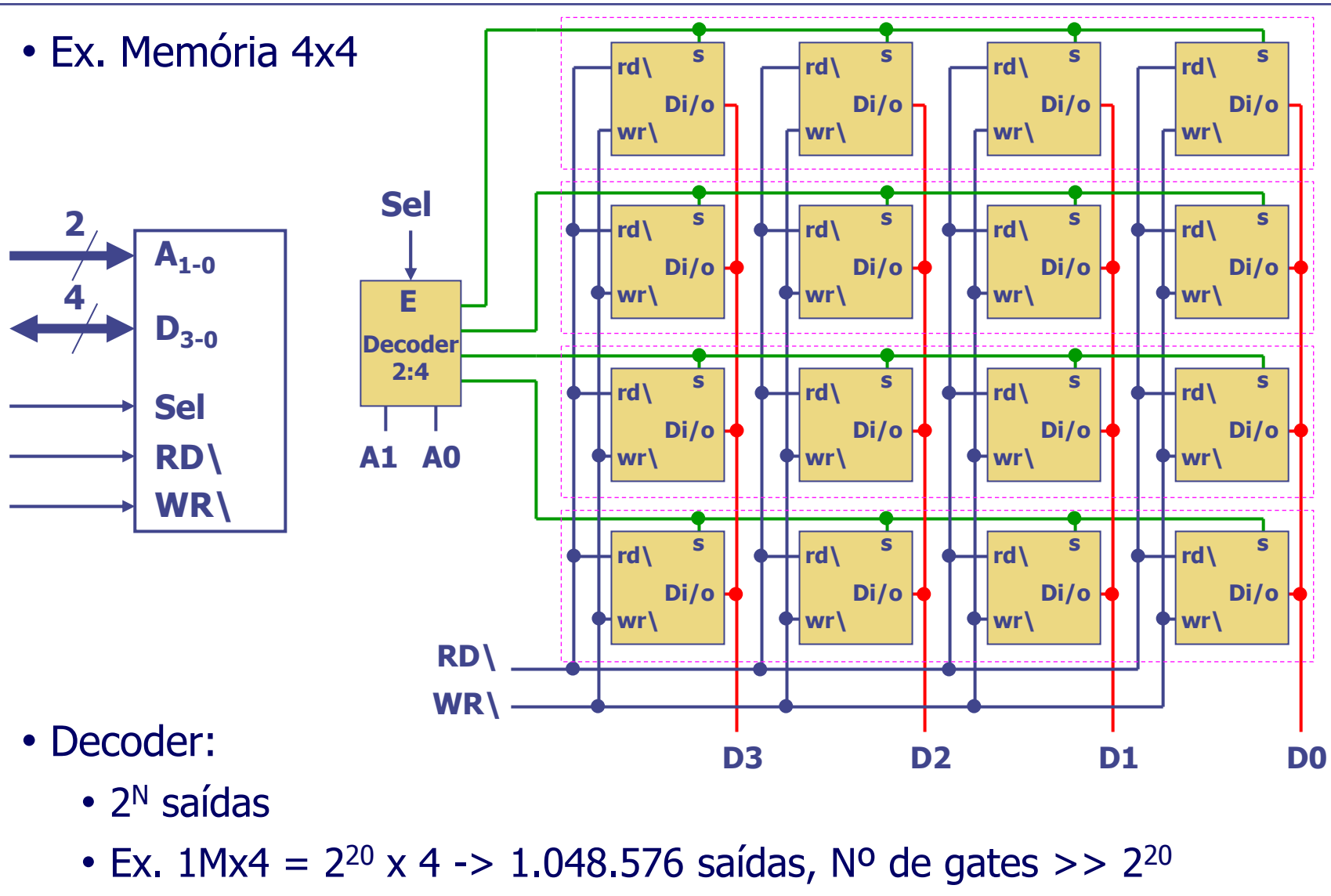
# Agrupamento de células de memória

- Através do agrupamento de células-base pode formar-se uma memória de maior dimensão
- O que é necessário especificar:
  - O **número total de Words (N)** que a memória pode armazenar
  - O **Word size (K = 1, 4, 8, 16, 32, ...)**  
(Número total de bits = word size \* n<sup>o</sup> words)
- Exemplos:
- 1k x 8
  - 8 bits / word
  - $1k = 2^{10} \rightarrow 10$  linhas de endereço  $\rightarrow 1.024$  endereços
- 1M x 4
  - 4 bits / word
  - $1M = 2^{20} \rightarrow 20$  linhas de endereço  $\rightarrow 1.048.576$  endereços



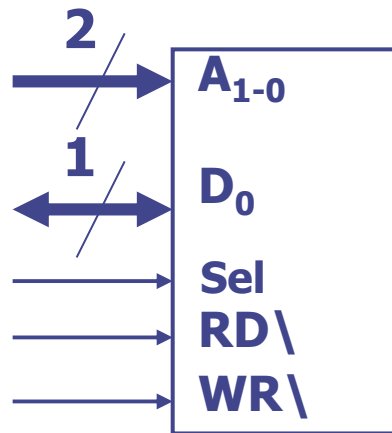
# Organização 2D

- Ex. Memória 4x4

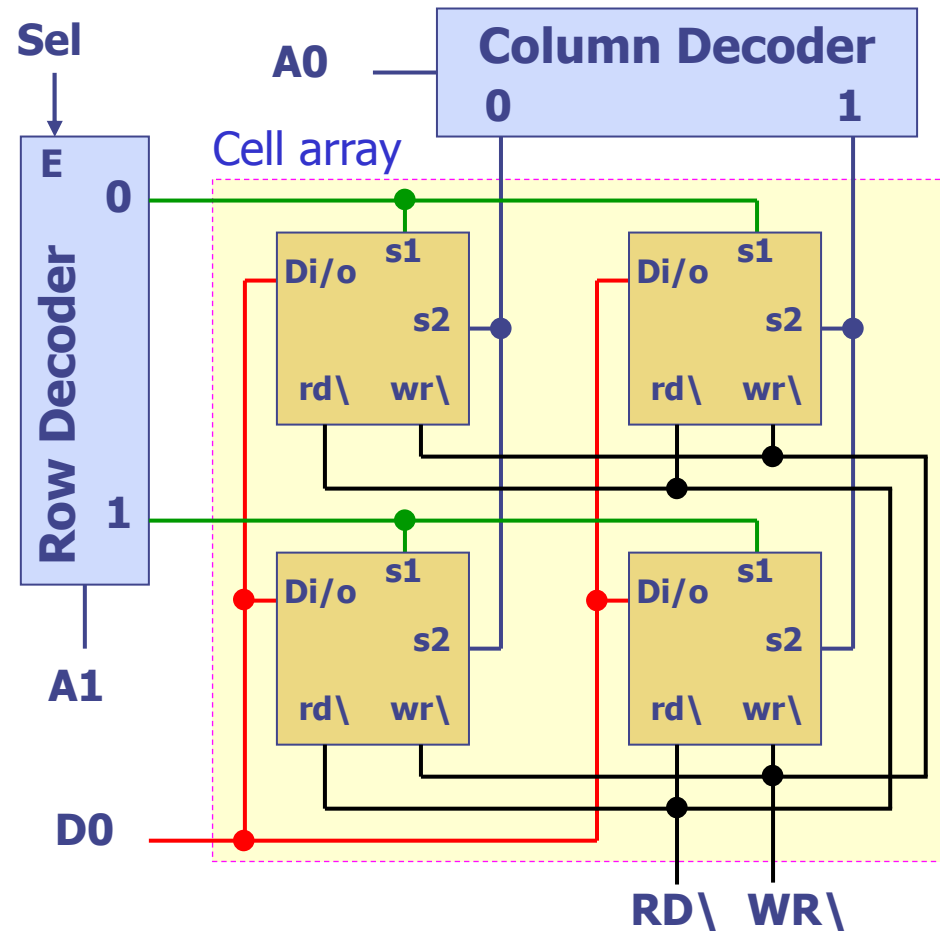


# Organização em matriz (conceito)

- Ex. Memória 4x1



(Célula seleccionada:  $S1.S2=1$ )



Q1. E se a memória fosse de 16x1? e se fosse 8x1? e 1Mx1?

Q2. E se a memória fosse de 4x2? E se fosse 4x4?

# Memória do tipo RAM (volátil)

- **SRAM – Static RAM**

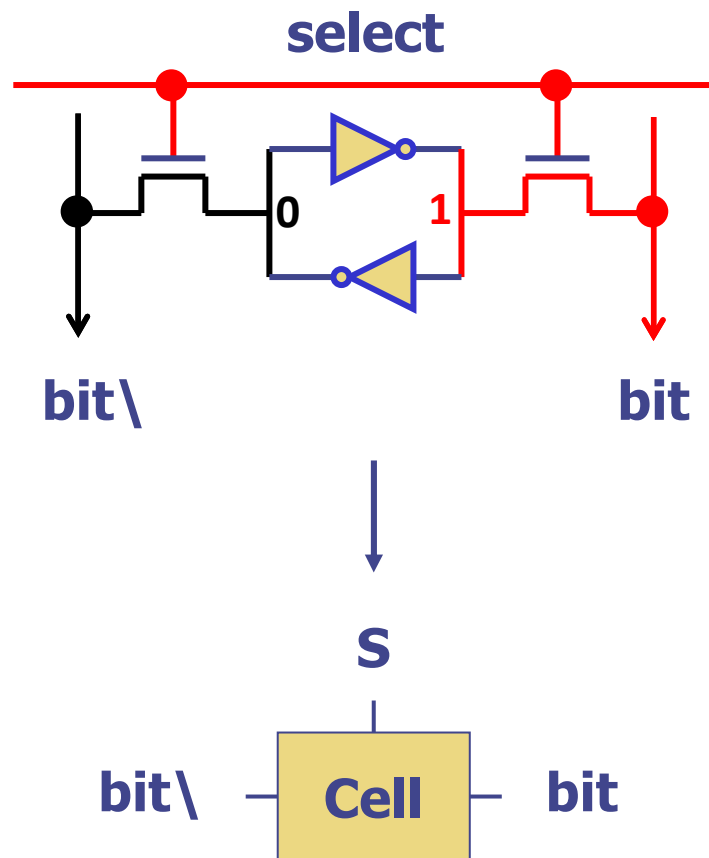
- Vantagens:
  - Rápida
  - Informação permanece até que a alimentação seja cortada
- Inconvenientes:
  - Implementações típicas: 6 transistores / célula
  - Baixa densidade, elevada dissipação de potência
  - Custo/bit elevado

- **DRAM – Dynamic RAM**

- Vantagens:
  - Implementações típicas: (1 transistor + 1 condensador) / célula
  - Alta densidade, baixa dissipação de potência
  - Custo/bit baixo
- Inconvenientes:
  - Informação permanece apenas durante alguns mili-segundos (necessita de *refresh* regular – daí a designação "dynamic")
  - Mais lenta (pelo menos 1 ordem de grandeza) que a SRAM

# RAM estática (SRAM)

- 6 transístores / célula



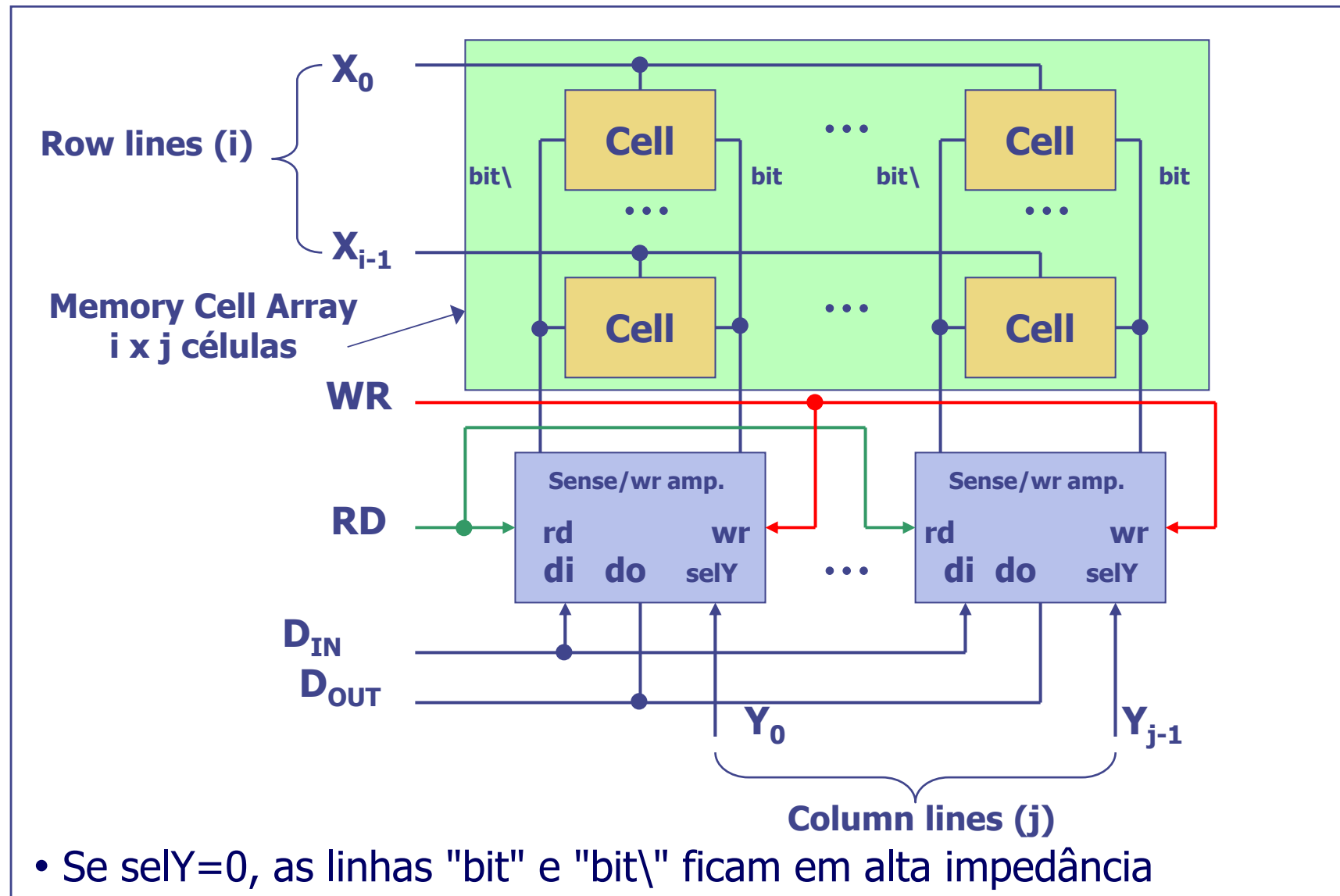
- **Write**

- Colocar a informação em "bit" (e "bit\'"). Exemplo: para a escrita do valor lógico "1" – "bit"=1, "bit\'=0
- Ativar a linha "select"

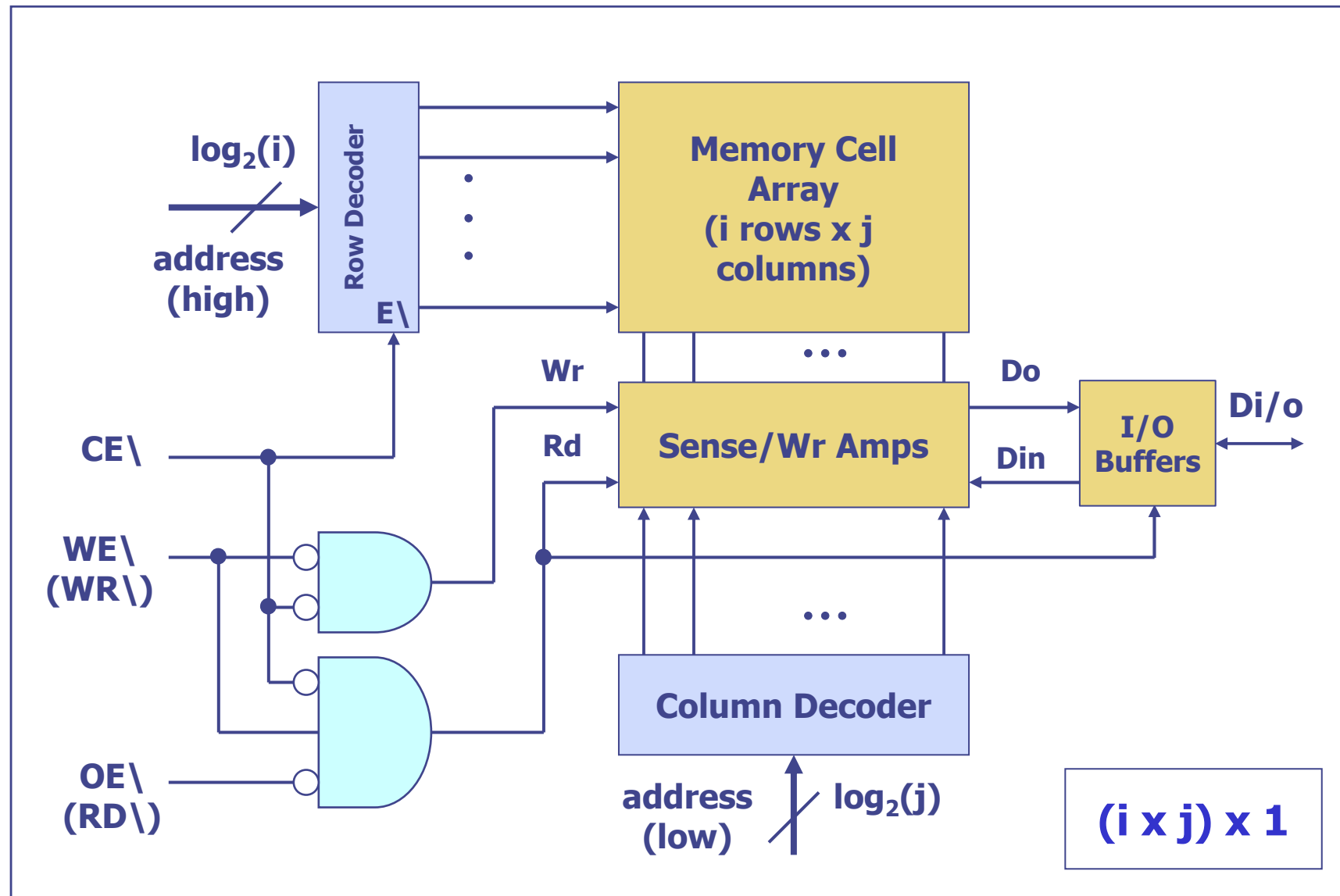
- **Read**

- Ativar a linha "select"
- O valor lógico armazenado na célula é detetado pela diferença de tensão entre as linhas "bit" e "bit\'"

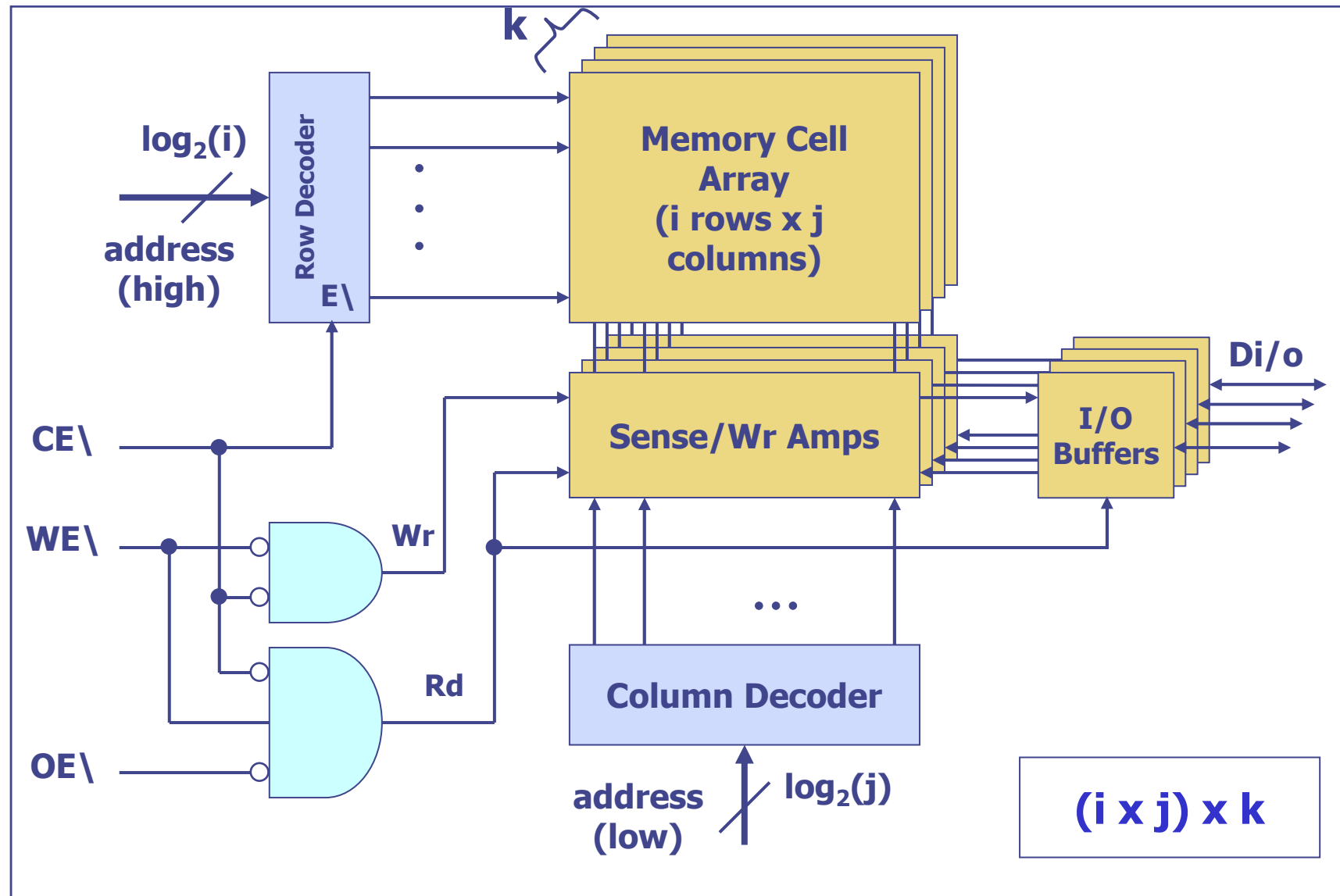
# SRAM - Organização interna



# SRAM - Organização interna

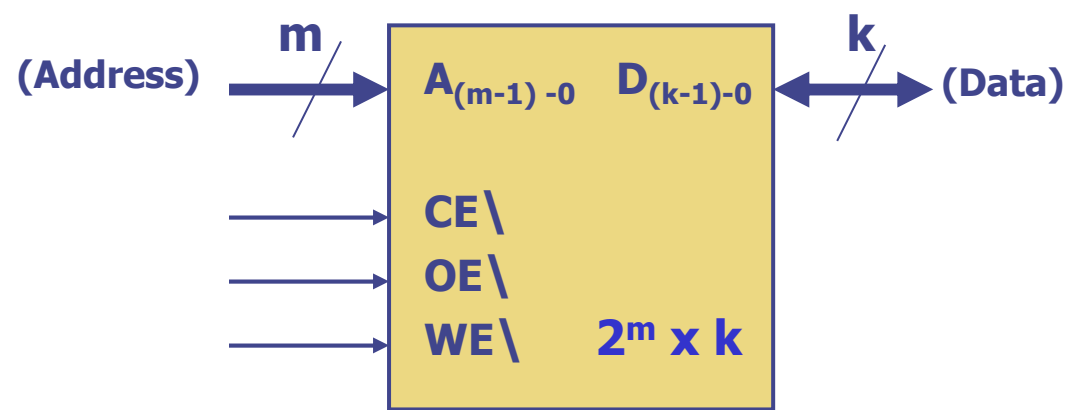


# SRAM - Organização interna



# SRAM - Bloco funcional

- Diagrama lógico (interface assíncrona)



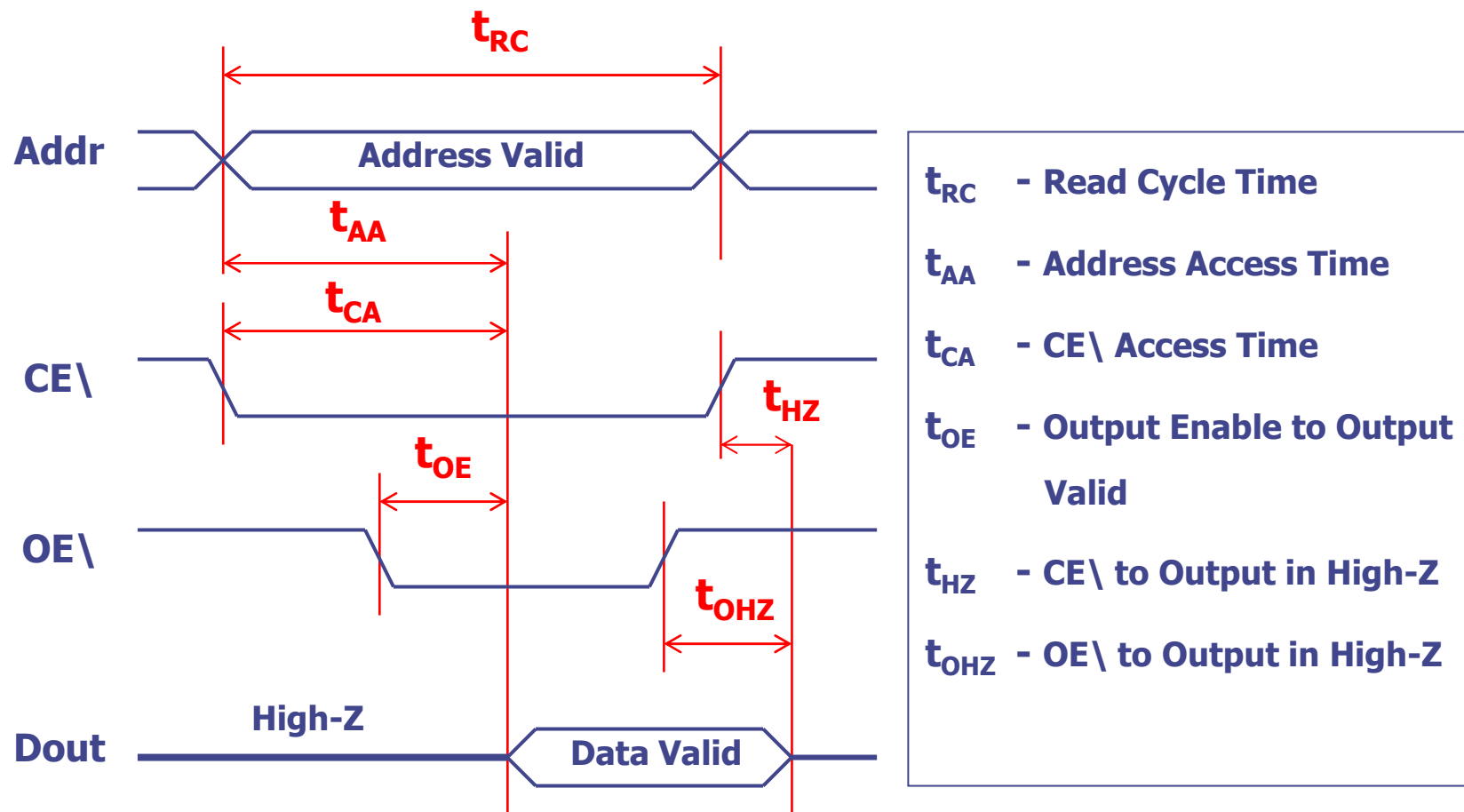
- Tabela de verdade

CE\	OE\	WE\	Operação
1	X	X	High-Z
0	1	1	High-Z
0	X	0	Escrita
0	0	1	Leitura



# SRAM – Ciclo de Leitura

- Diagrama temporal típico de um ciclo de leitura de uma memória SRAM (interface assíncrona)



## SRAM – Ciclo de leitura

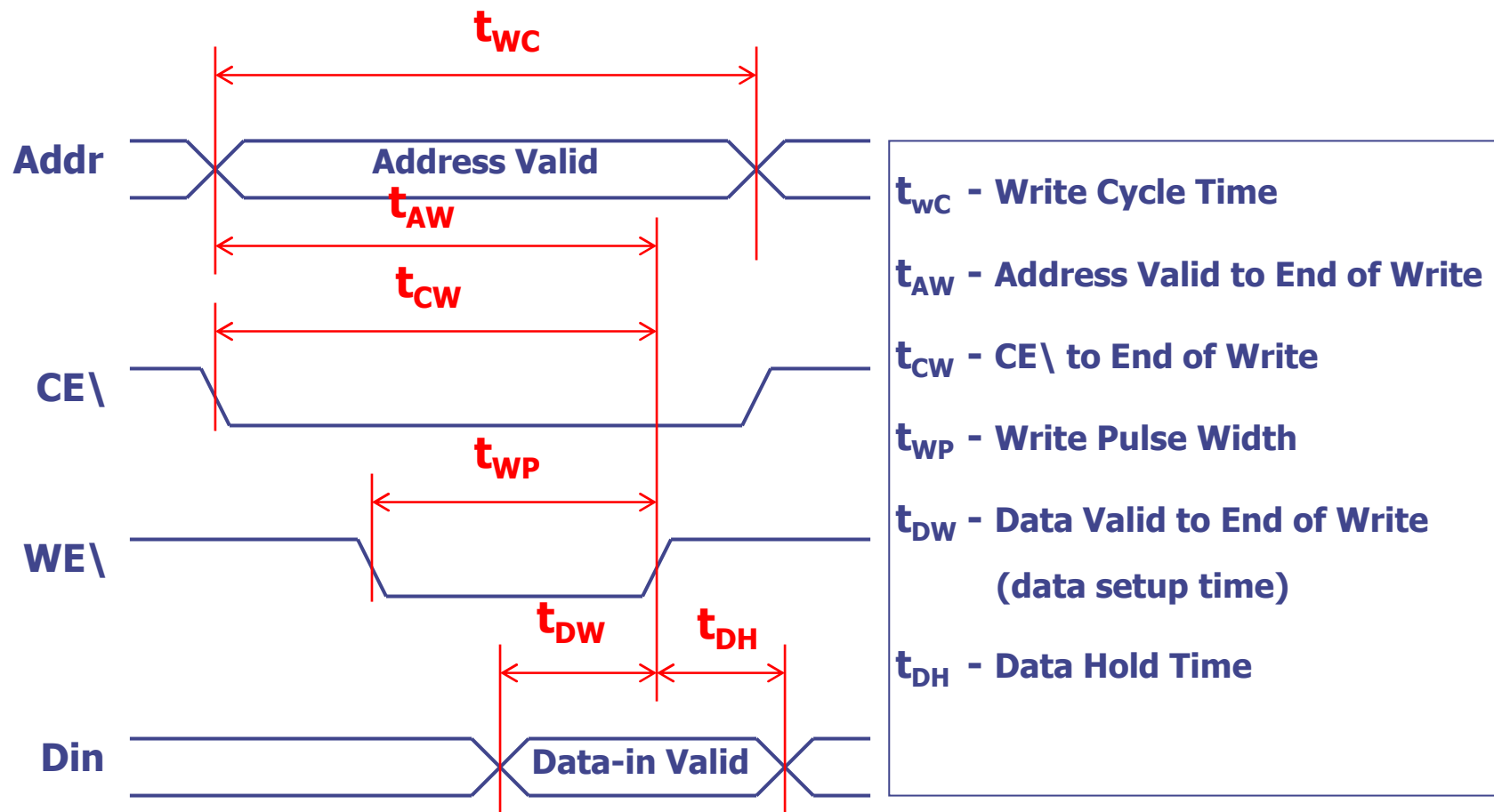
- Valores indicativos (em ns) dos parâmetros associados a um ciclo de leitura de uma memória SRAM:

Parameter	Symbol	Min.	Max.
Read Cycle Time	$t_{RC}$	1.5	
Address Access Time	$t_{AA}$		1.5
CE\ Access Time	$t_{CA}$		1.5
Output Enable to Output Valid	$t_{OE}$		0.7
CE\ to Output in High-Z	$t_{HZ}$		0.6
OE\ to Output in High-Z	$t_{OHZ}$		0.6

- **Cycle Time:** tempo de acesso mais qualquer tempo adicional necessário antes que um segundo acesso possa ter início
- **Access Time:** tempo necessário para os dados ficarem disponíveis no barramento de saída da memória
- **Taxa de transferência:** taxa a que os dados podem ser transferidos de/para uma memória ( $1 / \text{cycle\_time}$ )

## SRAM – Ciclo de Escrita

- Diagrama temporal típico de um ciclo de escrita de uma memória SRAM



## SRAM – Ciclo de Escrita

- Valores indicativos (em ns) dos parâmetros associados a um ciclo de escrita de uma memória SRAM:

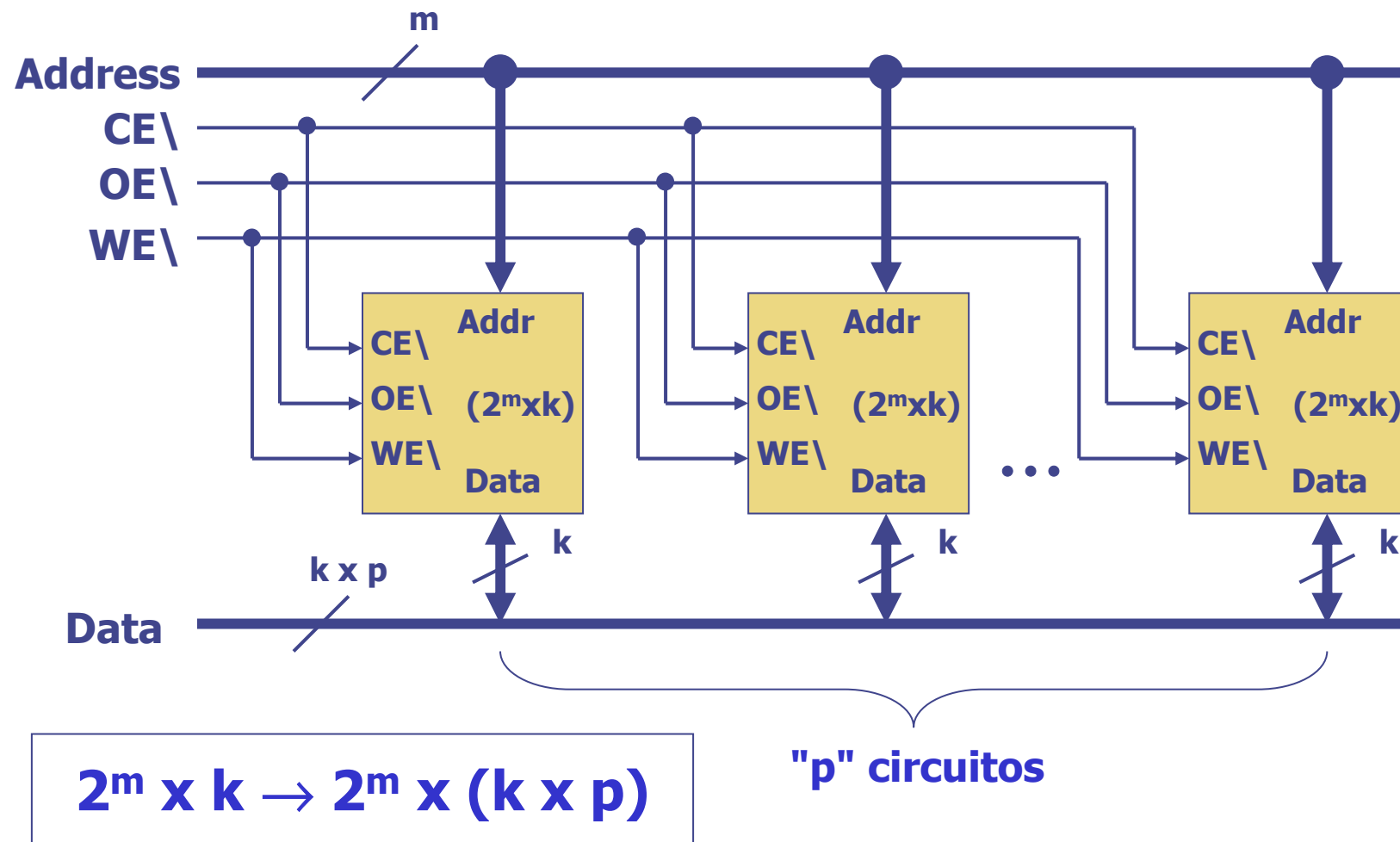
Parameter	Symbol	Min.	Max.
Write Cycle Time	$t_{WC}$	1.5	
Address Valid to End of Write	$t_{AW}$	1.0	
CE\ to End of Write	$t_{CW}$	1.0	
Write Pulse Width	$t_{WP}$	1.0	
Data Valid to End of Write	$t_{DW}$	0.7	
Data Hold Time	$t_{DH}$	0	

# Aumento da capacidade de armazenamento

- É frequente ter-se necessidade de memórias com uma capacidade de armazenamento superior à capacidade individual dos circuitos disponíveis comercialmente
- Nessa situação recorre-se à construção de módulos de memória que resultam do agrupamento de circuitos de acordo com o aumento pretendido
- Assim, a construção de um módulo de memória pode envolver as duas fases seguintes, ou apenas uma delas, em função dos circuitos disponíveis e dos requisitos finais de armazenamento:
  - **Aumento da dimensão da palavra.** Exemplo: a partir de C.I.s de 32Kx1, construir uma memória de 32Kx8
  - **Aumento do número total de posições de memória.** Exemplo: a partir de C.I.s de 32Kx8, construir uma memória de 256Kx8

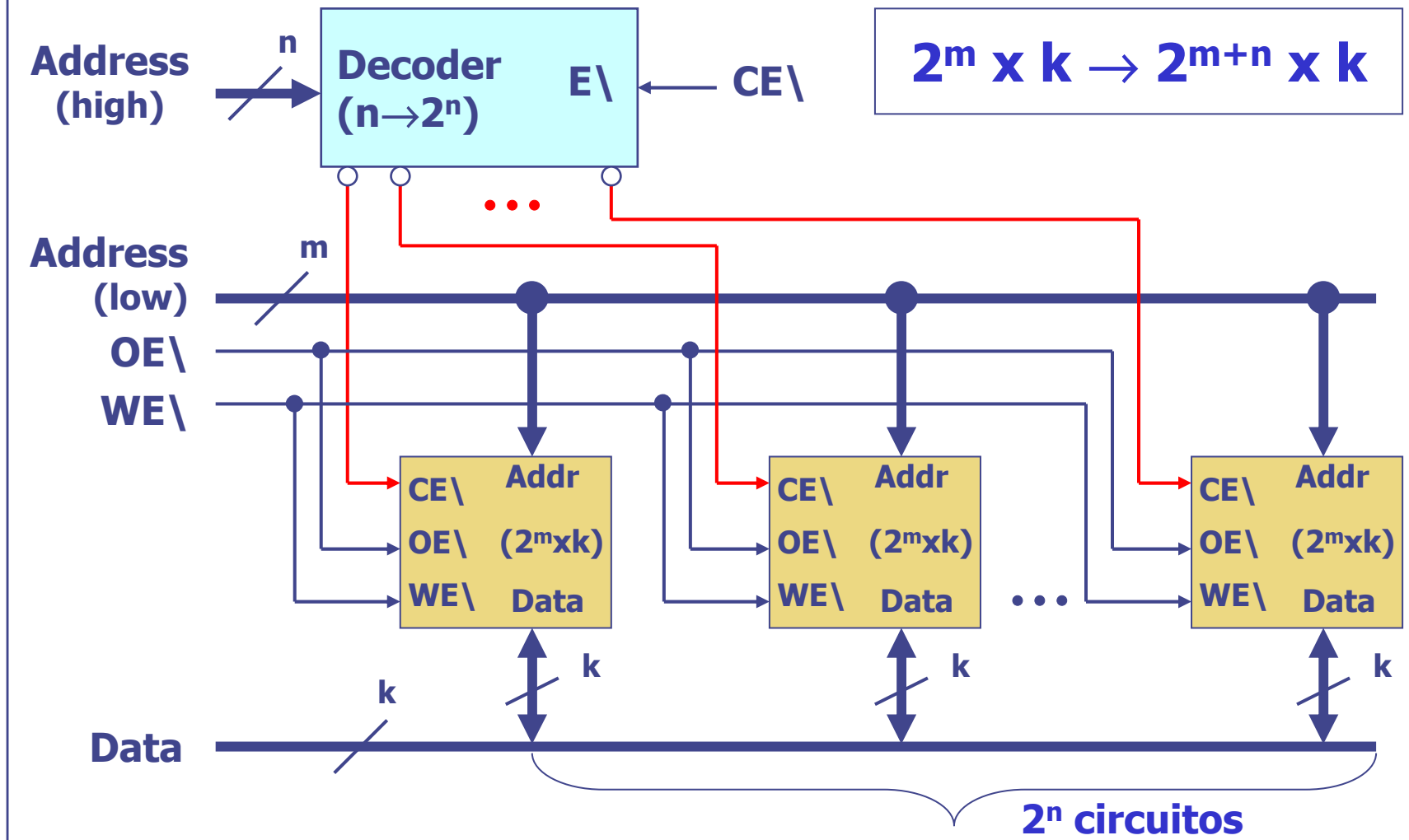
# Módulo de memória SRAM

- Aumento da dimensão da palavra



# Módulo de memória SRAM

- Aumento do número total de posições de memória



# Memória do tipo RAM (volátil)

- **SRAM – Static RAM**

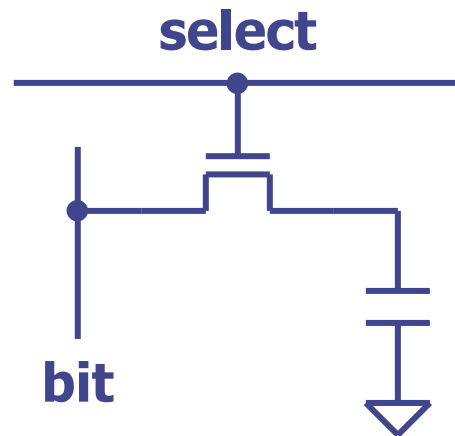
- Vantagens:
  - Rápida
  - Informação permanece até que a alimentação seja cortada
- Inconvenientes:
  - Implementações típicas: 6 transistores / célula
  - Baixa densidade, elevada dissipação de potência
  - Custo/bit elevado

- **DRAM – Dynamic RAM**

- Vantagens:
  - Implementações típicas: (1 transistor + 1 condensador) / célula
  - Alta densidade, baixa dissipação de potência
  - Custo/bit baixo
- Inconvenientes:
  - Informação permanece apenas durante alguns mili-segundos (necessita de *refresh* regular – daí a designação "dynamic")
  - Mais lenta (pelo menos 1 ordem de grandeza) que a SRAM

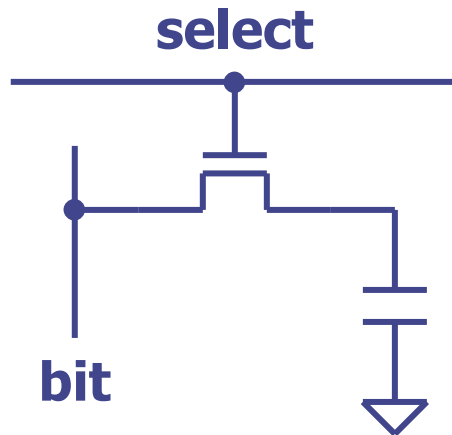


# RAM Dinâmica (DRAM)



- Condensador com uma capacidade muito pequena (dezenas de fF ( $1 \text{ fF} = 10^{-15} \text{ F}$ ))
- Na ausência de leitura, o condensador descarrega "lentamente"
- Informação permanece na célula apenas durante alguns milissegundos
- É obrigatório fazer o refrescamento ("refresh") periódico da carga do condensador
- A operação de leitura é destrutiva (descarrega o condensador)
- Após uma operação de leitura é necessário repor a carga no condensador

# RAM Dinâmica (DRAM)



- **Write**

- Colocar dado na linha "bit"
- Ativar a linha "select"

- **Read**

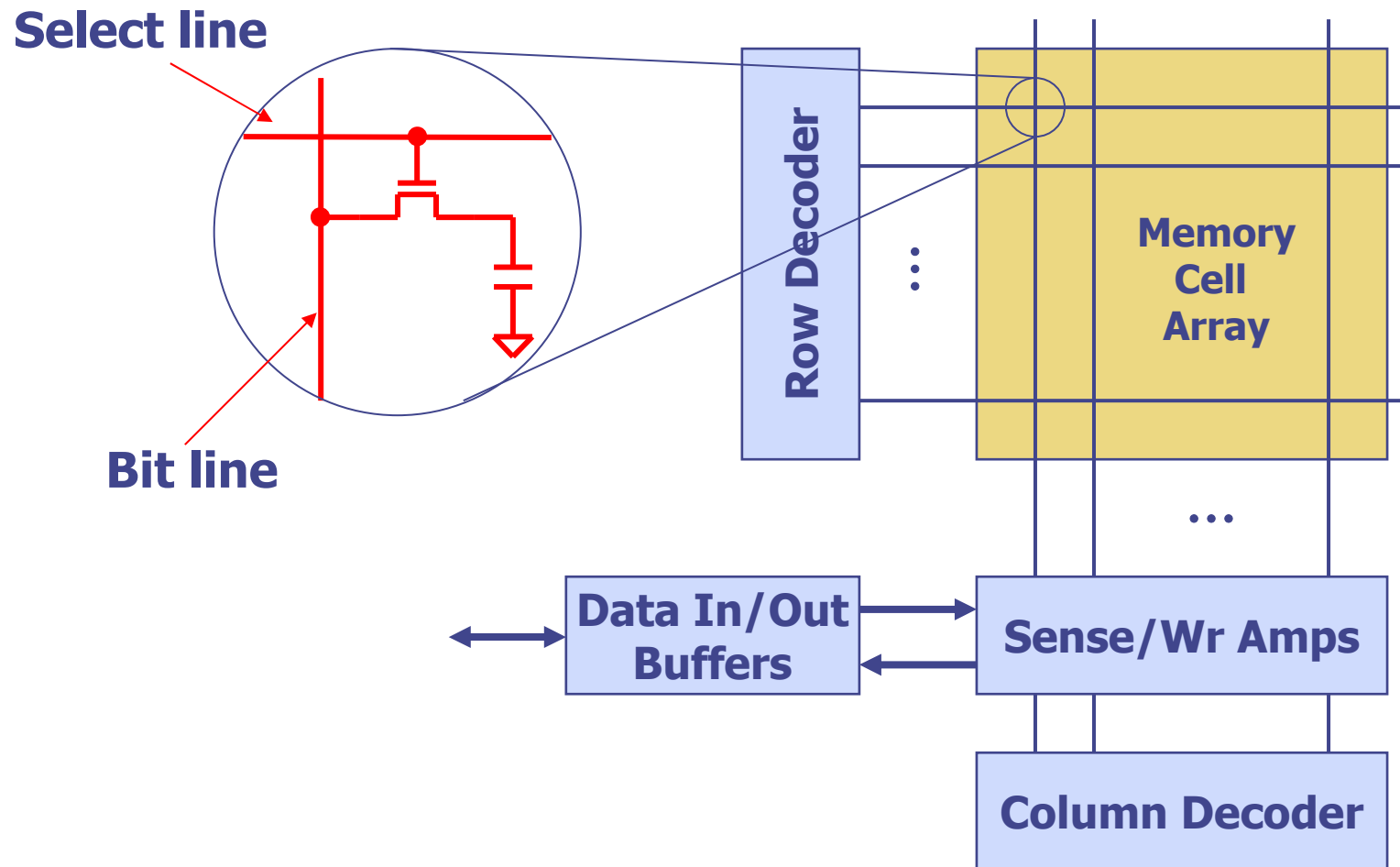
- Pre-carregar a linha "bit" a  $VDD/2$
- Ativar a linha "select"
- Valor lógico detetado pela diferença de tensão na linha bit, relativamente a  $VDD/2$
- Restauro do valor da tensão no condensador (write)

- **Refresh da célula**

- Operação interna idêntica a uma operação de "Read"

# RAM Dinâmica (DRAM)

- Organização em matriz



# RAM Dinâmica (DRAM)

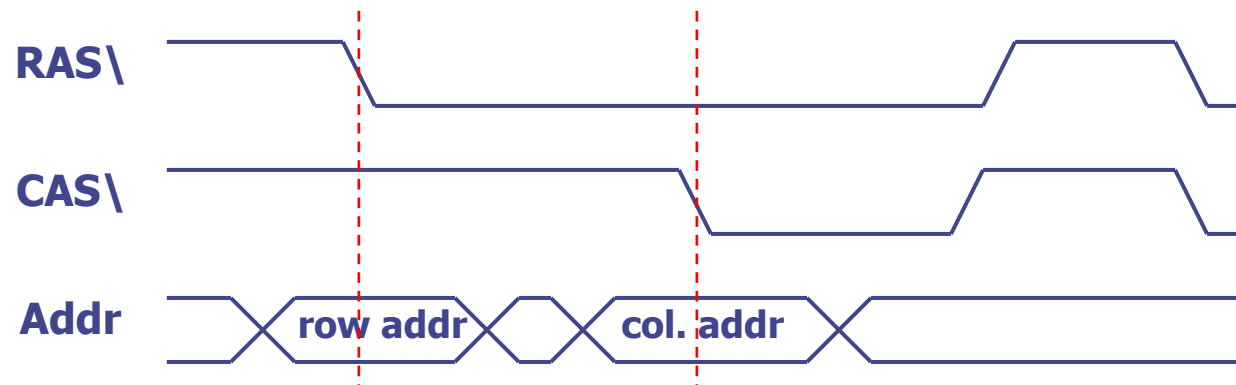
- O endereço de acesso à memória é dividido em 2 partes:

**Address:**

**Row Address**

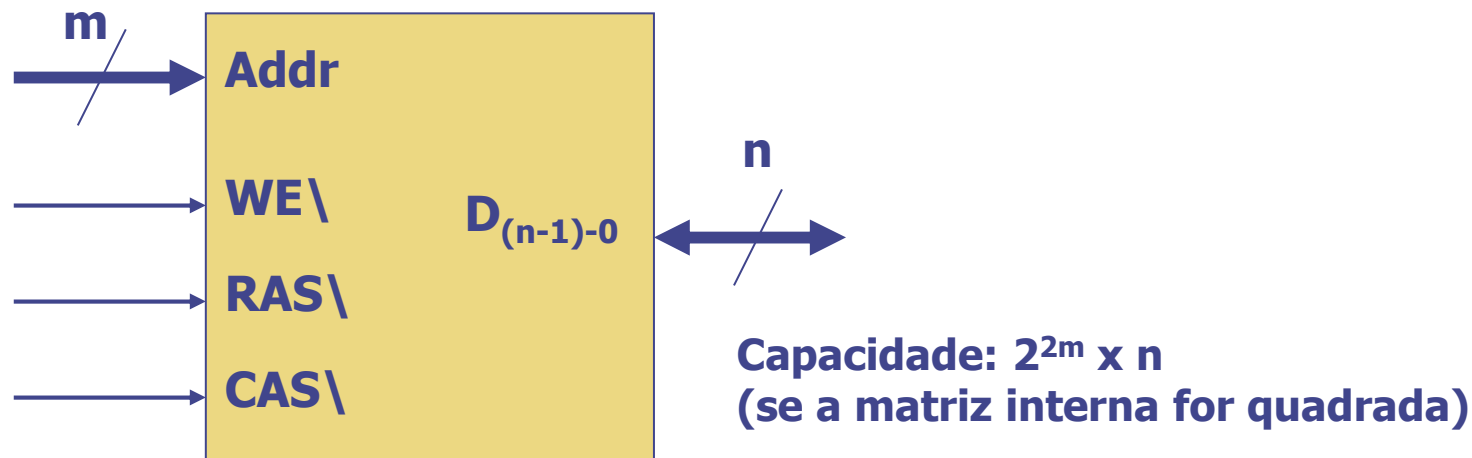
**Column Address**

- O barramento de endereços é multiplexado: primeiro é enviado o **endereços de linha** e depois é enviado o **endereço de coluna**
- A multiplexagem no tempo é feita com 2 strobes independentes
  - **RAS** – Row Address Strobe
  - **CAS** – Column Address Strobe



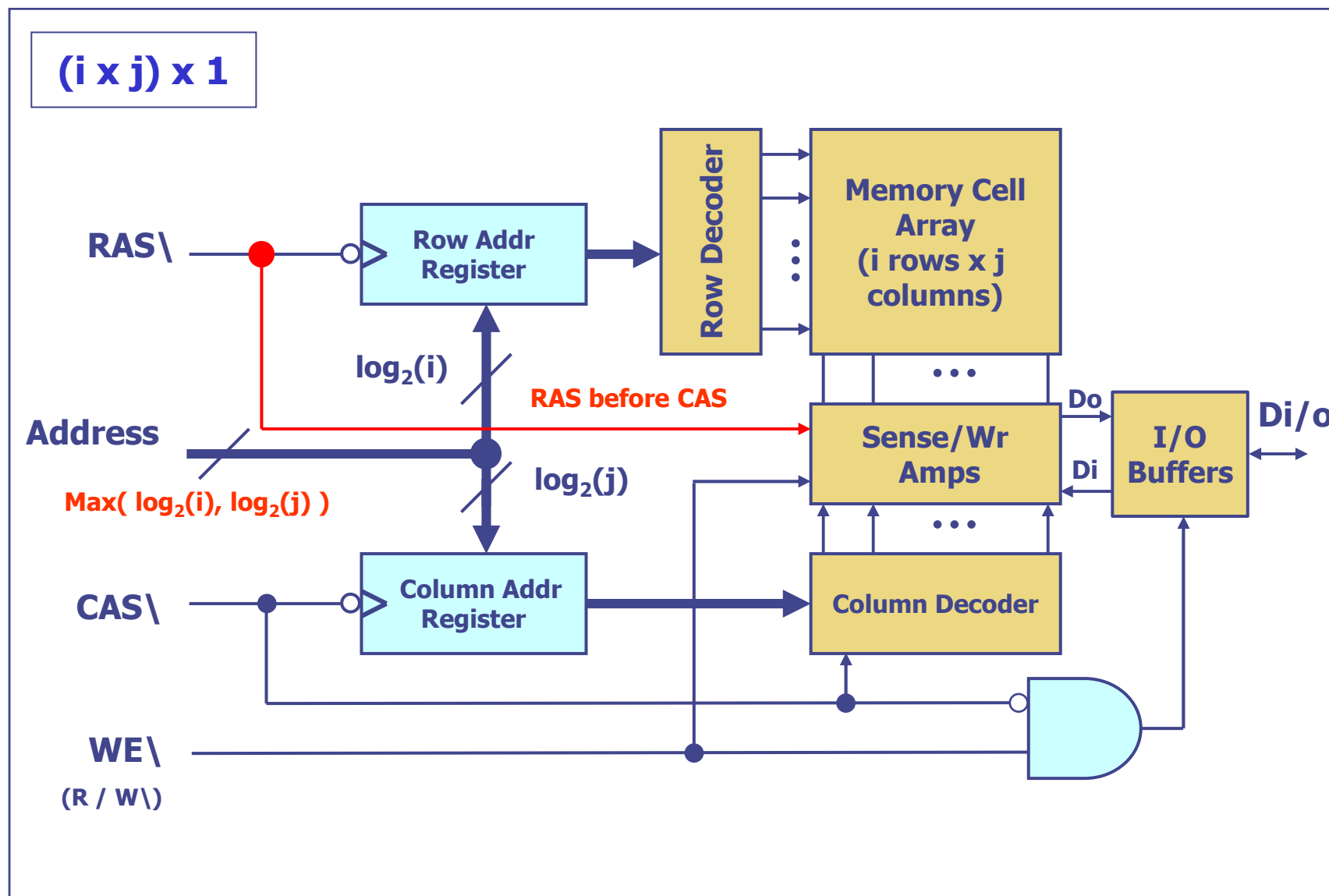
- As transições do RAS e do CAS são usadas para armazenar internamente os endereços de linha e de coluna, respetivamente
- Linha CAS funciona também como "chip-enable"

# DRAM - Diagrama lógico



- $WE\backslash = 0 \rightarrow$  escrita;  $WE\backslash = 1 \rightarrow$  leitura ( $\equiv R/W\backslash$ )
- $RAS\backslash$ : valida endereço da linha na transição descendente
- $CAS\backslash$ : valida endereço da coluna na transição descendente

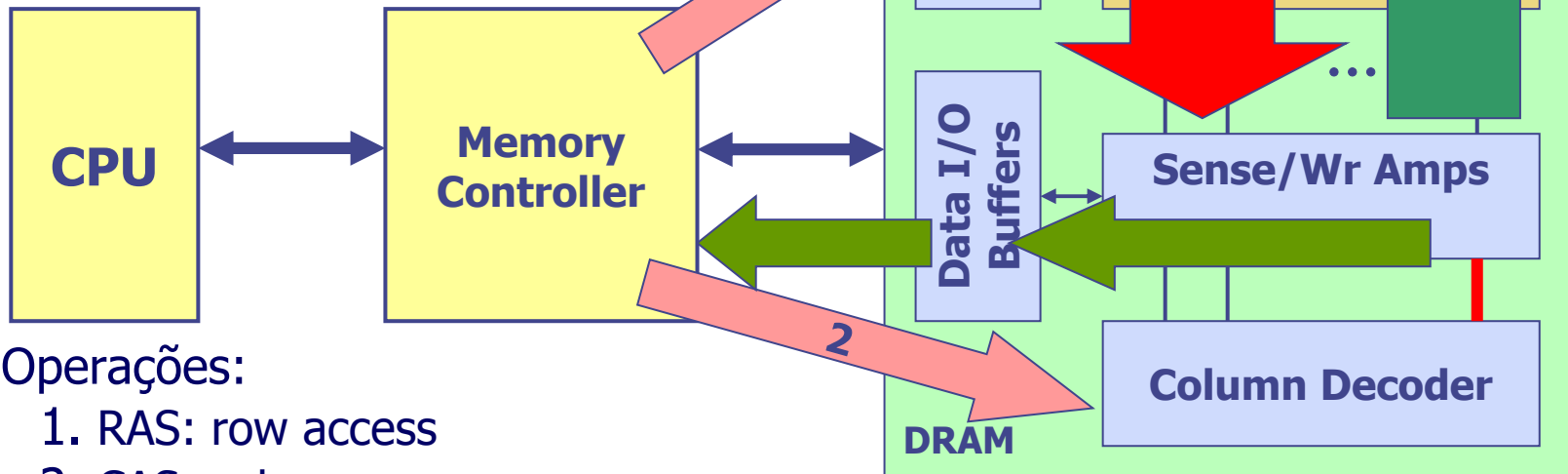
# DRAM – Diagrama de blocos conceptual



# DRAM – Leitura

- Memory controller:

- gera todos sinais de interface com a memória: RAS, CAS e WE
- a partir do endereço gerado pelo CPU faz a gestão da multiplexagem do ciclo de endereçamento
- executa, periodicamente, as operações de *refresh*



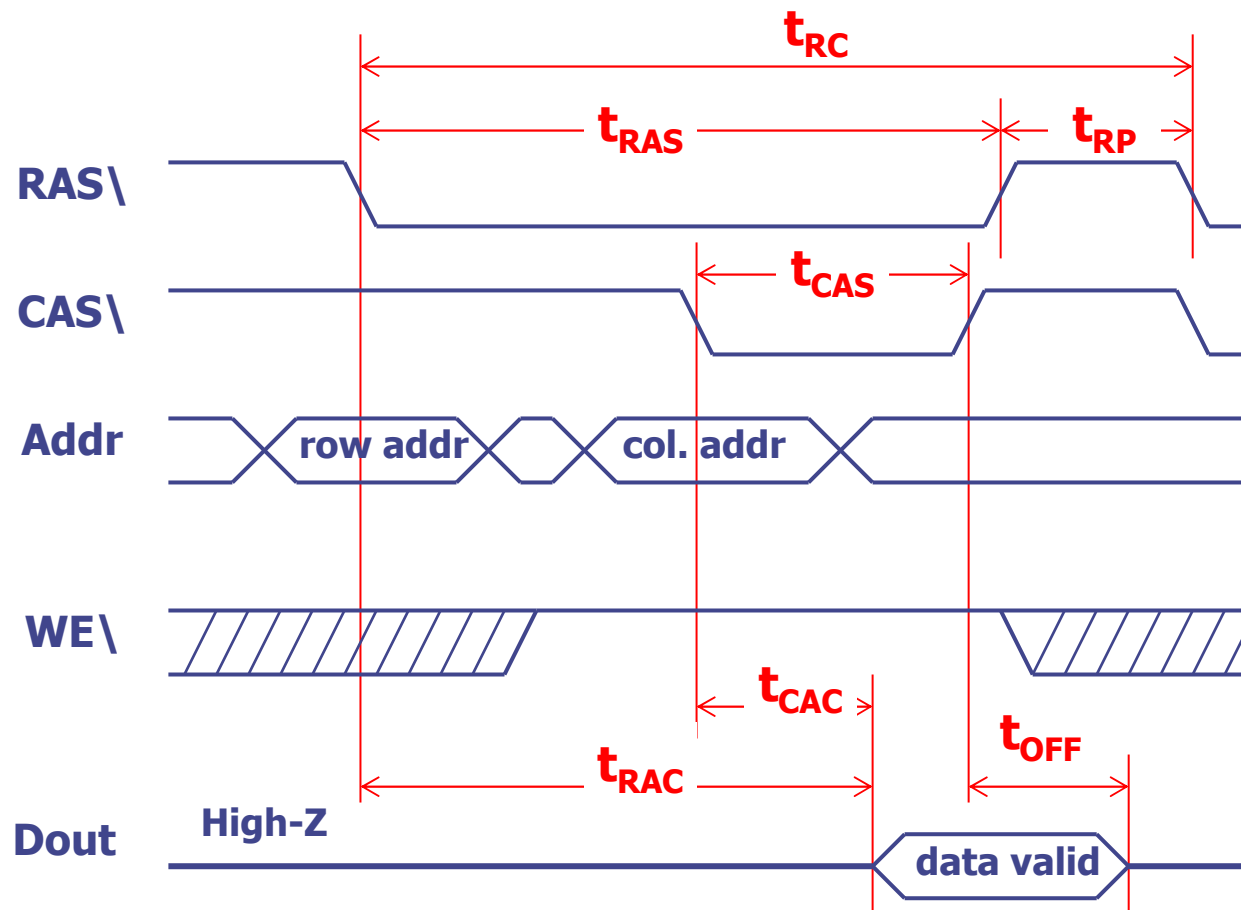
- Operações:

1. RAS: row access
2. CAS: column access

- Buffer de linha (*row buffer*) armazena temporariamente todos os bits de uma linha de células da matriz

# DRAM – Ciclo de Leitura

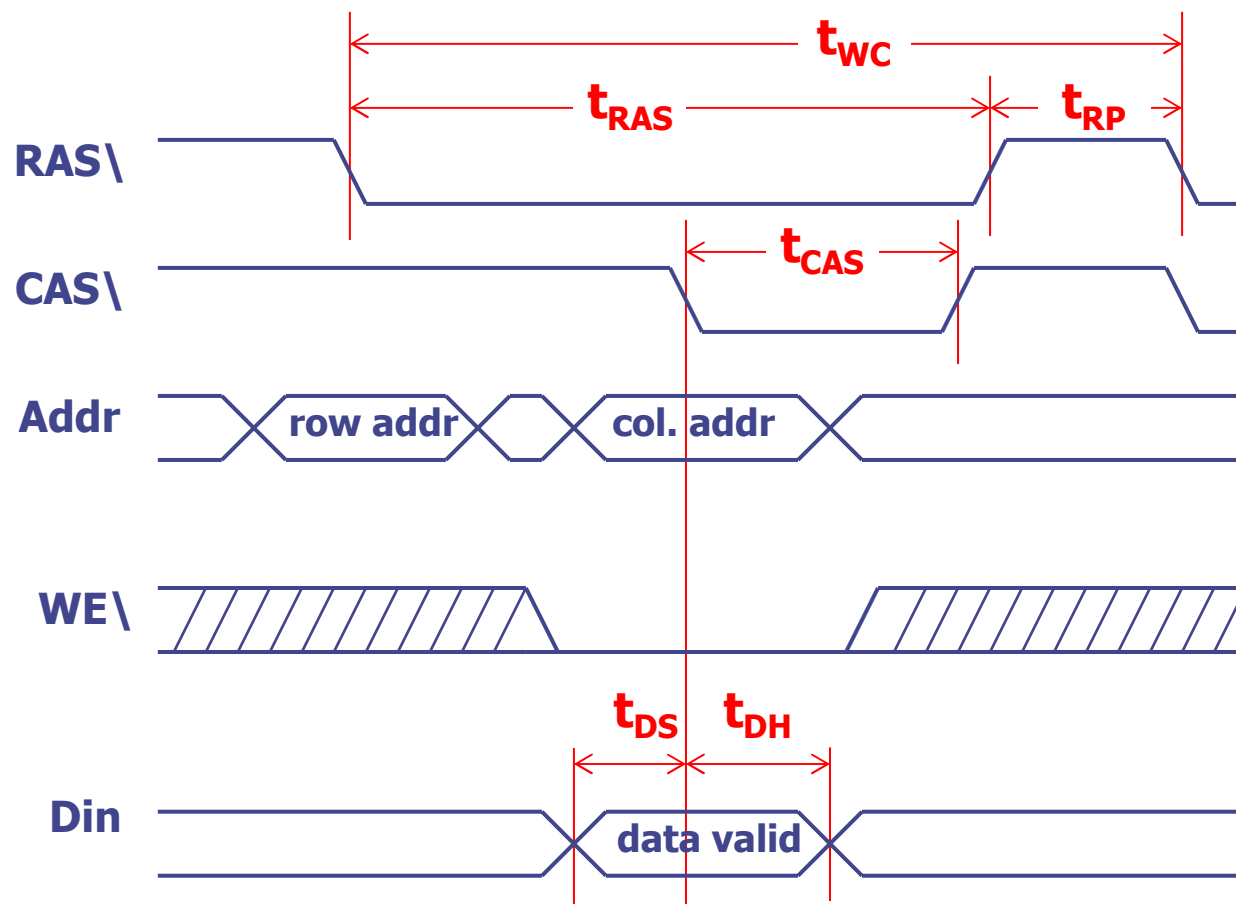
- Diagrama temporal típico de um ciclo de leitura de uma memória DRAM





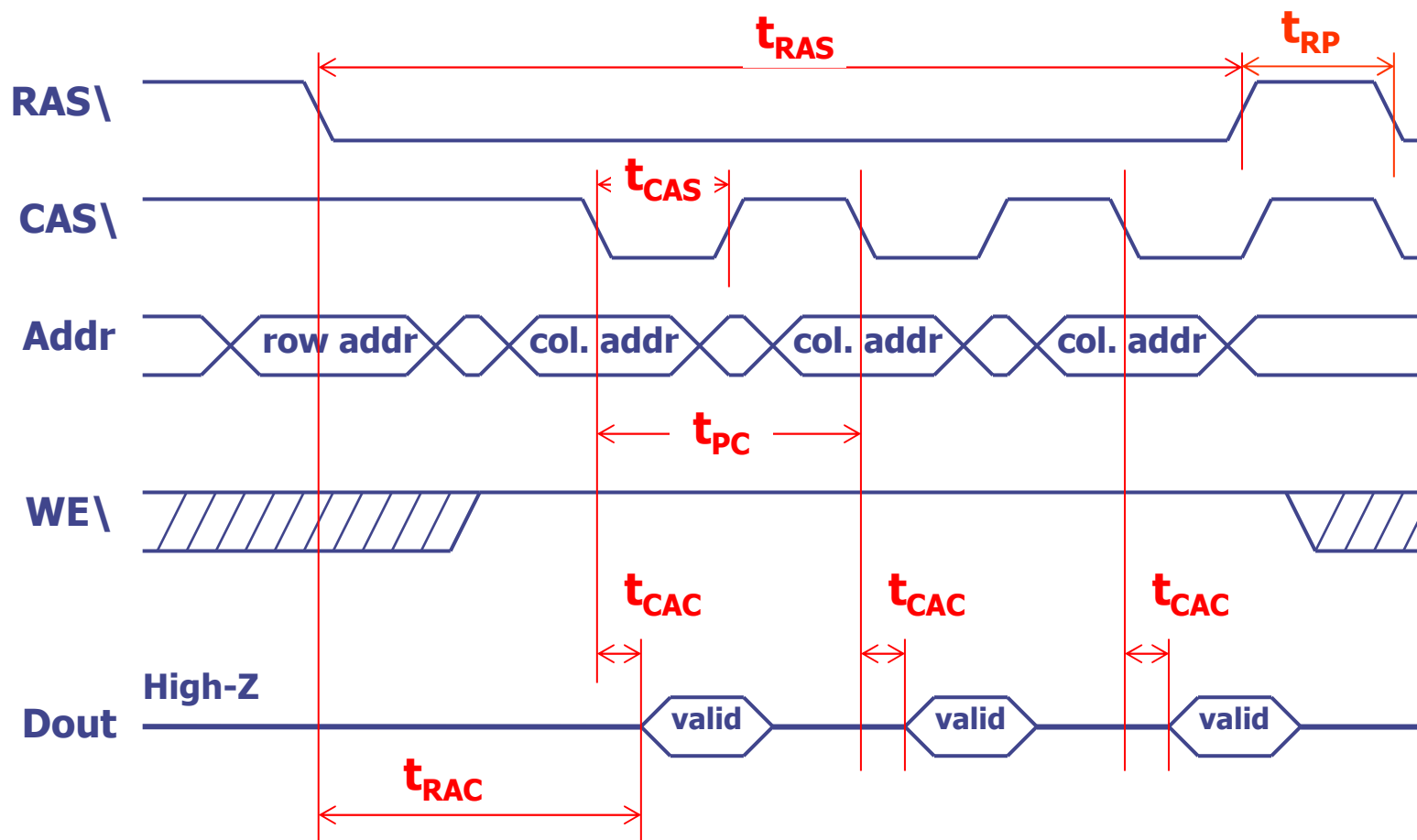
# DRAM – Ciclo de Escrita

- Diagrama temporal típico de um ciclo de escrita (*early write*) de uma memória DRAM

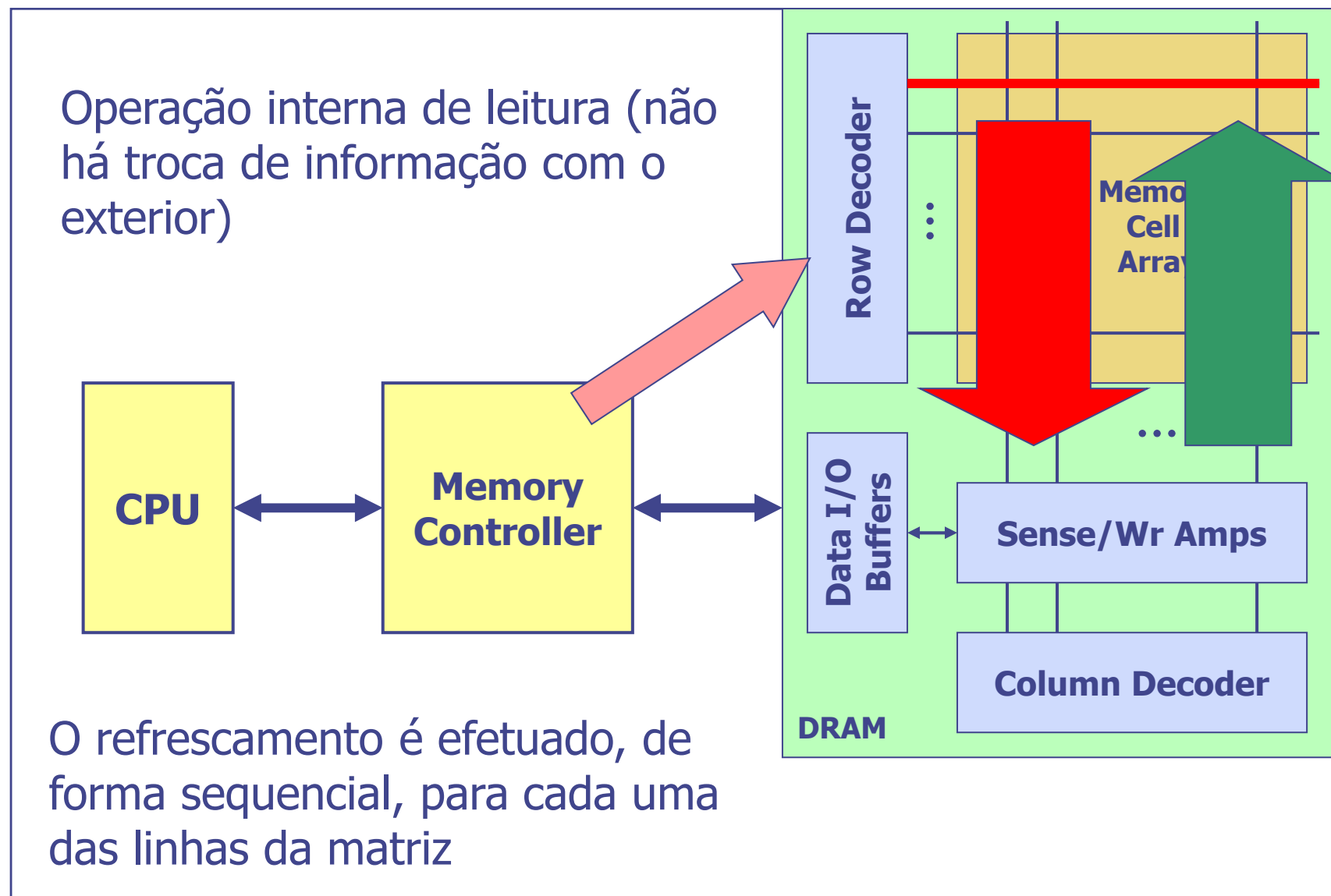


## DRAM – Ciclo de Leitura em *page mode*

- Diagrama temporal típico de um ciclo de leitura de uma memória DRAM, em modo paginado (*page mode*)

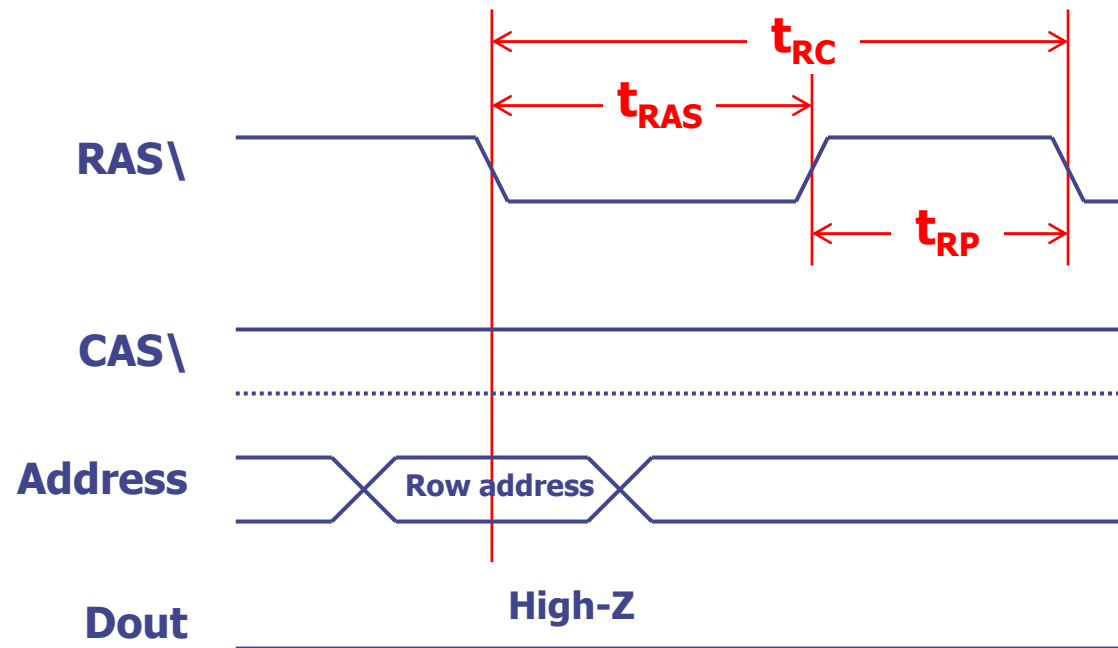


# DRAM – Refrescamento



# DRAM Refresh – RAS Only

- O *refresh* é feito simultaneamente em **todas as células da mesma linha da matriz** (especificada no address bus, no momento da ativação do sinal RAS\)
- O sinal CAS\ mantém-se inativo durante o processo



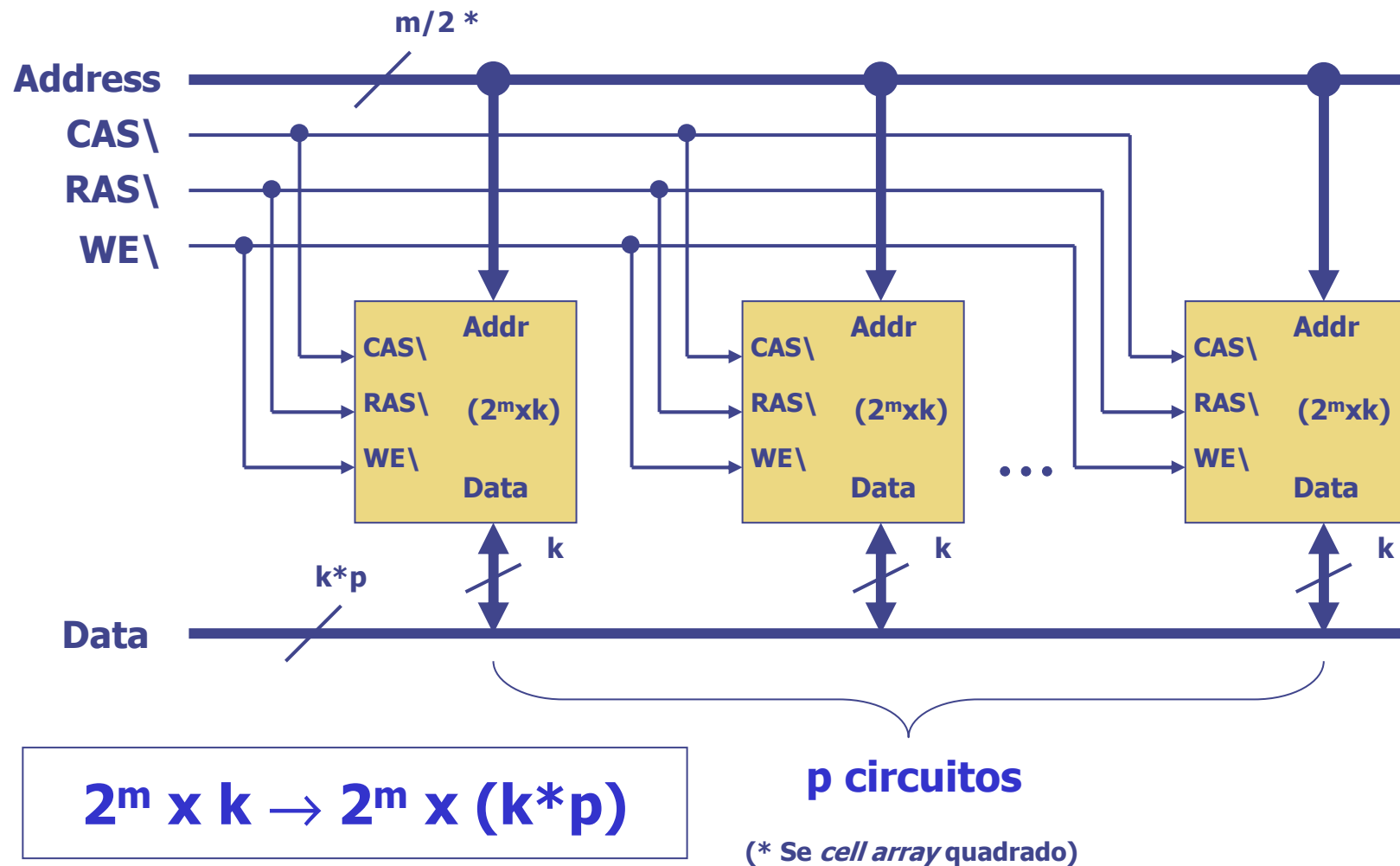
# DRAM - Parâmetros principais

- Valores indicativos (em ns) dos tempos indicados nos diagramas temporais de leitura e escrita de uma memória DRAM com um tempo de acesso de 55 ns:

Parameter	Symbol	Min.	Max.
Read or Write Cycle Time	$t_{RC}$	100	
RAS\ precharge time	$t_{RP}$	45	
Page mode cycle time	$t_{PC}$	35	
RAS\ pulse width	$t_{RAS}$	55	10000
CAS\ pulse width	$t_{CAS}$	28	10000
Data-in setup time	$t_{DS}$	5	
Data-in hold time	$t_{DH}$	14	
Output buffer turn-off delay	$t_{OFF}$		15
Access time from RAS\	$t_{RAC}$		55
Access time from CAS\	$t_{CAC}$		28

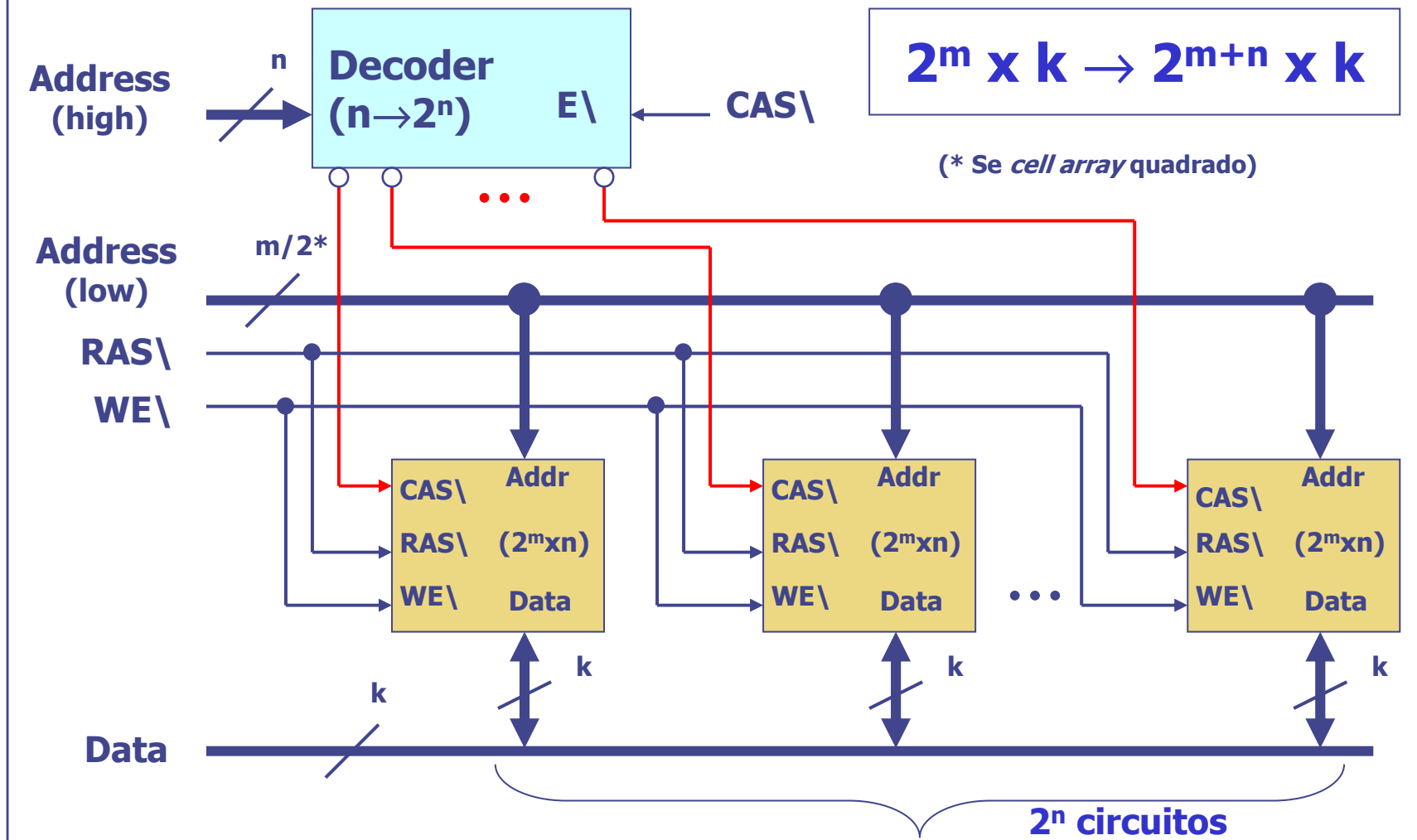
# Módulo de memória DRAM

- Aumento da dimensão da palavra



# Módulo de memória DRAM

- Aumento do número total de posições de memória



# Melhorias de desempenho da DRAM

- **Fast Page Mode**
  - Adiciona sinais de temporização que permitem acessos repetidos ao buffer de linha (sem outro tempo de acesso à linha)
- **Synchronous DRAM (SDRAM)**
  - Adiciona um sinal de relógio à interface DRAM, para facilitar a sincronização de transferências múltiplas
  - Múltiplos bancos, cada um com o seu buffer de linha
- **Double Data Rate (DDR SDRAM)**
  - Transferência de dados tanto no flanco ascendente como no flanco descendente do sinal de relógio (duplica a taxa de transferência de pico)
  - Versão atual: DDR5 (2021->). Exemplo: DDR4-6400, 6400 Milhões de transferências por segundo, relógio de 3.2 GHz
- Estas técnicas melhoram a largura de banda, mas não a latência