

CIRCUITOS DIGITAIS

MÁQUINAS DE ESTADO

Prof. Marcelo Grandi Mandelli

`mgmandelli@unb.br`

Máquinas de Estados Finitos

□ **EM INGLÊS: FINITE STATE-MACHINE (FSM)**

□ **PROJETO DE CIRCUITOS SEQUENCIAIS**

ESTADO :

CADA “PASSO” DA SEQUENCIA DO CIRCUITO

ARMAZENA UMA “LEMBRANÇA” DO PASSADO DO CIRCUITO.

□ **POSSUI UM NÚMERO FINITO DE ESTADOS**

- A MÁQUINA ESTÁ EM APENAS UM ESTADO POR VEZ, ESTE ESTADO É CHAMADO DE **ESTADO ATUAL**

Máquinas de Estados Finitos

- UTILIZA MEMÓRIA → FLIP-FLOPS
 - A SAÍDA DOS FLIP-FLOPS ARMAZENA O ESTADO ATUAL DO CIRCUITO
- UM CIRCUITO COMBINACIONAL É CONECTADO NA ENTRADA DE CADA FLIP-FLOP PARA DEFINIR O PRÓXIMO ESTADO
- UM CIRCUITO COMBINACIONAL PODE SER UTILIZADO PARA DETERMINAR A(S) SAÍDA(S) DO CIRCUITO

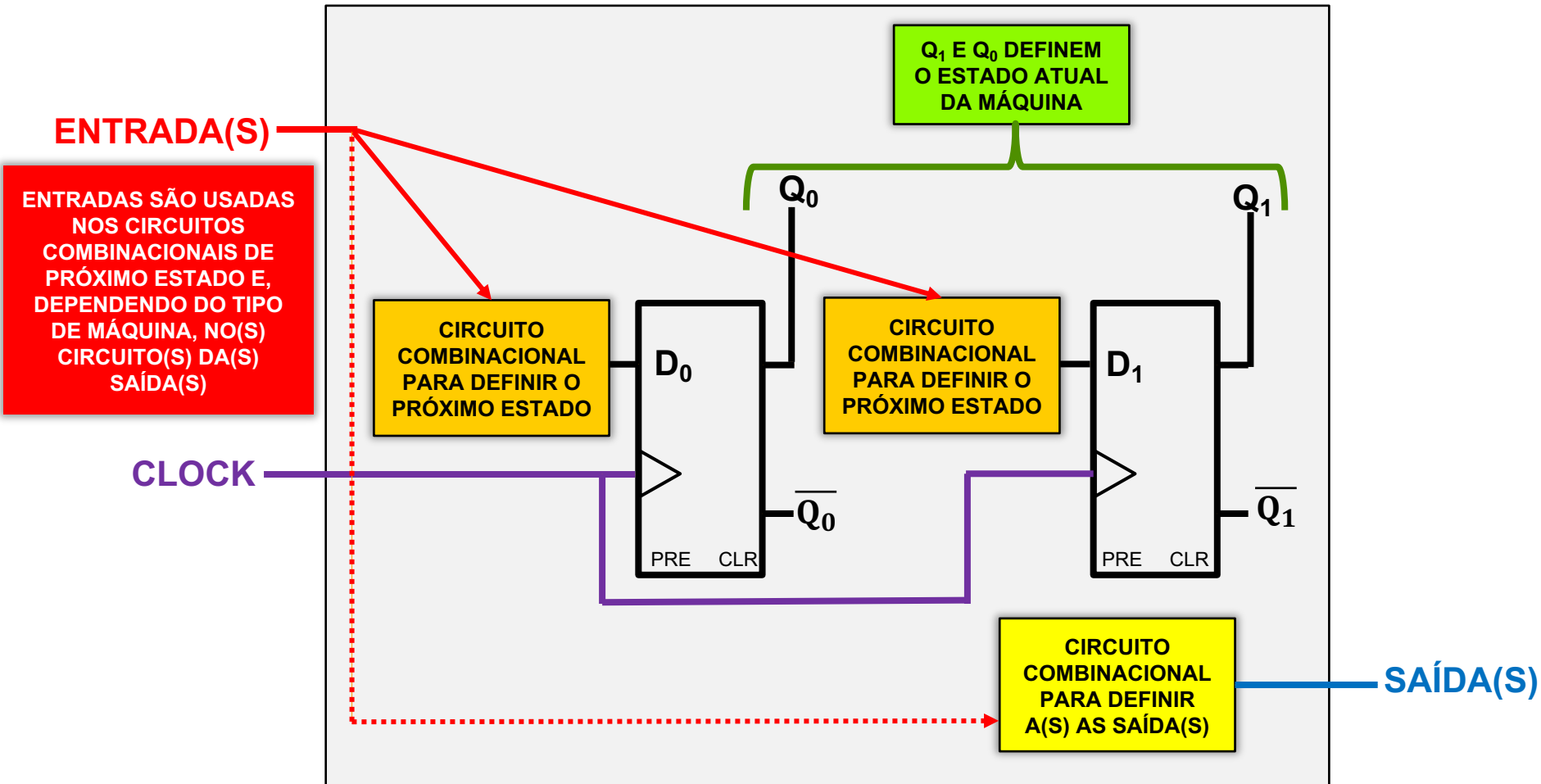
Máquinas de Estados Finitos

- **PROJETO DE CIRCUITOS SEQUENCIAIS SÍNCRONOS**
 - **TODOS OS FLIP-FLOPS UTILIZAM O MESMO SINAL DE CLOCK**
 - **A MÁQUINA MUDA DE ESTADO NA BORDA DO CLOCK**

- **EXISTE PROJETO DE CIRCUITOS SEQUENCIAIS ASSÍNCRONOS, PORÉM É MAIS COMPLEXO**

Máquinas de Estados Finitos

Exemplo de Circuito de uma Máquina de Estados com dois FF D



Máquinas de Estados Finitos

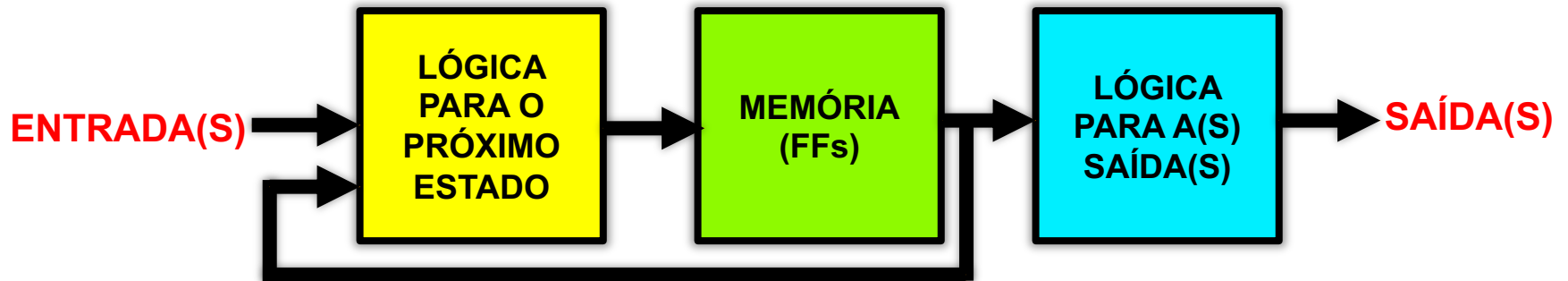
□ Existem dois tipos de Máquinas de Estados:

■ **MÁQUINA DE MOORE**

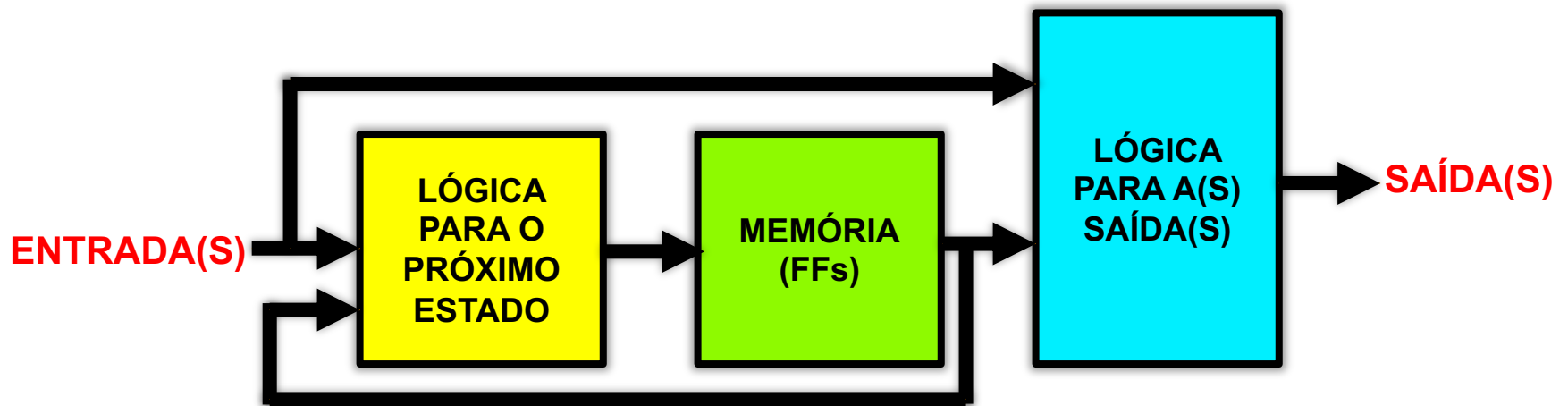
■ **MÁQUINA DE MEALY**

Máquinas de Estados Finitos

MÁQUINA DE MOORE



MÁQUINA DE MEALY



Máquinas de Estados Finitos

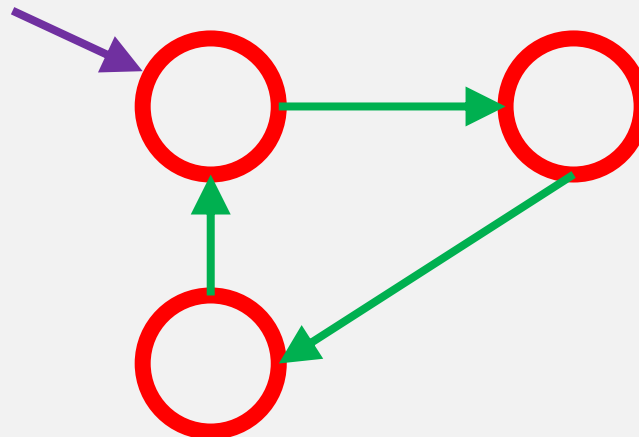
□ DIAGRAMA DE ESTADOS

- É uma representação gráfica de uma máquina de estados finitos
- Também pode ser chamado de **diagrama de transição de estados**

Círculos (vértices) representam um estado

A flecha (arco) em roxo aponta para o estado inicial

Flechas (arcos) em verde representam transições de estados



Máquinas de Estados Finitos

□ DIAGRAMA DE ESTADOS

- Exemplo: Contador Síncrono crescente de 2 bits

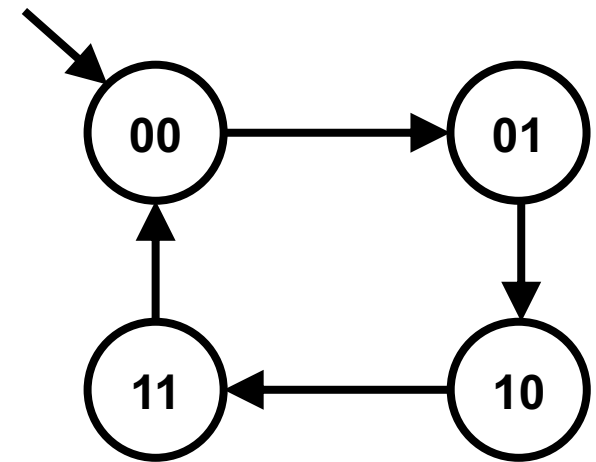
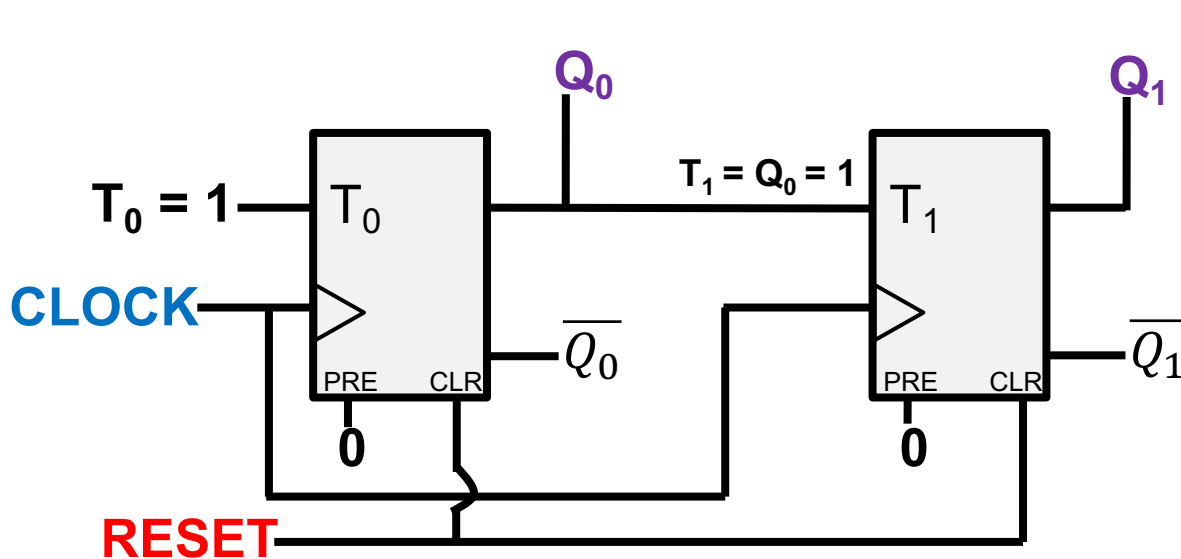


DIAGRAMA DE
ESTADOS
SIMPLIFICADO

Máquinas de Estados Finitos

□ DIAGRAMA DE ESTADOS

- O diagrama de estados tem formatos diferentes para cada um dos tipos de máquina de estados:

□ MÁQUINA DE MOORE

□ MÁQUINA DE MEALY

MÁQUINA DE MOORE

Exemplo Circuito - Máquina de Moore

MÁQUINA DE MOORE (Exemplo com 2 FFs D)

ENTRADA(S)

EM UMA MÁQUINA DE MOORE, AS ENTRADAS SÃO USADAS SOMENTE NOS CIRCUITOS COMBINACIONAIS DE PRÓXIMO ESTADO

CLOCK

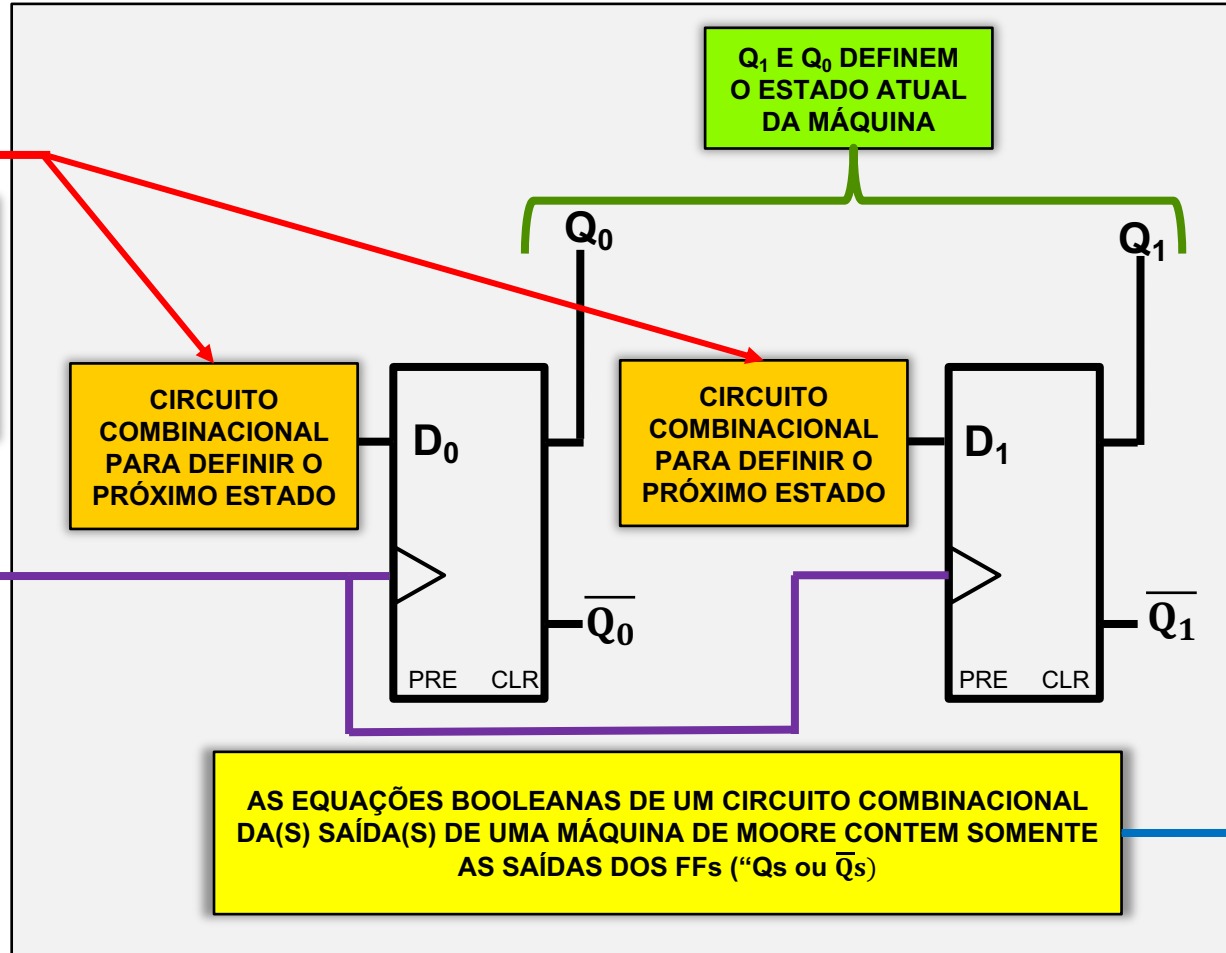
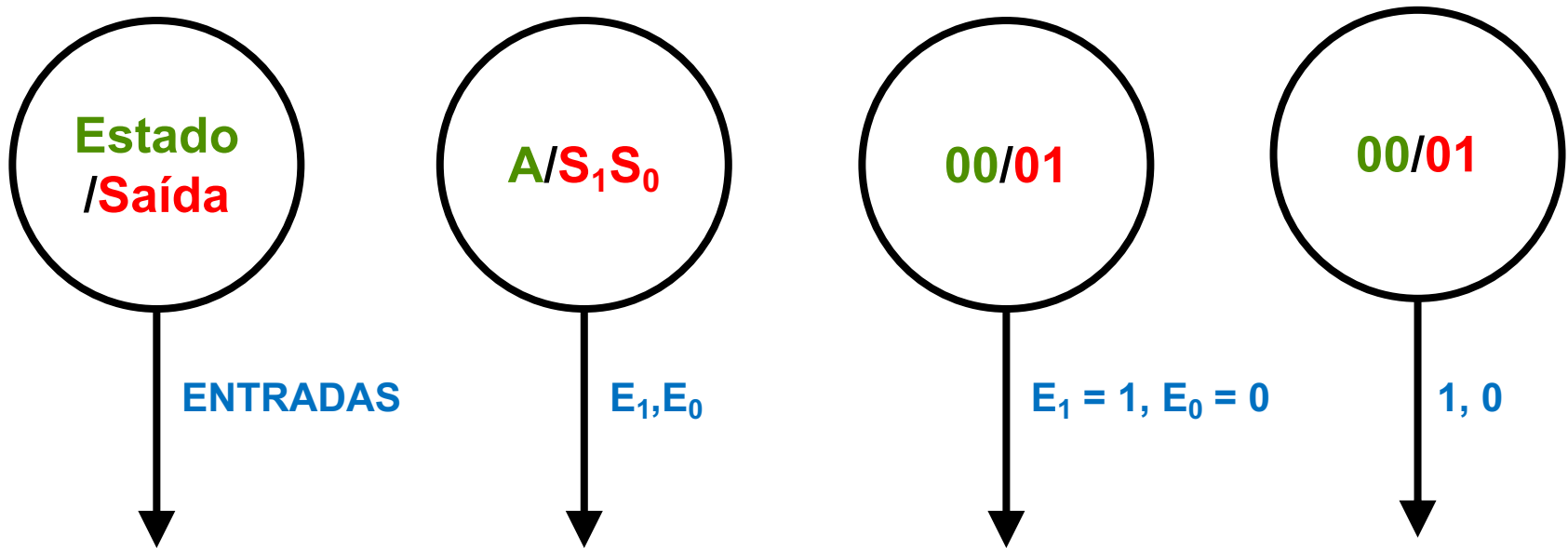
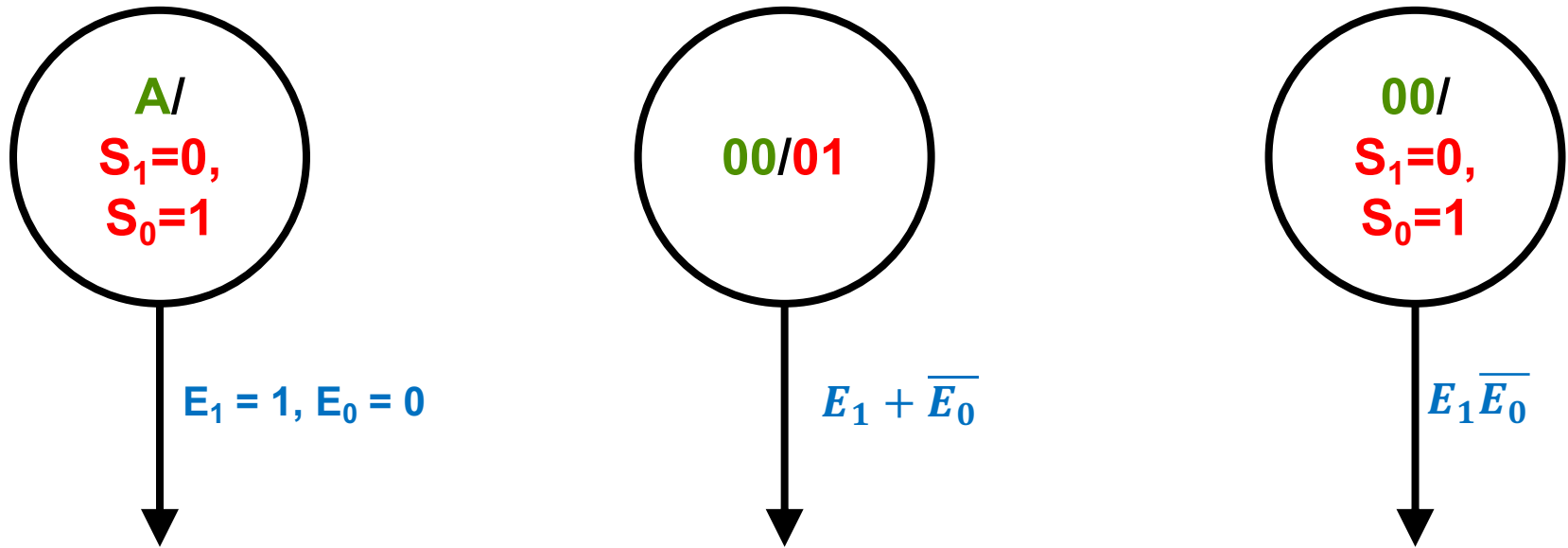


Diagrama de Estados - Moore



- A saída depende exclusivamente do estado atual
- A entrada só interfere no próximo estado

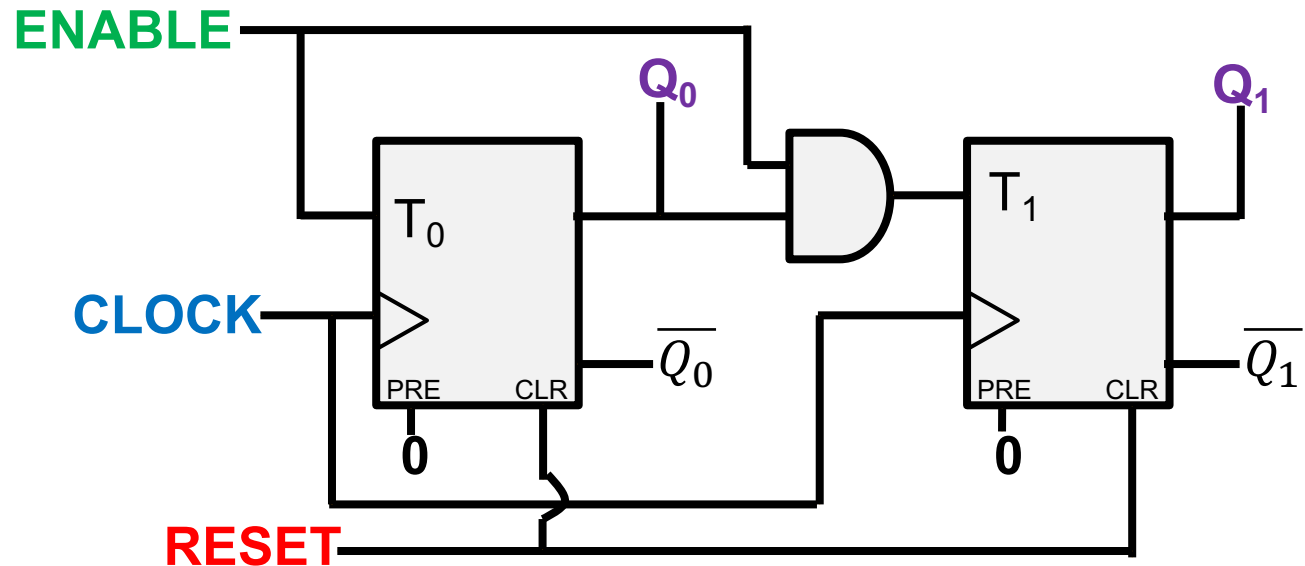
Diagrama de Estados - Moore



- A saída depende exclusivamente do estado atual
- A entrada só interfere no próximo estado

Diagrama de Estados - Moore

- **Exemplo:** Contador síncrono crescente de 2 bits com ENABLE



Quando $\text{ENABLE} = 0 \rightarrow$ para de contar

Quando $\text{ENABLE} = 1 \rightarrow$ conta normalmente

COMO FICA O DIAGRAMA DE ESTADOS?

Diagrama de Estados - Moore

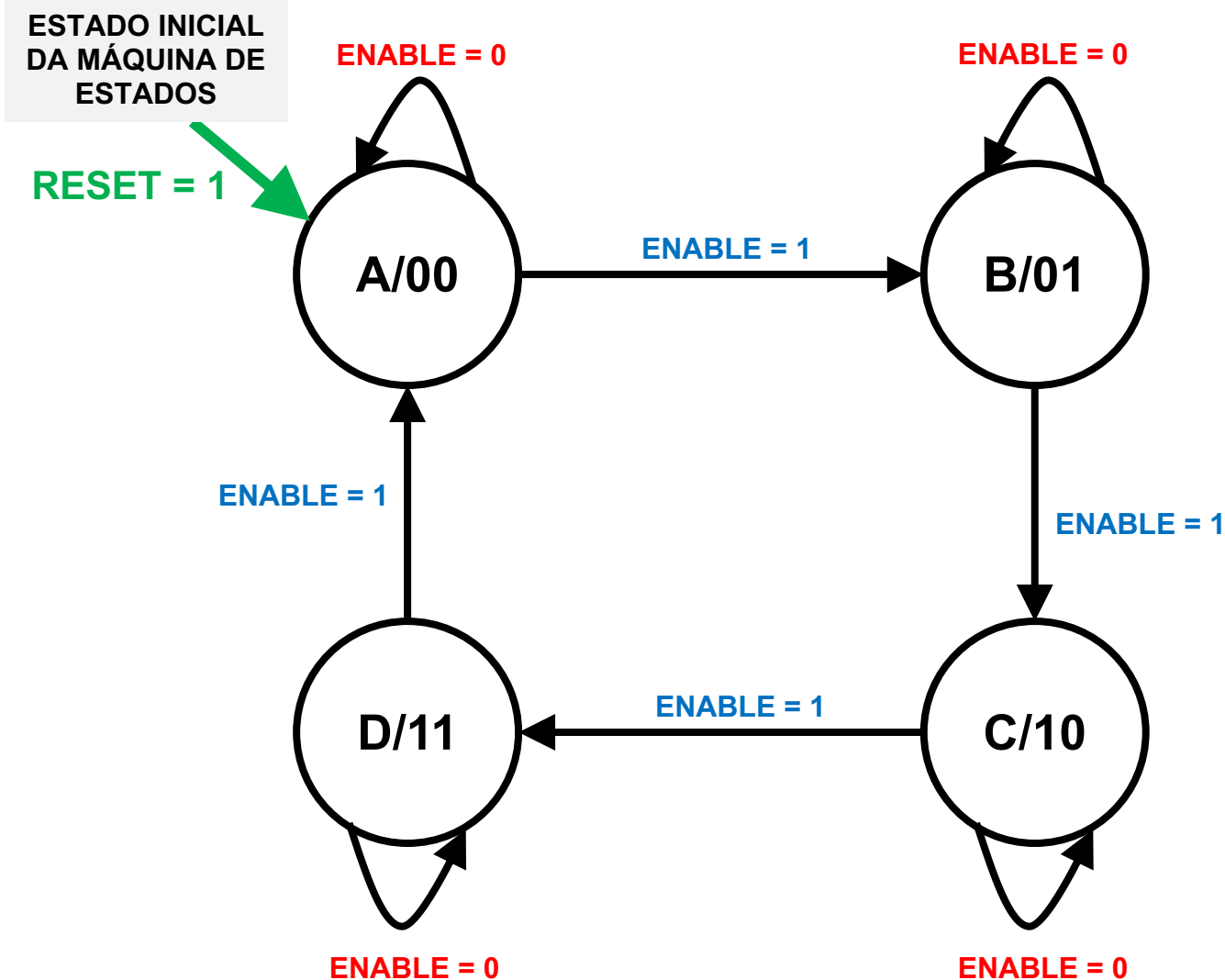
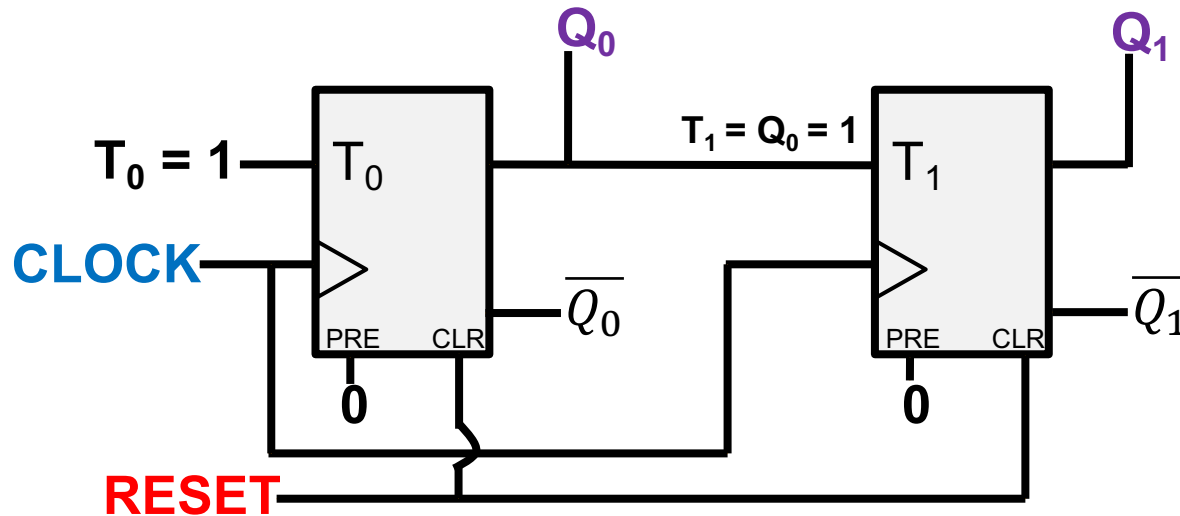


Diagrama de Estados - Moore

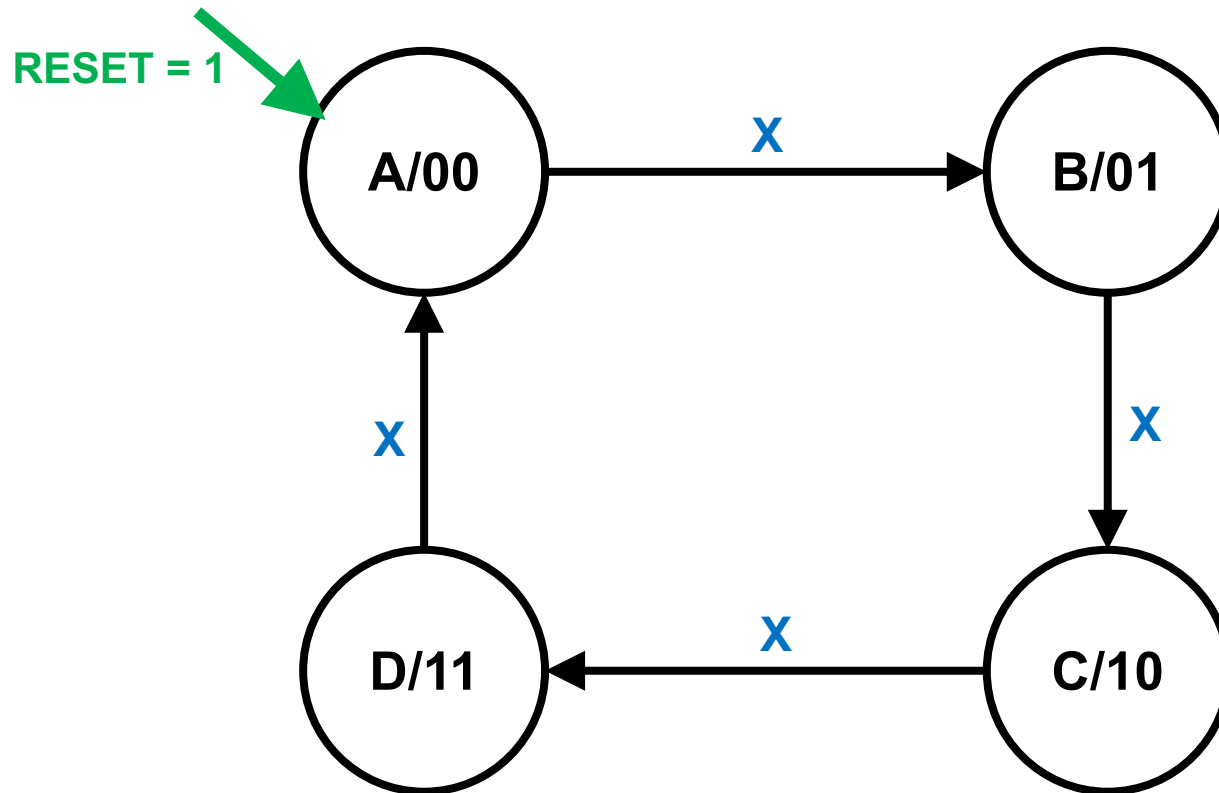
- Exemplo: Contador síncrono crescente de 2 bits



COMO FICA O DIAGRAMA DE ESTADOS?

Diagrama de Estados - Moore

O circuito não tem entrada, então as transições acontecem independentes → X (don't care)



Exemplo – Máquina de Moore

- Projete uma máquina de estados de **Moore** com uma entrada E e uma saída S, onde S será 1 somente se a entrada **E for igual a 1 nas últimas duas bordas de clock.**

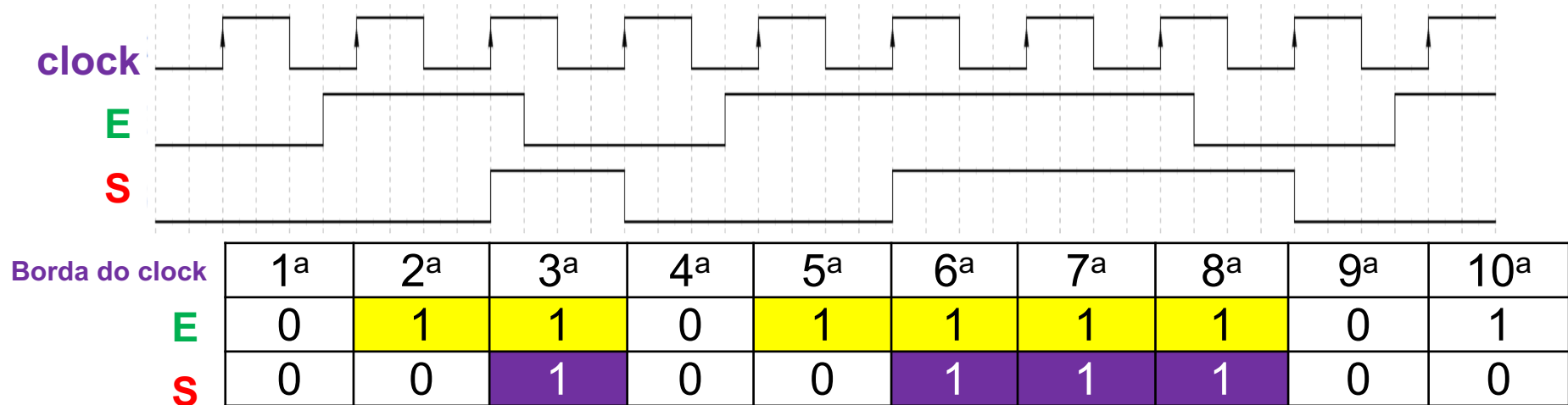


Diagrama de Estados - Moore

ESTADO A

SE $E = 0 \rightarrow$ CONTINUA EM A

SE $E = 1 \rightarrow$ VAI PARA O PRÓXIMO ESTADO

NESTE ESTADO $S = 0$

ESTE É O **ESTADO INICIAL** DA MÁQUINA DE ESTADOS.

ESTE ESTADO IDENTIFICA QUE A ENTRADA **E** NUNCA ESTEVE EM 1 DURANTE UMA BORDA DE CLOCK OU QUANDO **E = 0**.

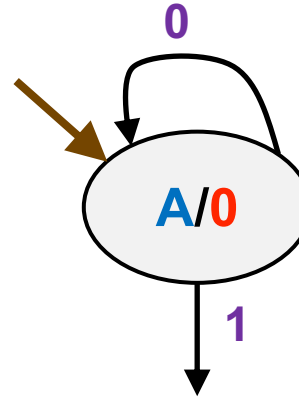


Diagrama de Estados - Moore

ESTADO B

SE $E = 0 \rightarrow$ VAI PARA A

SE $E = 1 \rightarrow$ VAI PARA O PRÓXIMO ESTADO

NESTE ESTADO $S = 0$

ESTE ESTADO IDENTIFICA QUE A ENTRADA E ESTEVE EM 1 DURANTE 1 VEZ NAS DUAS ÚLTIMAS BORDAS DE CLOCK.

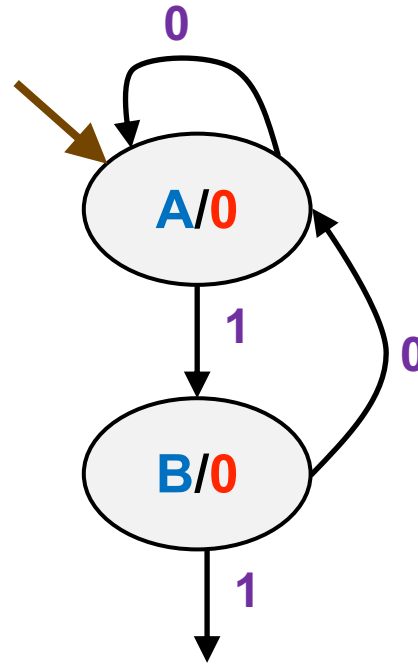


Diagrama de Estados

ESTADO C

SE $E = 0 \rightarrow$ VAI PARA A

SE $E = 1 \rightarrow$ CONTINUA EM C

NESTE ESTADO $S = 1$

ESTE ESTADO IDENTIFICA QUE A
ENTRADA E ESTEVE EM 1 NAS DUAS
ÚLTIMAS BORDAS DE CLOCK.

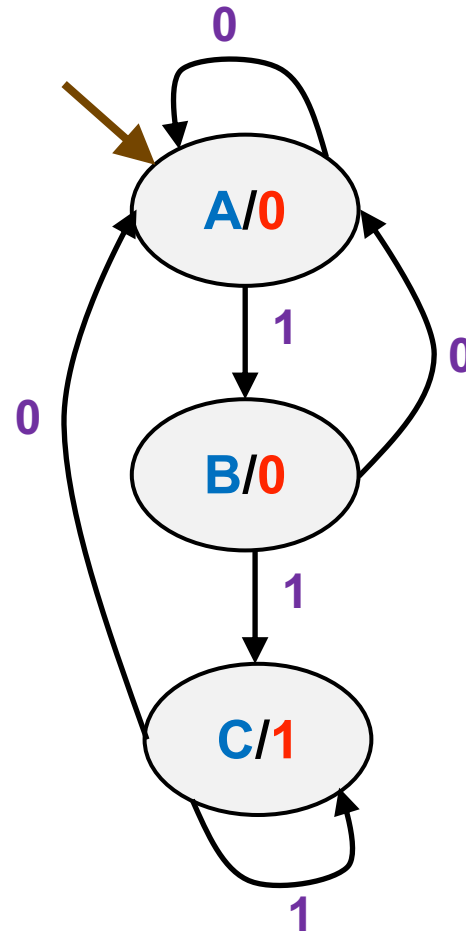
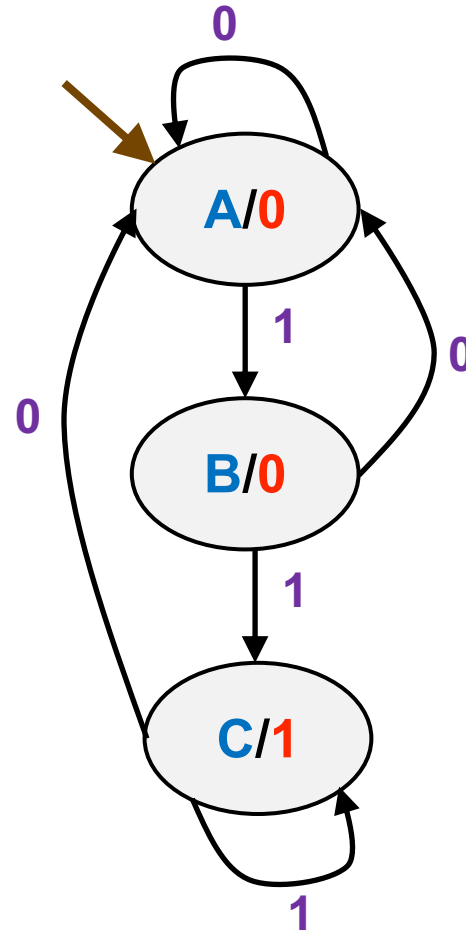


Diagrama de Estados

**COMO
TRANSFORMAR
ESSE DIAGRAMA
DE ESTADOS EM
CIRCUITO?**

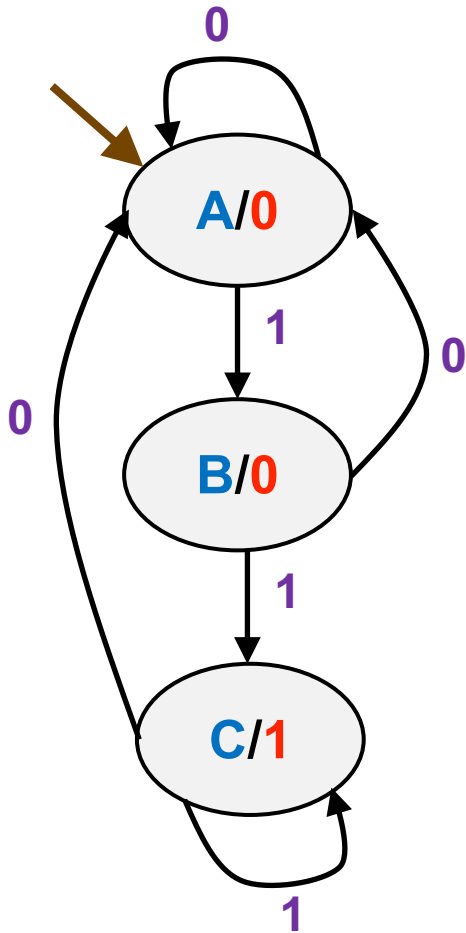


Projeto de Máquinas de Estados Finitos

Passos para o Projeto de Máquinas de Estados:

1. Obter a tabela de transição de estados (pode-se obter através de um diagrama de estados)
2. Codificar os estados → modificar tabela de transição de estados
3. Escolher um flip-flop para o circuito
4. Obter a(s) equação(s) de entrada para o FF escolhido e a(s) equações da(s) saída(s) → simplificar, se necessário
5. Desenhar circuito lógico com FFs e portas lógicas de acordo com as equações booleanas

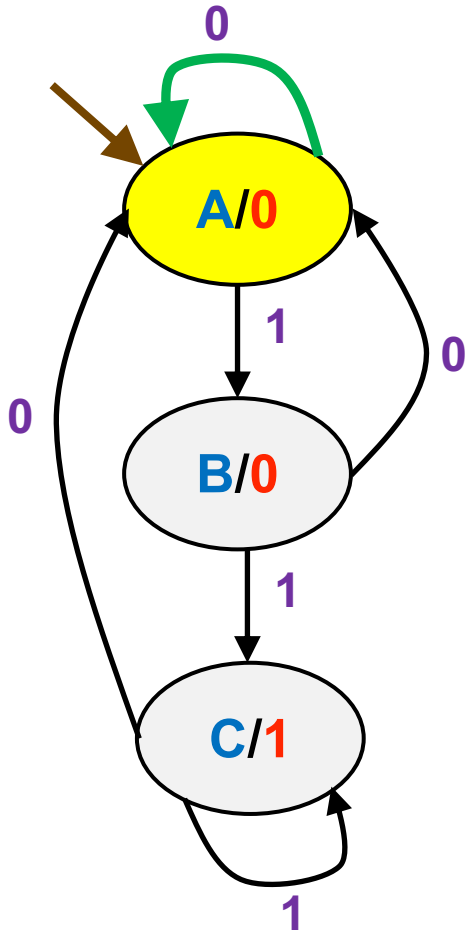
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)

NA MÁQUINA DE MOORE, A SAÍDA DEPENDE SÓ DO ESTADO ATUAL!

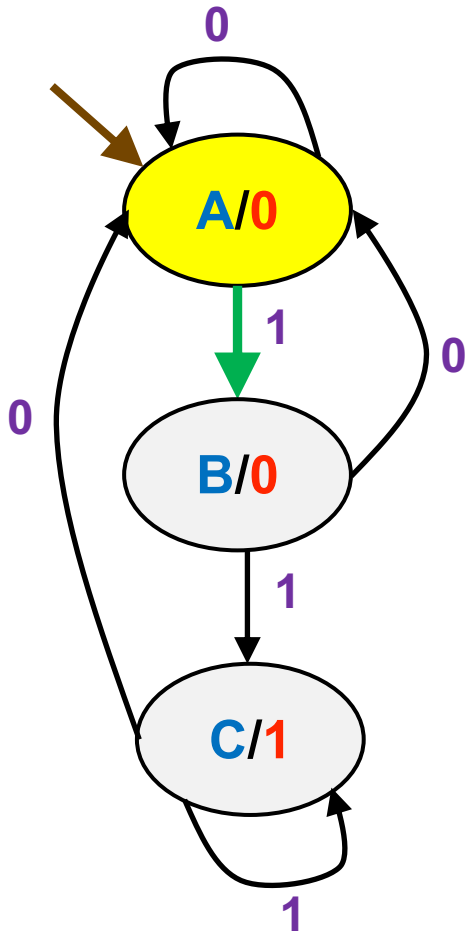
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0

ESTADO ATUAL É A, ENTÃO SAÍDA É 0!

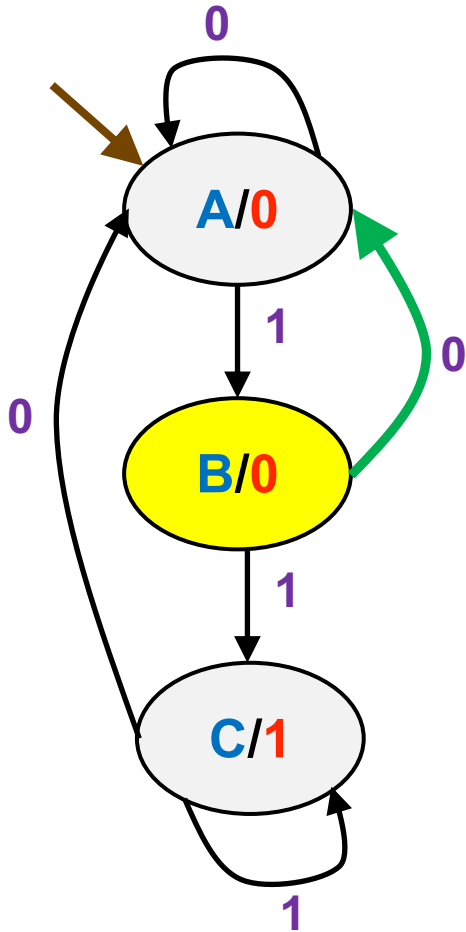
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0

ESTADO ATUAL É A, ENTÃO SAÍDA É 0!

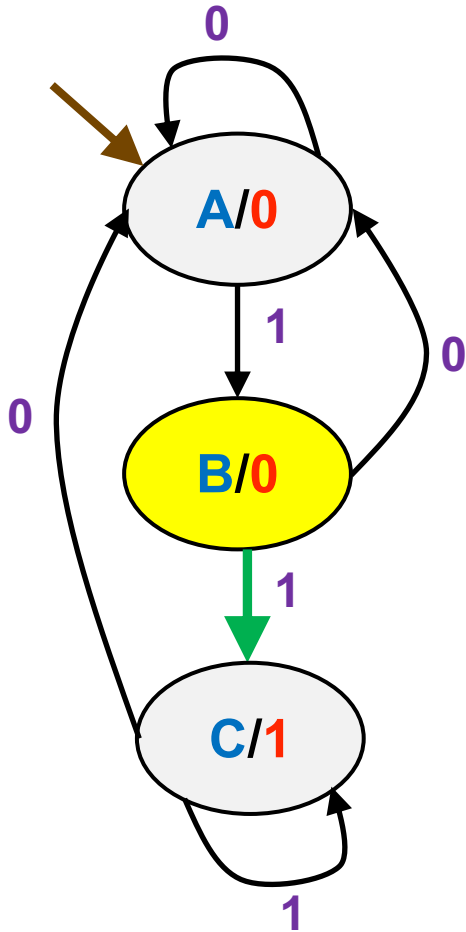
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0

ESTADO ATUAL É B, ENTÃO SAÍDA É 0!

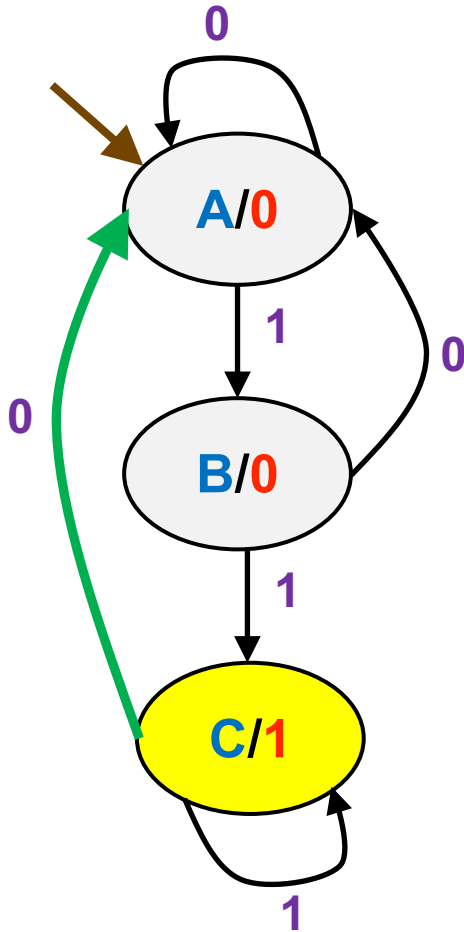
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0
B	1	C	0

ESTADO ATUAL É B, ENTÃO SAÍDA É 0!

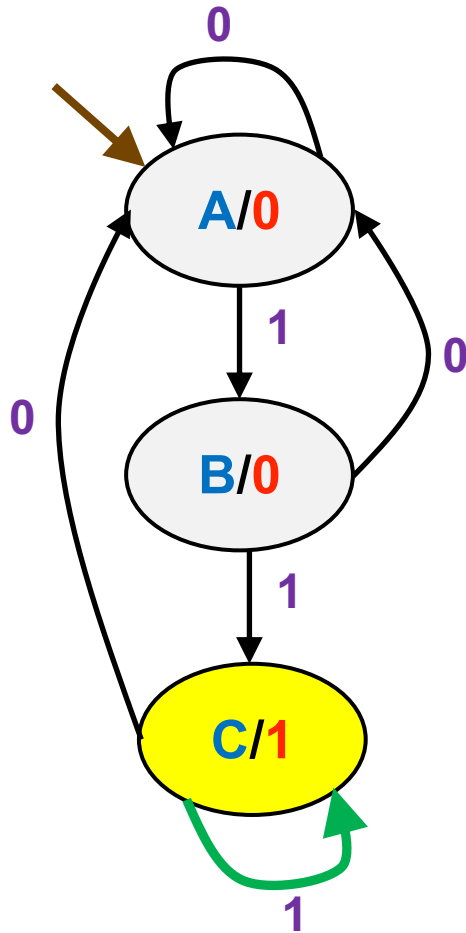
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0
B	1	C	0
C	0	A	1

ESTADO ATUAL É C, ENTÃO SAÍDA É 1!

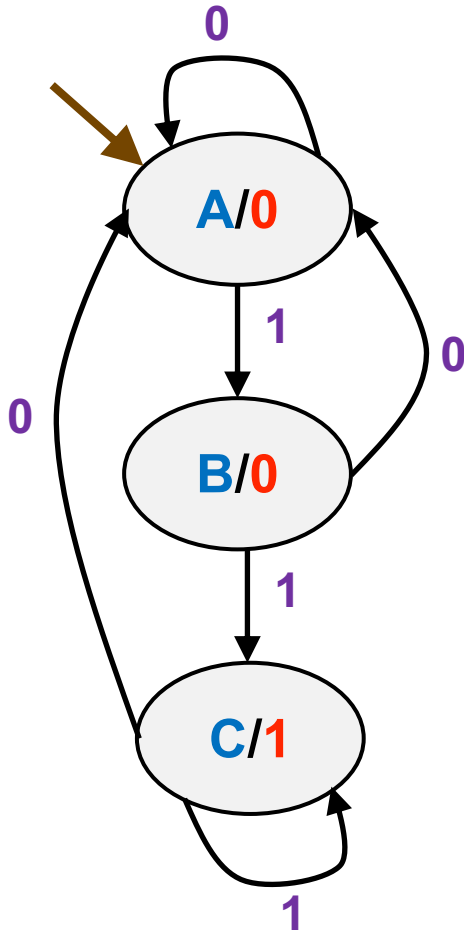
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0
B	1	C	0
C	0	A	1
C	1	C	1

ESTADO ATUAL É C, ENTÃO SAÍDA É 1!

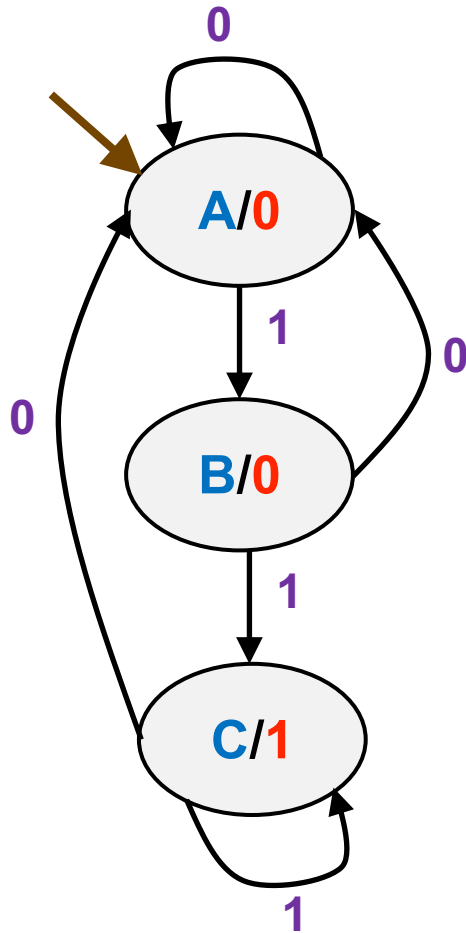
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0
B	1	C	0
C	0	A	1
C	1	C	1

NESSA TABELA, CADA DUAS LINHAS REPRESENTAM UM ESTADO DA MÁQUINA DE MOORE!

Passo 2 – Codificação dos Estados



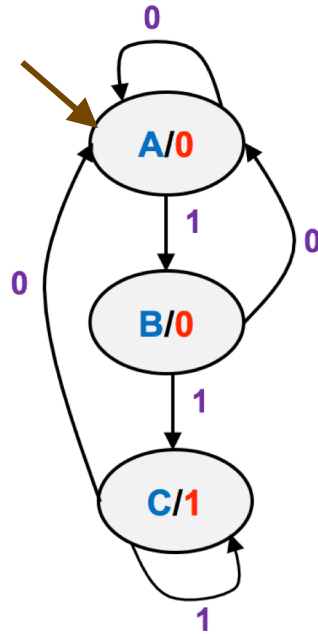
Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0
B	1	C	0
C	0	A	1
C	1	C	1

DEVEMOS DEFINIR UM CÓDIGO EM BINÁRIO PARA CADA UM DOS ESTADOS.

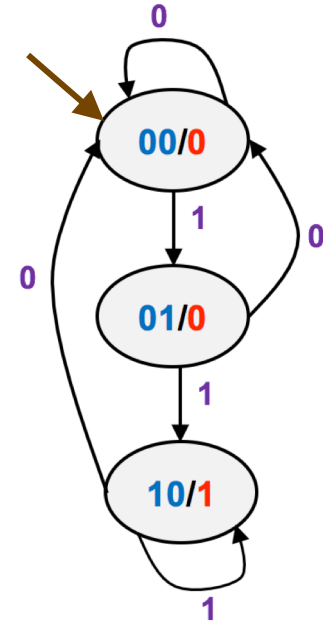
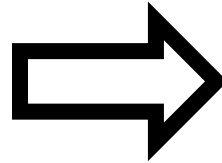
Passo 2 – Codificação dos Estados

- A codificação dos estados definirá o número de FF utilizados no circuito
- Dependendo da codificação podemos alterar a **complexidade** das equações de entrada do circuito, assim como o **consumo de energia**
- Exemplos de codificação:
 - Código de contagem binária
 - Código de Gray
 - Codificação One Hot

Código de contagem binária



Estado	Estado do FF (Q_1Q_0)
A	00
B	01
C	10



n flip-flops → até 2^n estados

No exemplo: 3 estados → precisamos de **2** FF: $2^2 = 4$

Codificação binária

□ Vantagens

- Mais simples e direta, visto que segue a numeração binária padrão
- Número de FF também é menor, quando comparado a outros métodos tais como one-hot
 - Custo de área menor

□ Desvantagens

- Mais de um bit (vários, até!) pode mudar de uma transição para outra
 - Mais potência (mais mudanças nos FFs)
- Lógica mais complexa para achar o estado atual

Código de Gray

□ Código de Gray de 2 bits

- 00, 0**1**, **1**1, 1**0**

□ Vantagens

- Mesmo número de FFs que a codificação binária
- Apenas um bit muda para estados adjacentes
 - Menos consumo de energia (menos variação nos FFs)

□ Desvantagem

- Decodificação mais complexa

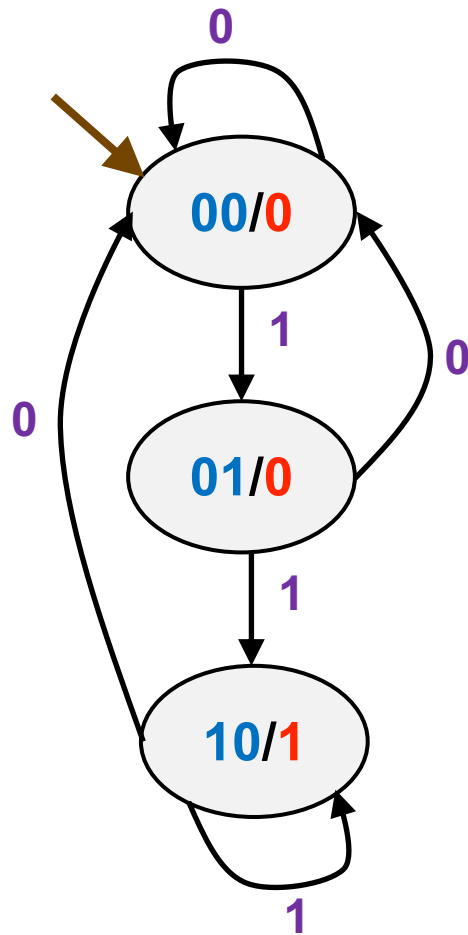
Codificação One Hot

- Cada estado possui seu próprio FF setado em 1, enquanto os demais ficam em 0 → **número de FF depende do número de estados**
 - Exemplo → 3 estados
 - 00**1**, 0**1**0, **1**00

- **Vantagem**
 - Decodificação mais simples

- **Desvantagem**
 - Maior número de FF → maior consumo de energia

Passo 2 – Codificação dos Estados



Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	1

CÓDIGO DE CONTAGEM BINÁRIA

Estado	Estado do FF (Q_1Q_0)
A	00
B	01
C	10

Passo 3 – Escolha do Flip-Flop

□ Flip-flop JK:

- equações de entrada mais simplificadas que outros FF
- possui duas conexões de entrada, dificultando o projeto de CIs

□ Flip-flop D:

- possui apenas uma conexão de entrada
- projeto mais simples
- equações de entrada mais complexas

□ Flip-flop T:

- possui apenas uma conexão de entrada
- equações de entrada mais complexas que o JK, mas mais simples que D

Passo 3 – Escolha do Flip-Flop

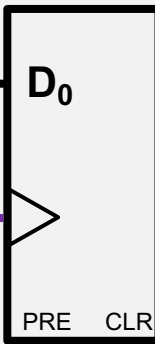
□ NESTE EXEMPLO VAMOS UTILIZAR O FLIP-FLOP D

ENTRADA(S)

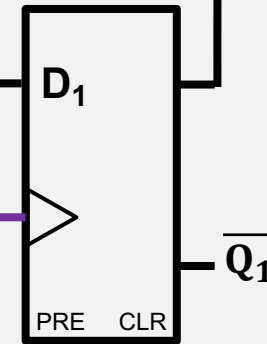
EM UMA MÁQUINA DE MOORE, AS ENTRADAS SÃO USADAS SOMENTE NOS CIRCUITOS COMBINACIONAIS DE PRÓXIMO ESTADO

CLOCK

CIRCUITO COMBINACIONAL PARA DEFINIR O PRÓXIMO ESTADO



CIRCUITO COMBINACIONAL PARA DEFINIR O PRÓXIMO ESTADO



Q₁ E Q₀ DEFINEM O ESTADO ATUAL DA MÁQUINA

AS EQUAÇÕES BOOLEANAS DE UM CIRCUITO COMBINACIONAL DA(S) SAÍDA(S) DE UMA MÁQUINA DE MOORE CONTEM SOMENTE AS SAÍDAS DOS FFs ("Qs ou \overline{Q} s")

SAÍDA(S)

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0		
0	0	1	0	1	0		
0	1	0	0	0	0		
0	1	1	1	0	0		
1	0	0	0	0	1		
1	0	1	1	0	1		

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0		
0	0	1	0	1	0		
0	1	0	0	0	0		
0	1	1	1	0	0		
1	0	0	0	0	1		
1	0	1	1	0	1		

O valor de Q_1 deve se manter em 0 no próximo estado.

Qual o valor de D para que isso aconteça?

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	
0	1	0	0	0	0		
0	1	1	1	0	0		
1	0	0	0	0	1		
1	0	1	1	0	1		

CLK	D	Q_{t+1}
$\neq \uparrow$	X	Q_t
\uparrow	0	0
\uparrow	1	1

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	
0	1	0	0	0	0		
0	1	1	1	0	0		
1	0	0	0	0	1		
1	0	1	1	0	1		

O valor de Q_0 deve mudar de 0 para 1 no próx. estado.

Qual o valor de D para que isso aconteça?

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0		
0	1	1	1	0	0		
1	0	0	0	0	1		
1	0	1	1	0	1		

CLK	D	Q_{t+1}
$\neq \uparrow$	X	Q_t
\uparrow	0	0
\uparrow	1	1

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	0
1	0	0	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1	1	0



Para o FF tipo D, a tabela das equações de entrada é igual a tabela do próximo estado!

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado	Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E		S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1
0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0
1	0	1	1	1	1	0

DEPOIS DE PREENCHER A PARTE DA TABELA DE EQUAÇÕES DE ENTRADA, VOCÊ PODE DESCARTAR A PARTE DE PRÓXIMO ESTADO

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual		Entrada	Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E	S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0

Equações de Entrada para o FF tipo D :

$$D_1 = \overline{Q_1}Q_0E + Q_1\overline{Q_0}E = (Q_1 \oplus Q_0)E$$

$$D_0 = \overline{Q_1} \overline{Q_0}E$$

Passo 4 – Equações da(s) Saída(s)

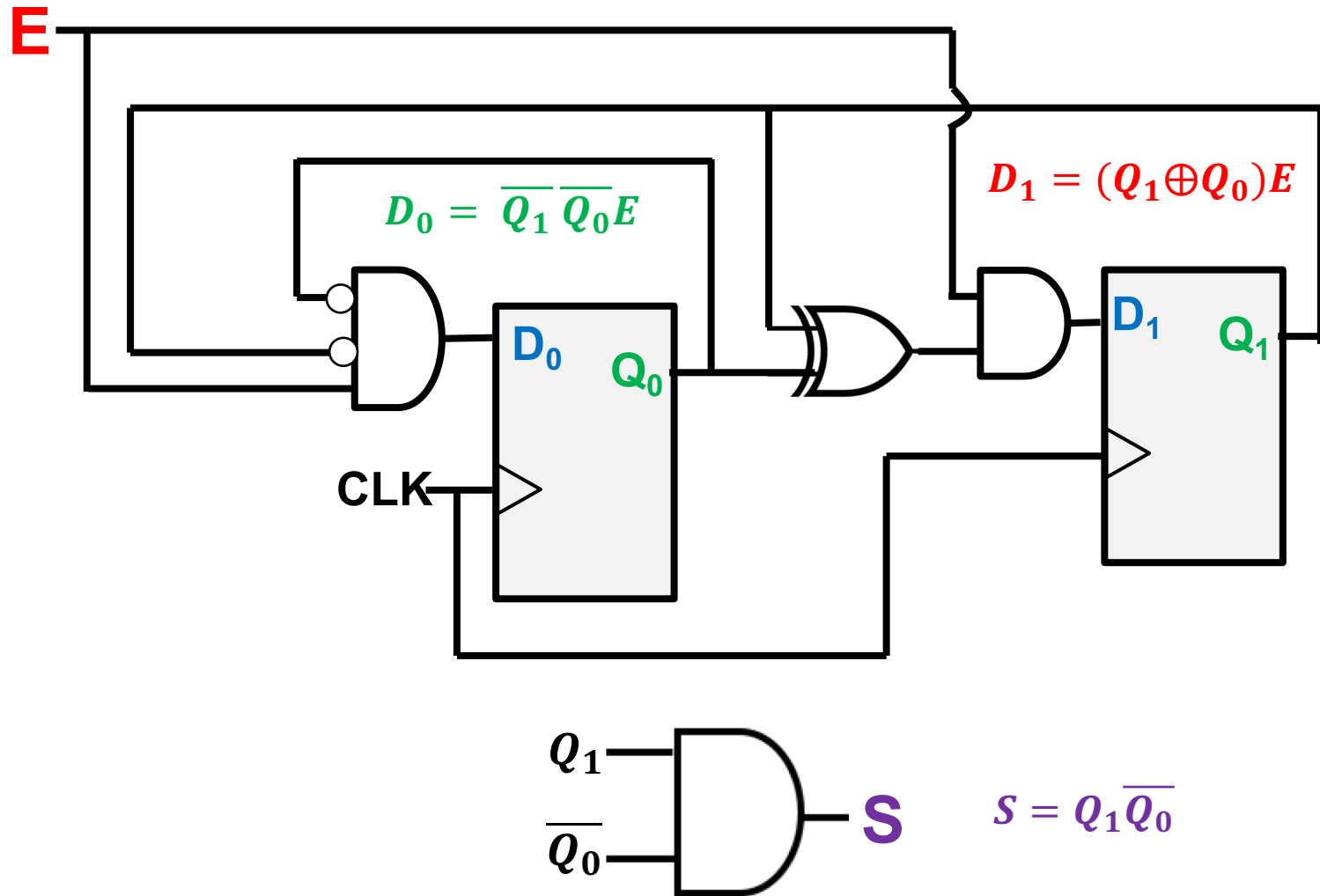
Estado Atual		Entrada	Saída	Equações de Entrada (FF D)	
Q_1	Q_0	E	S	D_1	D_0
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0

Equações de Saída :

$$S = Q_1 \overline{Q_0}$$

MÁQUINA DE MOORE → SAÍDA DEPENDE SÓ DO ESTADO ATUAL

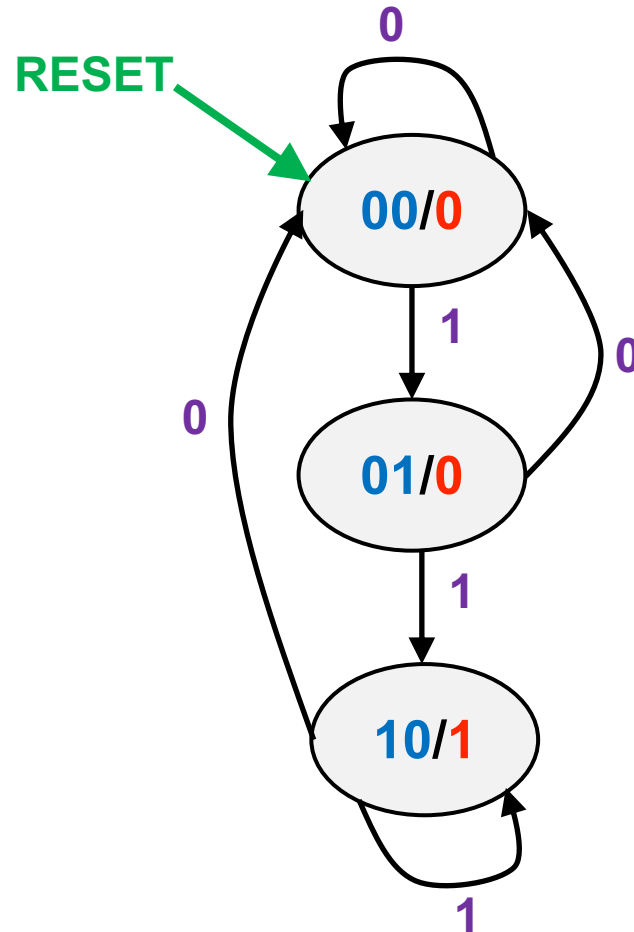
Passo 5 – Circuito



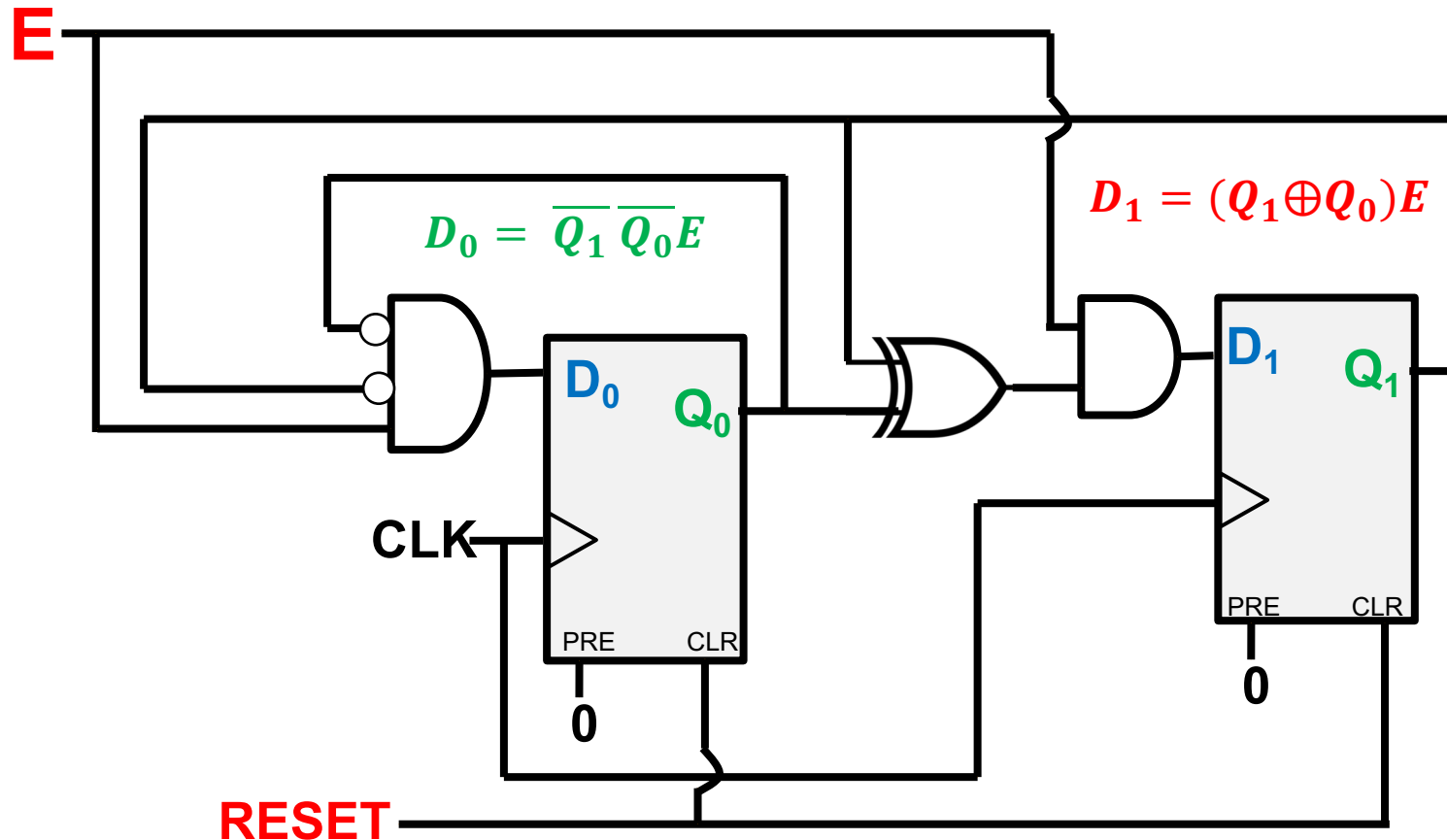
Passo 5 – Circuito → RESET

□ RESET

- Define o estado inicial da máquina de estados



Passo 5 – Circuito → RESET



RESET assíncrono!

Diagram of an AND gate with inputs Q_1 and Q_0 , output S , and the equation $S = Q_1 \cdot Q_0$.

RESET assíncrono

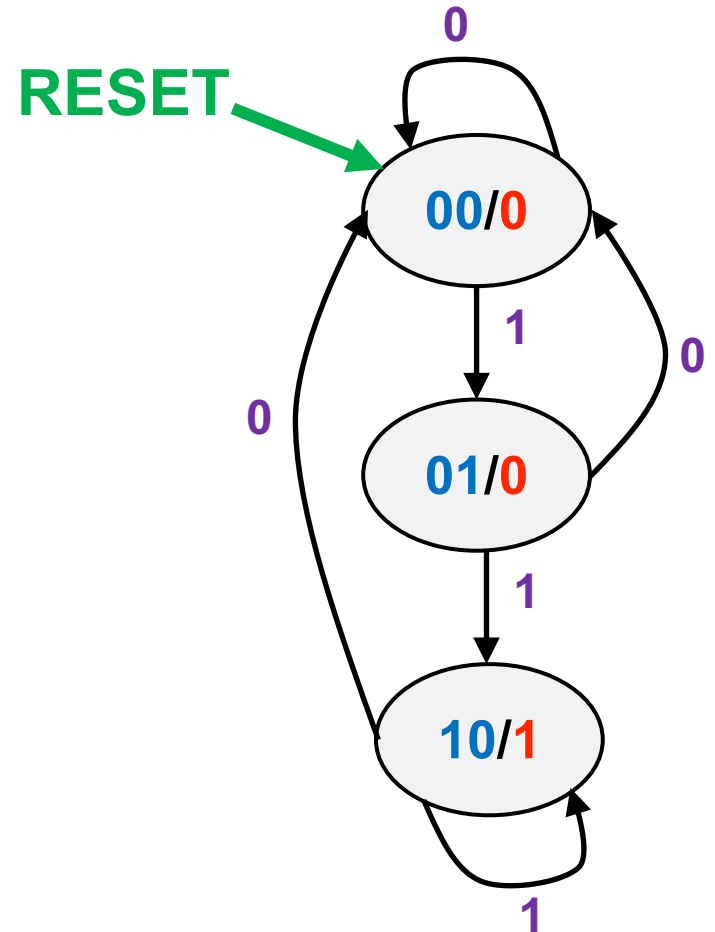
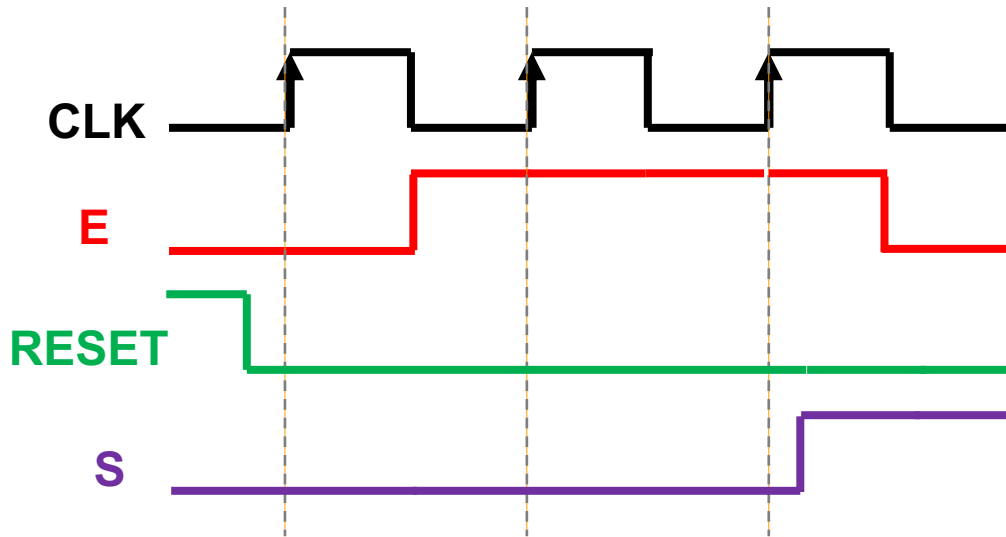
□ Vantagem

- Mais rápido → não precisa esperar a borda do clock pra resetar o circuito

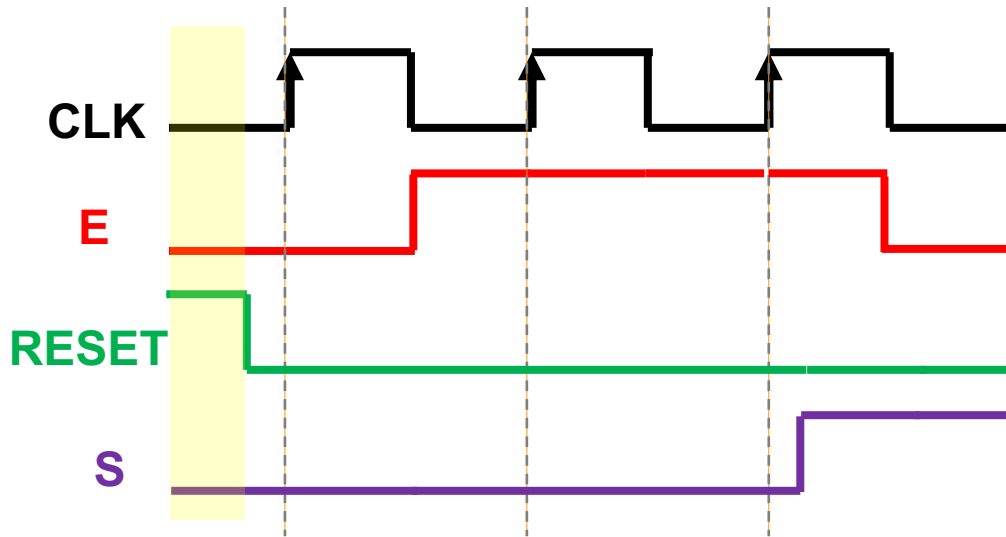
□ Desvantagem

- Sinal de RESET é sensível a ruído
- Pode causar metaestabilidade nos flip-flops

Funcionamento da Máquina de Moore



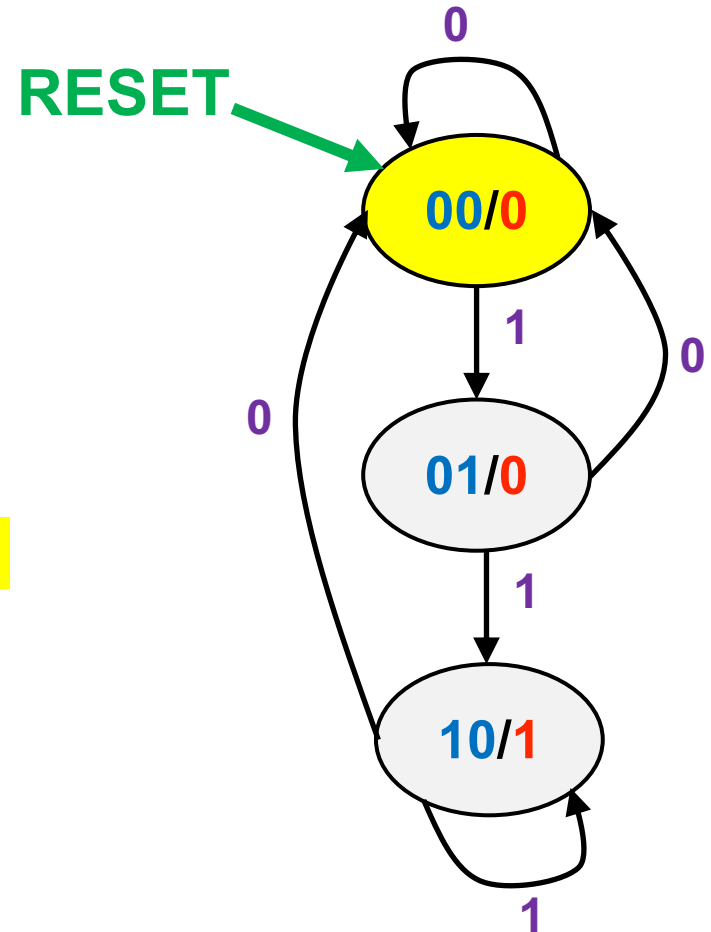
Funcionamento da Máquina de Moore



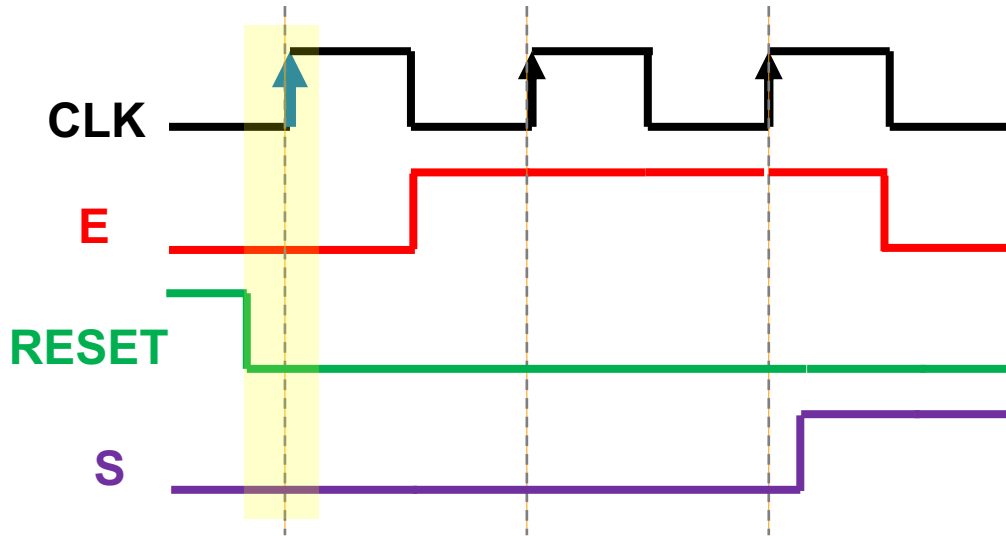
SINAL DE RESET ATIVADO

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S
0	0	X	?	?	0

A MÁQUINA PERMANECE NESSE ESTADO ATÉ A PRÓXIMA BORDA DE CLOCK!

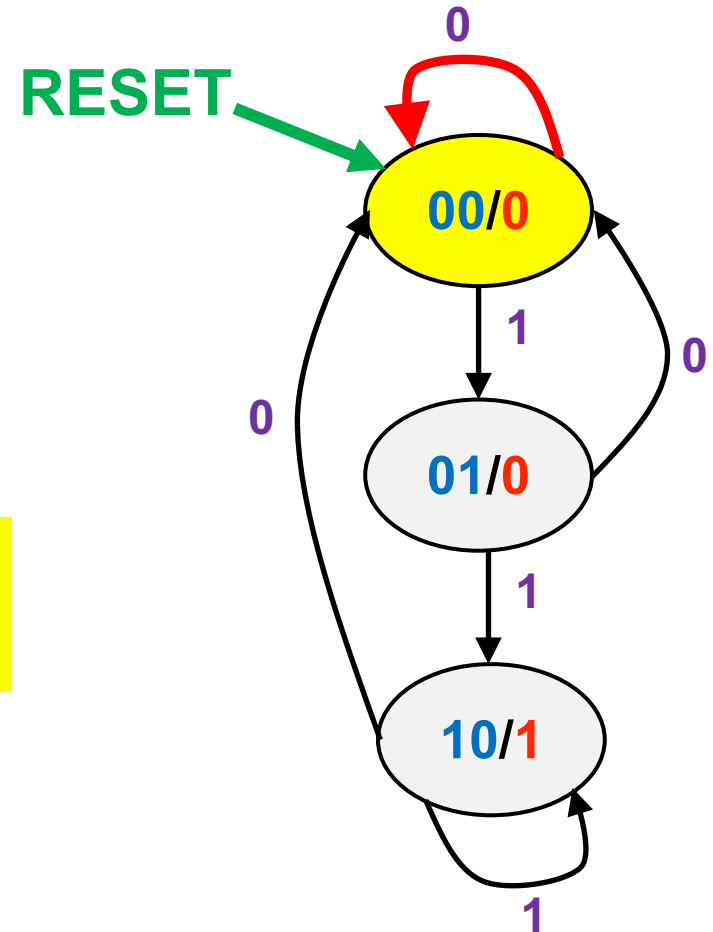


Funcionamento da Máquina de Moore

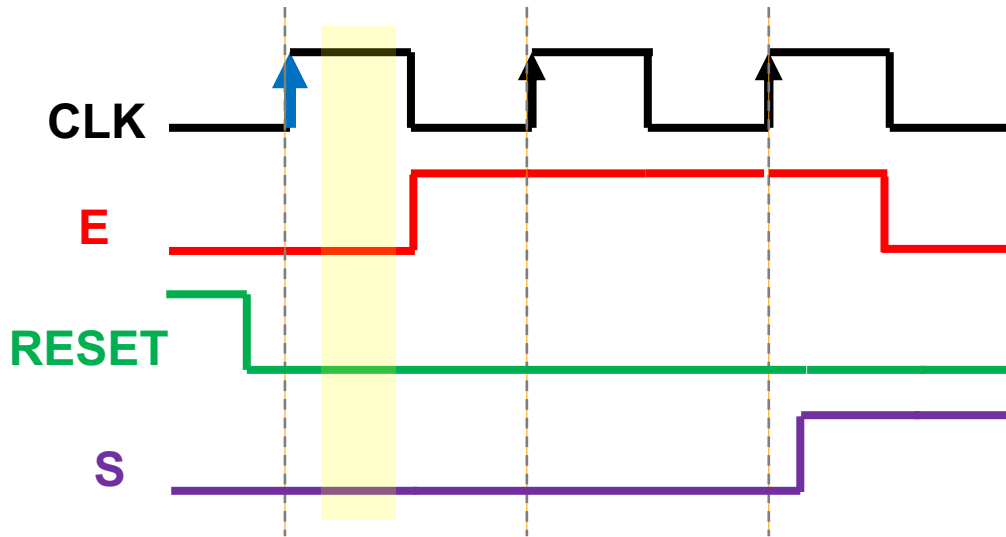


NA BORDA DE CLOCK, A MÁQUINA OBSERVA O ESTADO ATUAL E A(S) ENTRADA(S) PARA DECIDIR O PRÓXIMO ESTADO

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S
0	0	0	0	0	0

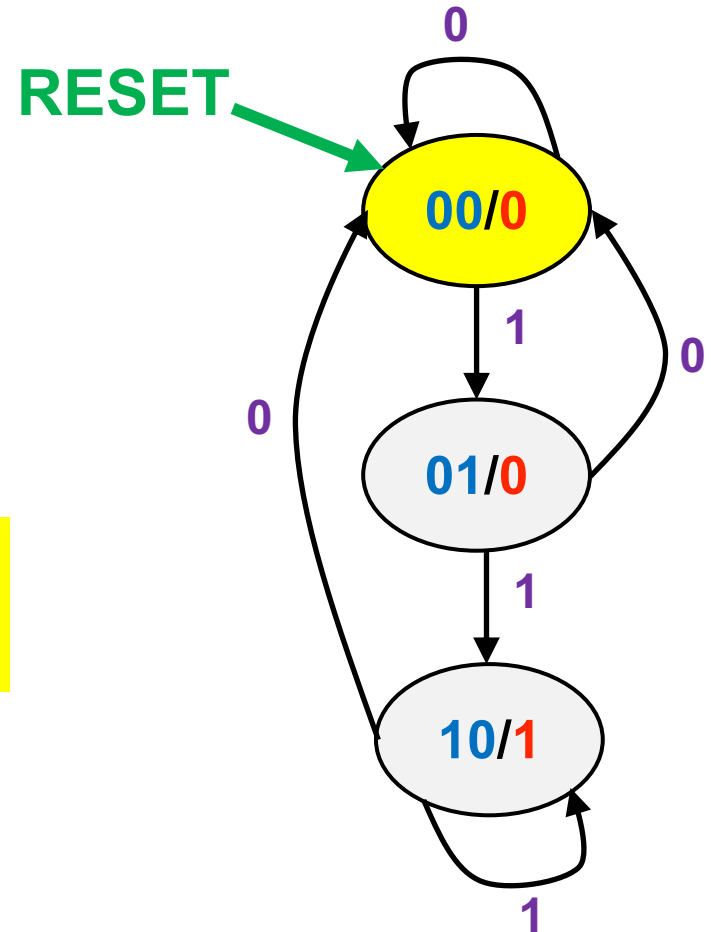


Funcionamento da Máquina de Moore

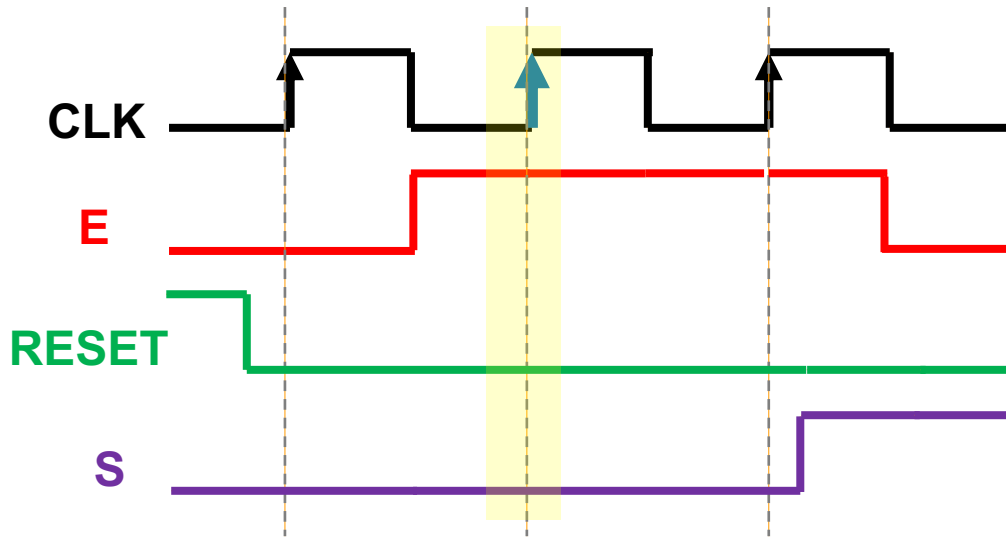


APÓS UM ATRASO A MÁQUINA MUDA DE ESTADO E PERMANECE NESSE ESTADO ATÉ A PRÓXIMA BORDA DE CLOCK

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S
0	0	X	?	?	0

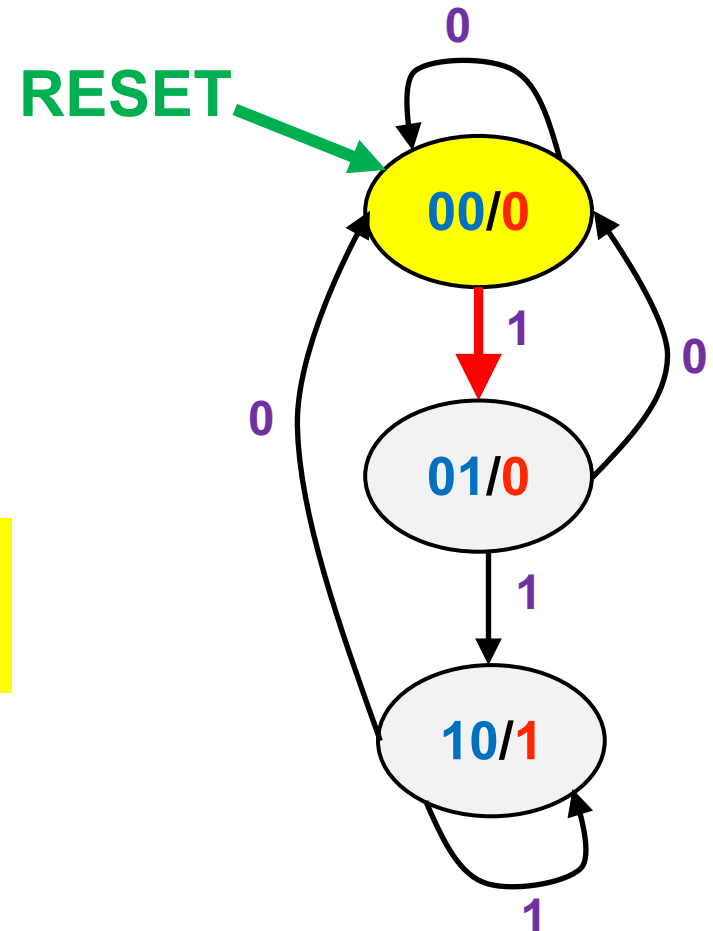


Funcionamento da Máquina de Moore

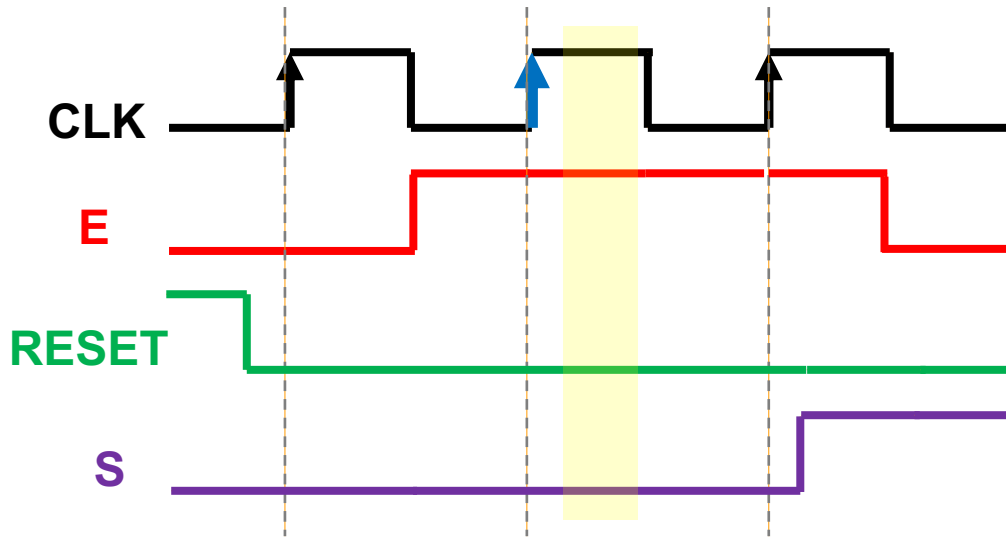


NA BORDA DE CLOCK, A MÁQUINA OBSERVA O ESTADO ATUAL E A(S) ENTRADA(S) PARA DECIDIR O PRÓXIMO ESTADO

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S
0	0	1	0	1	0

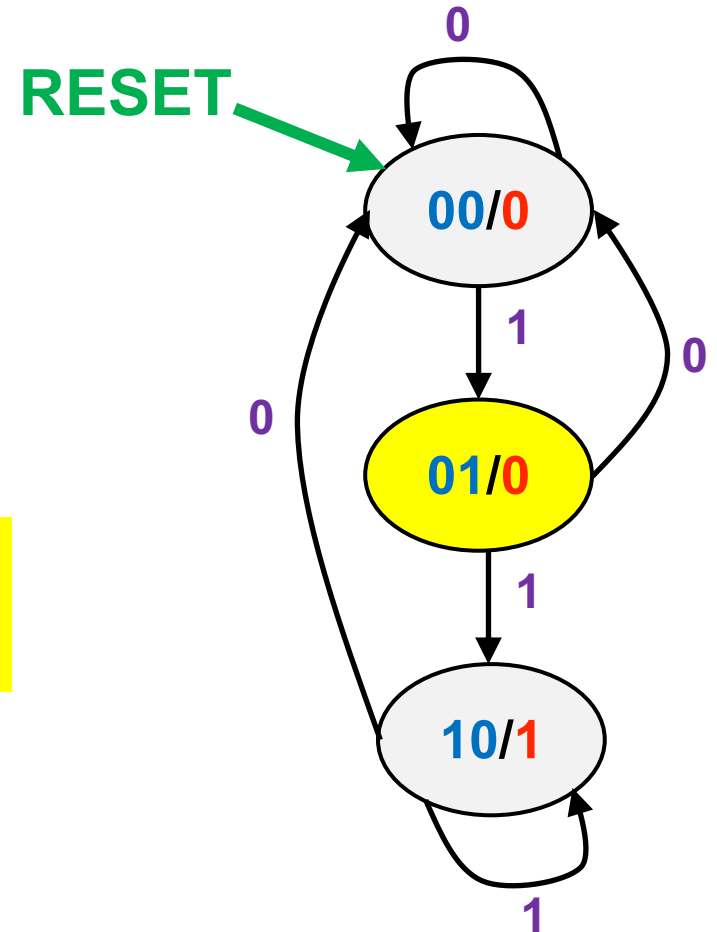


Funcionamento da Máquina de Moore

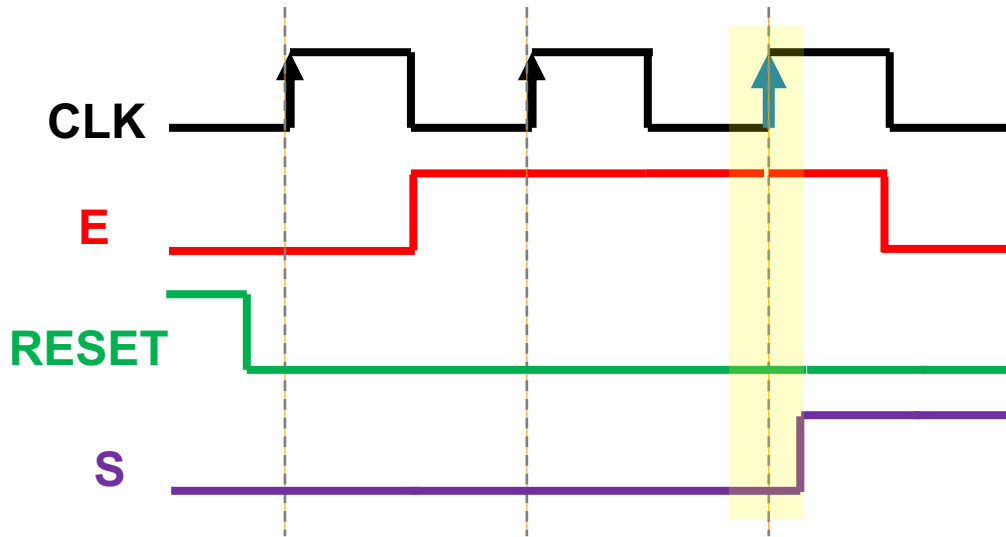


APÓS UM ATRASO A MÁQUINA MUDA DE ESTADO E PERMANECE NESSE ESTADO ATÉ A PRÓXIMA BORDA DE CLOCK

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S
0	1	X	?	?	0

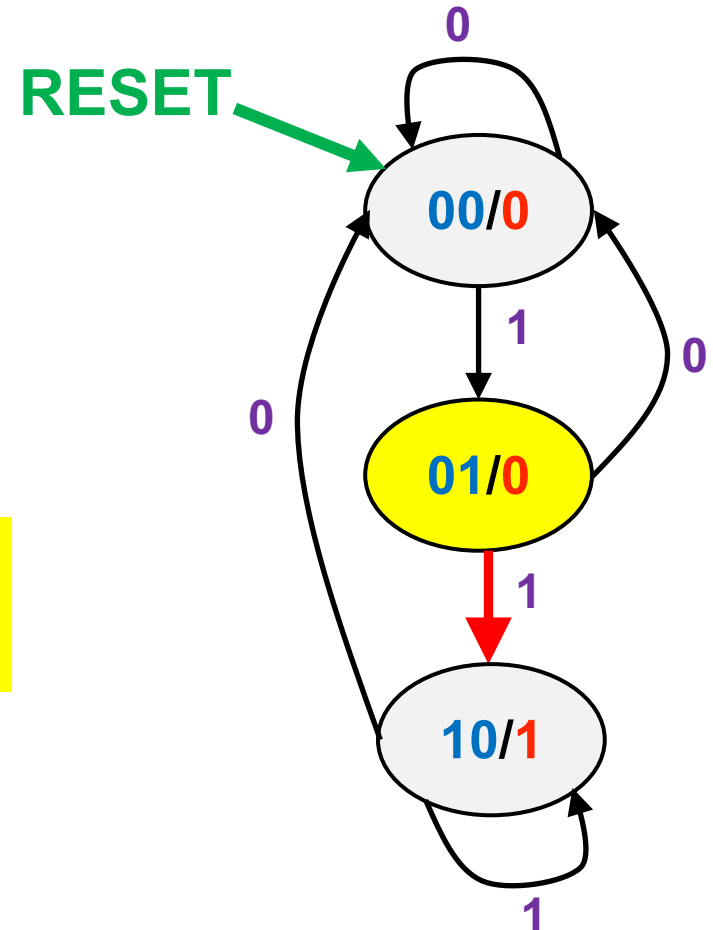


Funcionamento da Máquina de Moore

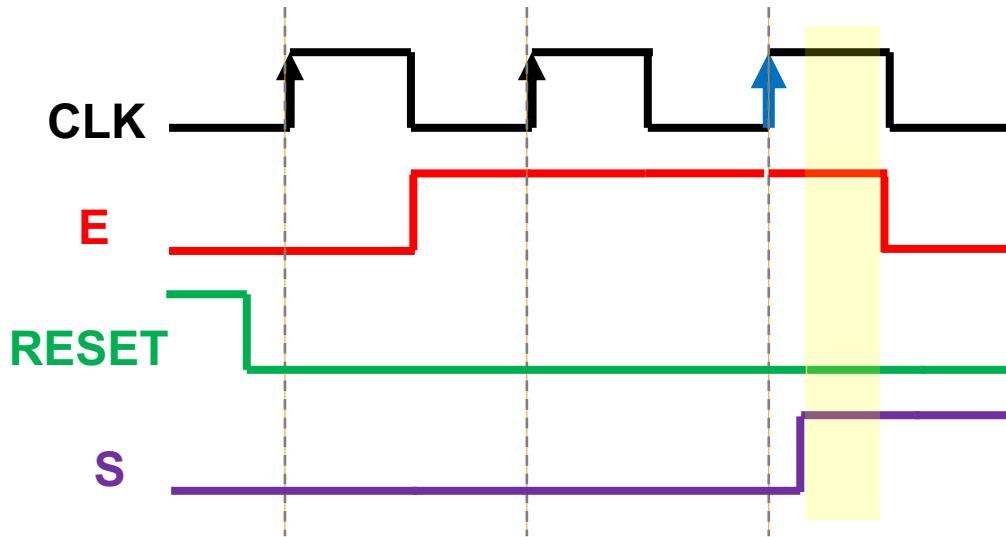


NA BORDA DE CLOCK, A MÁQUINA OBSERVA O ESTADO ATUAL E A(S) ENTRADA(S) PARA DECIDIR O PRÓXIMO ESTADO

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S
0	1	1	1	0	0

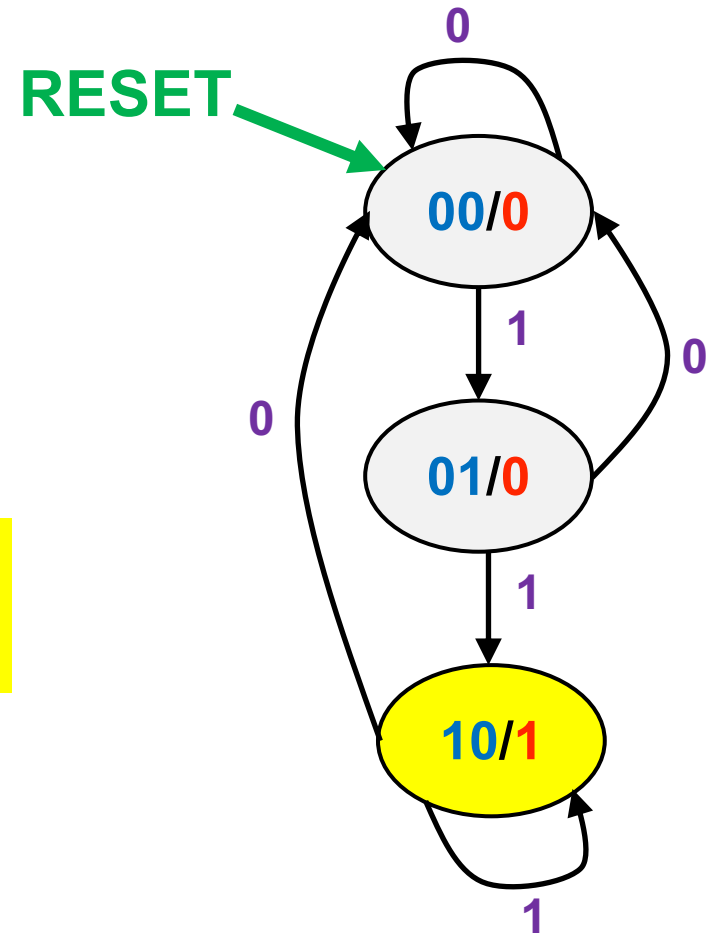


Funcionamento da Máquina de Moore

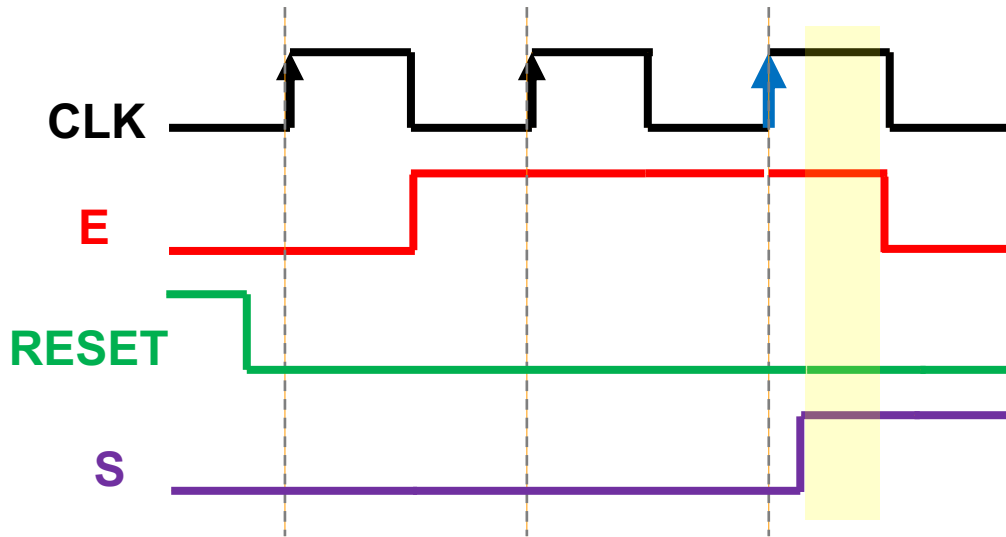


APÓS UM ATRASO A MÁQUINA MUDA DE ESTADO E PERMANECE NESSE ESTADO ATÉ A PRÓXIMA BORDA DE CLOCK

Estado Atual		Entrada	Próximo Estado		Saída
Q_1	Q_0	E	Q_1	Q_0	S
1	0	X	?	?	1

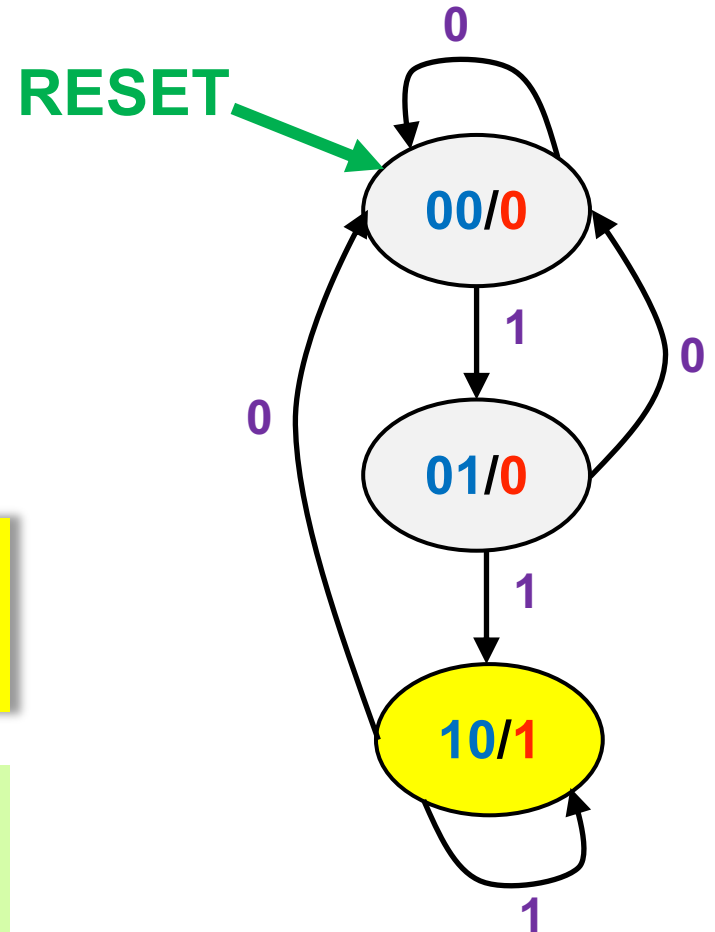


Funcionamento da Máquina de Moore



NA MÁQUINA DE MOORE, A SAÍDA DEPENDE SOMENTE DO ESTADO QUE A MÁQUINA ESTÁ!

NESSE EXEMPLO, A SAÍDA SERÁ 1 SOMENTE QUANDO A MÁQUINA ESTIVER NO ESTADO 10!



MÁQUINA DE MEALY

Máquinas de Estados Finitos

MÁQUINA DE MEALY (Exemplo com 2 FFs D)

ENTRADA(S)

EM UMA MÁQUINA DE MEALY, AS ENTRADAS SÃO USADAS NOS CIRCUITOS COMBINACIONAIS DE PRÓXIMO ESTADO E NO(S) CIRCUITO(S) DA(S) SAÍDA(S)

CLOCK

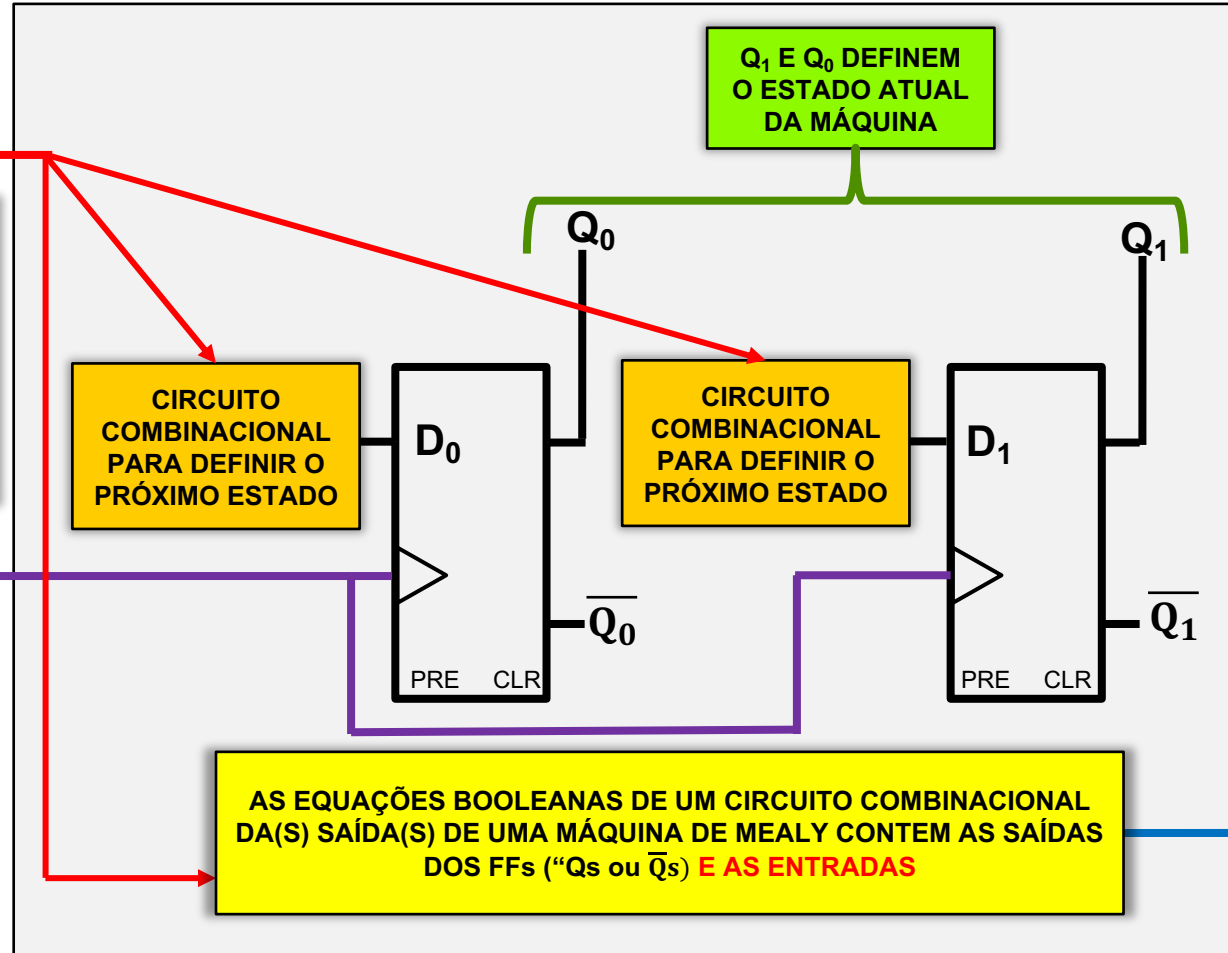
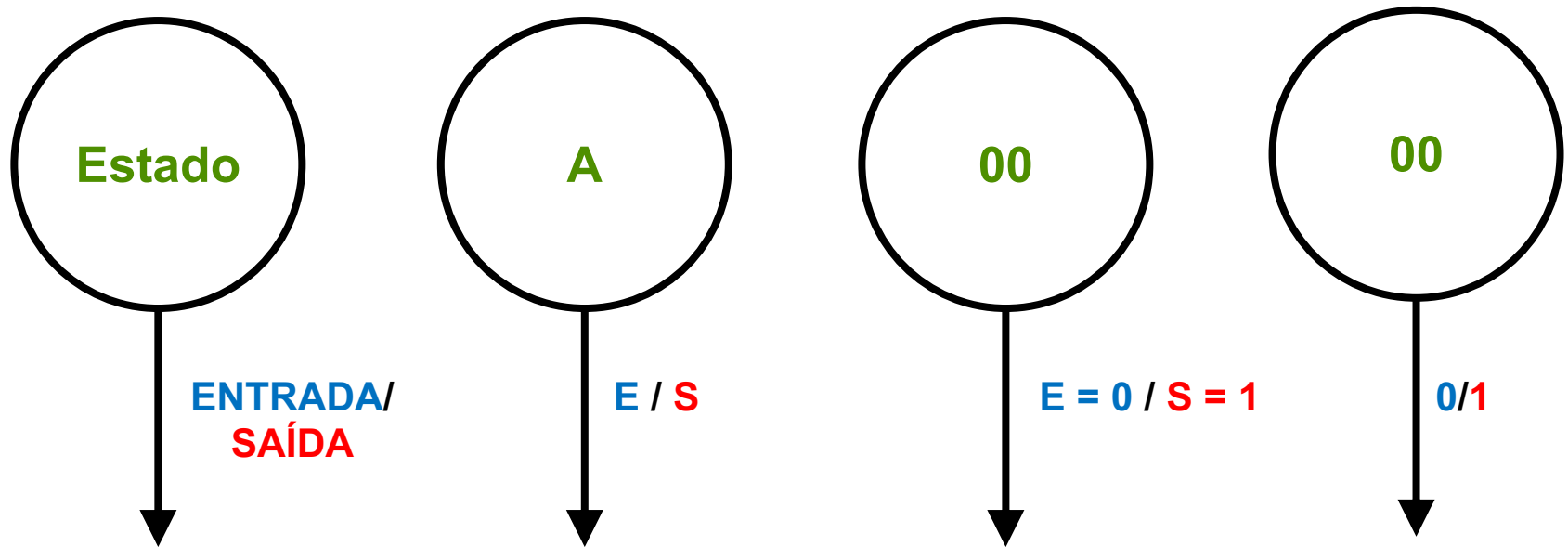
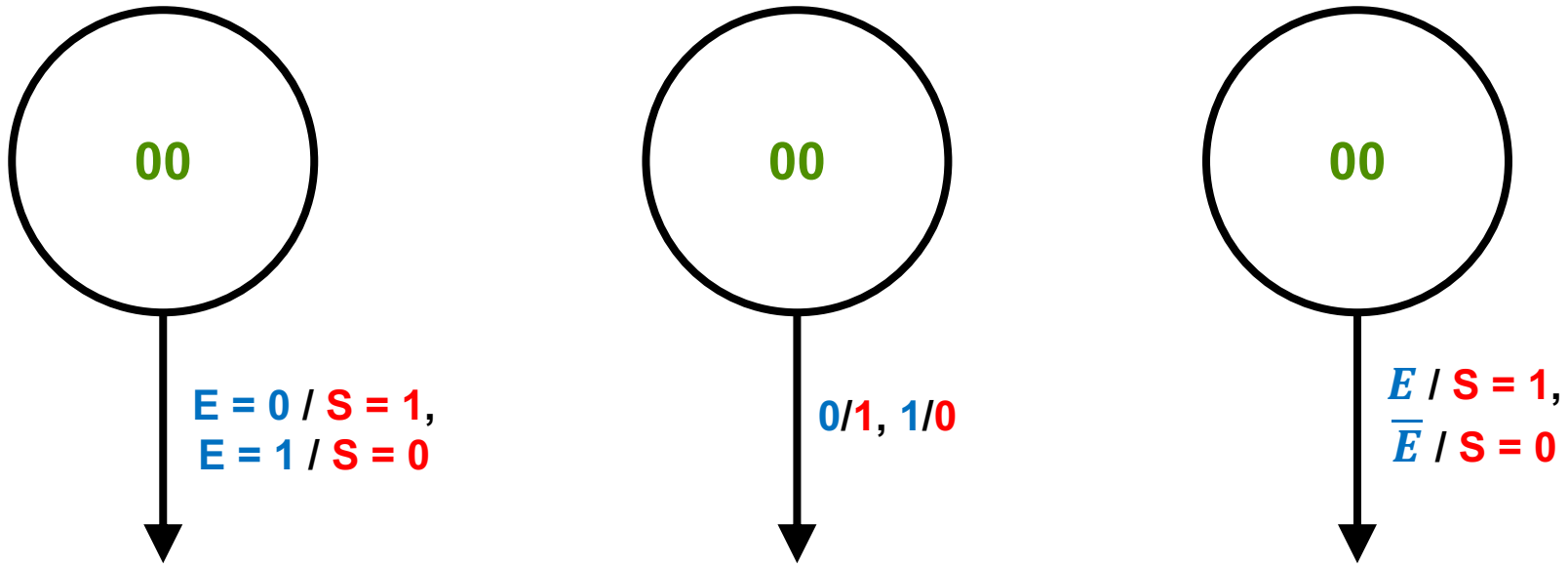


Diagrama de Estados - Mealy



- A saída depende do estado atual e da entrada
- A entrada só interfere no próximo estado

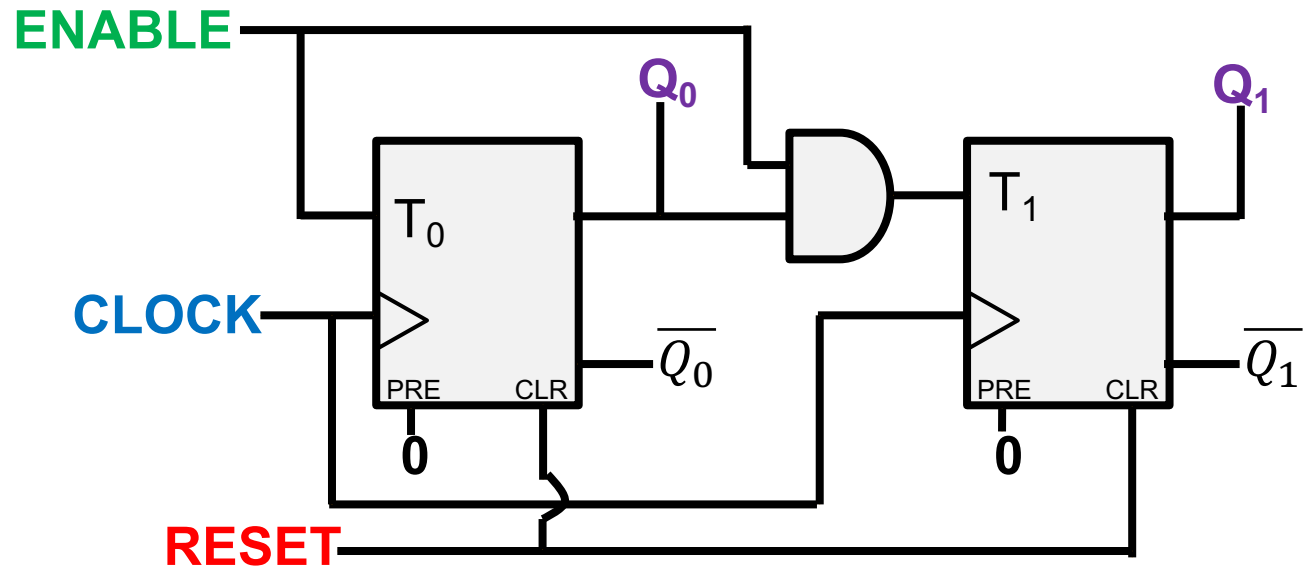
Diagrama de Estados - Mealy



- A saída depende do estado atual e da entrada
- A entrada só interfere no próximo estado

Diagrama de Estados - Mealy

- **Exemplo:** Contador síncrono crescente de 2 bits com ENABLE



Quando $\text{ENABLE} = 0 \rightarrow$ para de contar

Quando $\text{ENABLE} = 1 \rightarrow$ conta normalmente

COMO FICA O DIAGRAMA DE ESTADOS?

Diagrama de Estados - Mealy

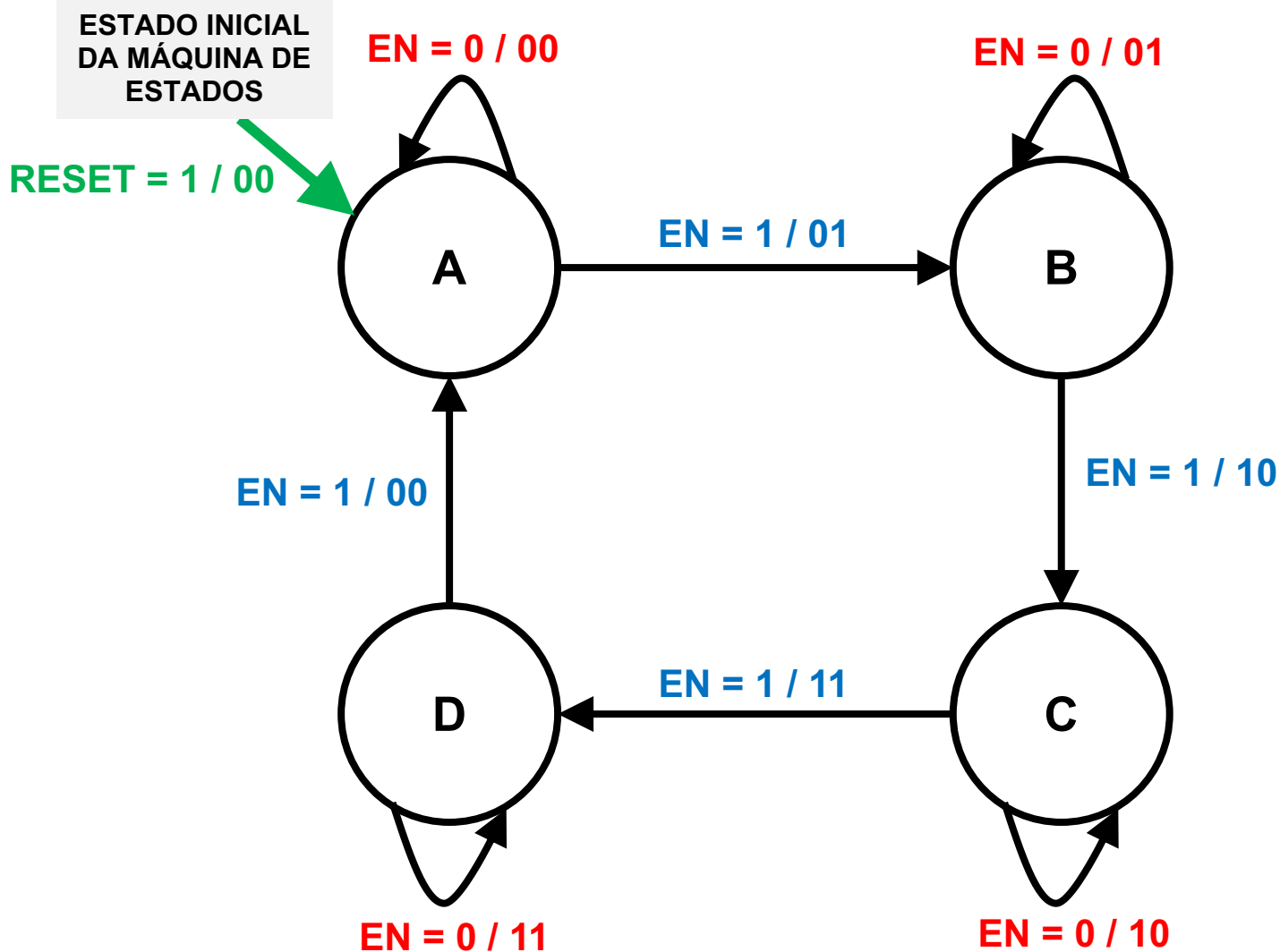
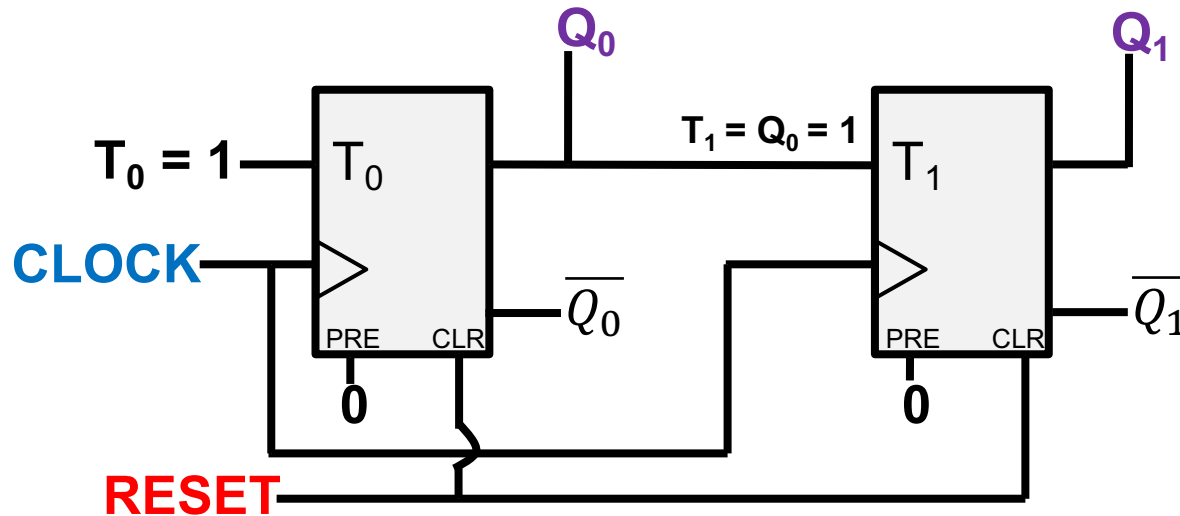


Diagrama de Estados - Mealy

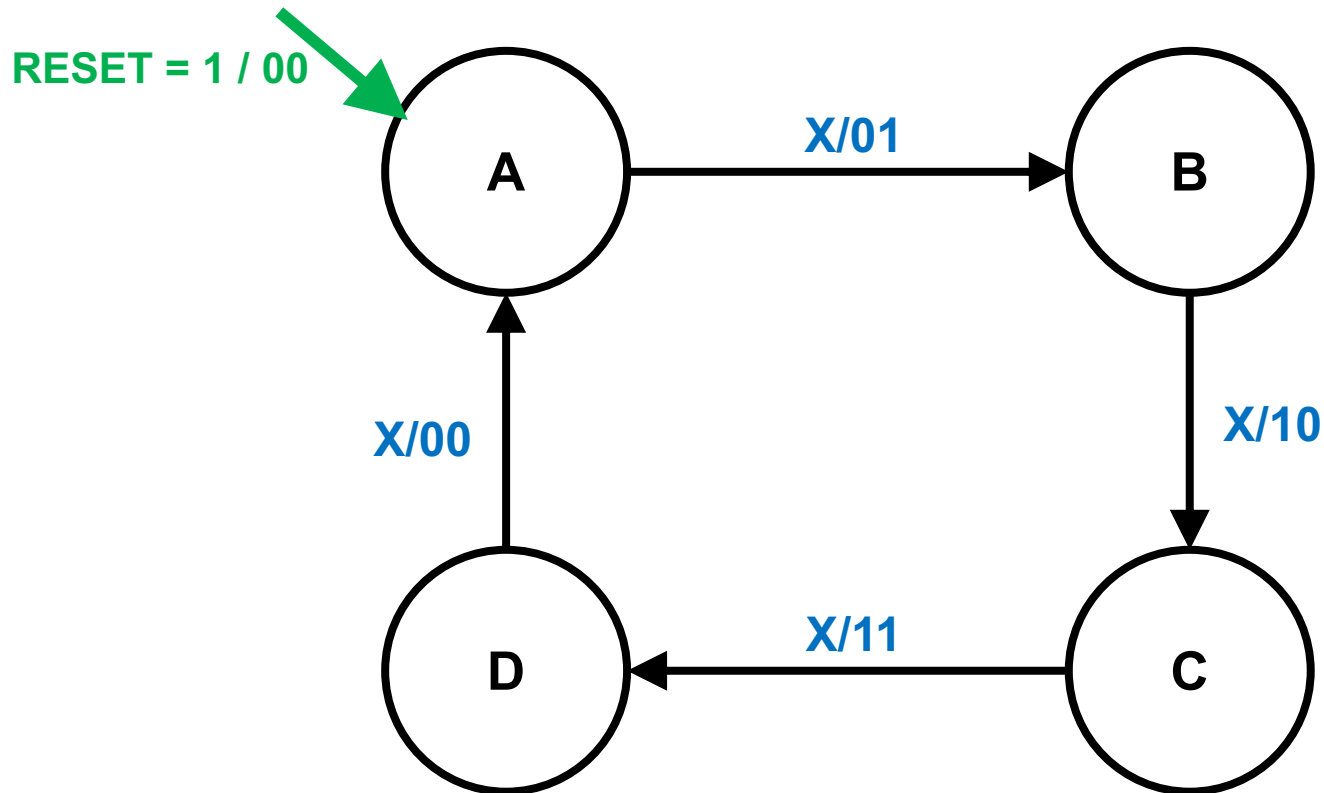
- Exemplo: Contador síncrono crescente de 2 bits



COMO FICA O DIAGRAMA DE ESTADOS?

Diagrama de Estados - Mealy

O circuito não tem entrada, então as transições acontecem independentes → X (don't care)



Exemplo – Máquina de Mealy

- Projete uma máquina de estados de **Mealy** com uma entrada E e uma saída S, onde S será 1 somente se a entrada **E for igual a 1 nas últimas duas bordas de clock.**

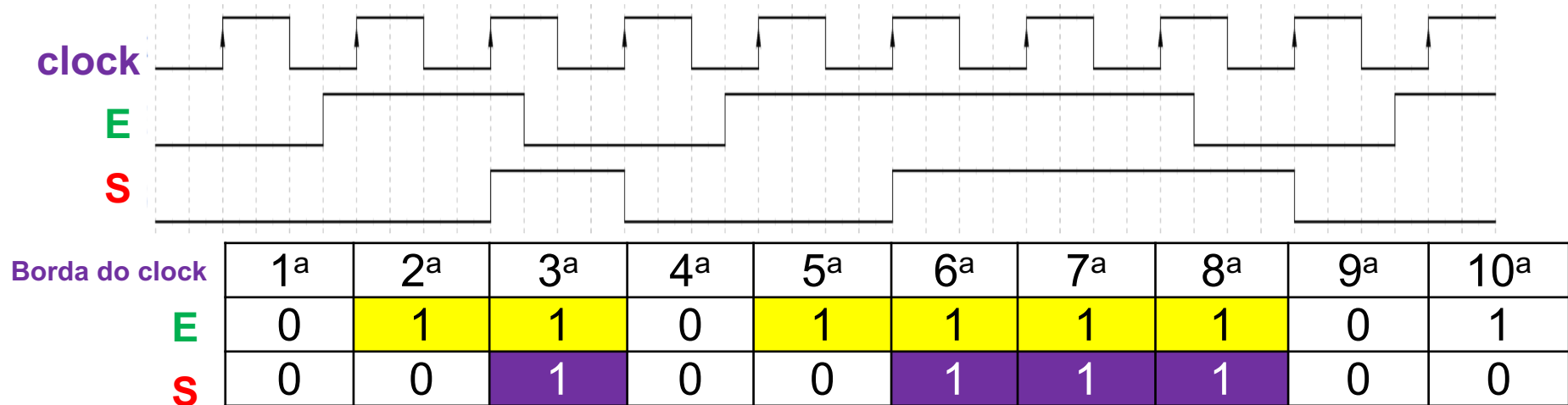


Diagrama de Estados - Mealy

ESTADO A

SE $E = 0 \rightarrow$ CONTINUA EM A E $S = 0$

SE $E = 1 \rightarrow$ VAI PARA O PRÓXIMO ESTADO E $S = 0$

ESTE É O **ESTADO INICIAL** DA MÁQUINA DE ESTADOS.

ESTE ESTADO IDENTIFICA QUE A ENTRADA E NUNCA ESTEVE EM 1 DURANTE UMA BORDA DE CLOCK OU QUANDO $E = 0$.

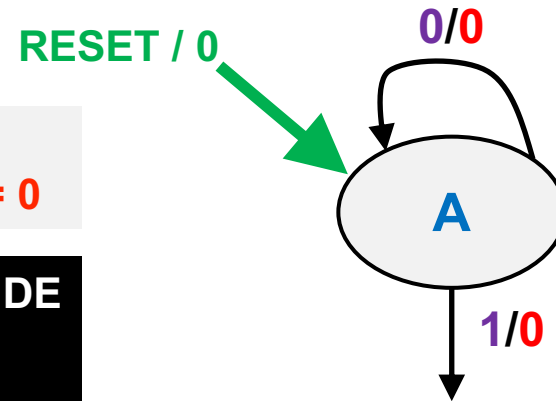


Diagrama de Estados - Mealy

ESTADO B

SE $E = 0 \rightarrow$ VAI PARA O ESTADO A E $S = 0$
SE $E = 1 \rightarrow$ CONTINUA NO ESTADO B E $S = 1$

ESTE ESTADO IDENTIFICA QUE A ENTRADA E ESTEVE EM 1 DURANTE 1 OU MAIS VEZES NAS DUAS ÚLTIMAS BORDAS DE CLOCK.

A TRANSIÇÃO 1/1 IDENTIFICA QUE A ENTRADA E ESTEVE EM 1 NAS DUAS ÚLTIMAS BORDAS DE CLOCK.

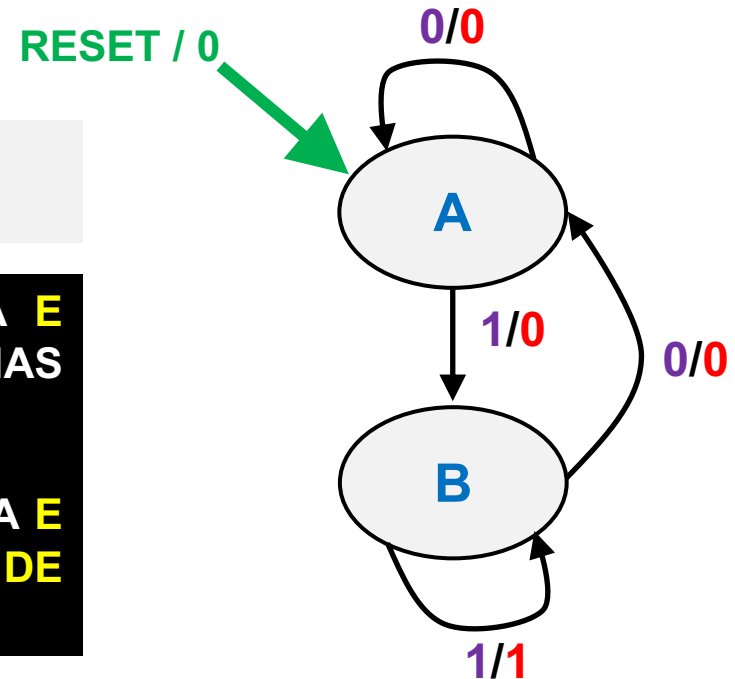
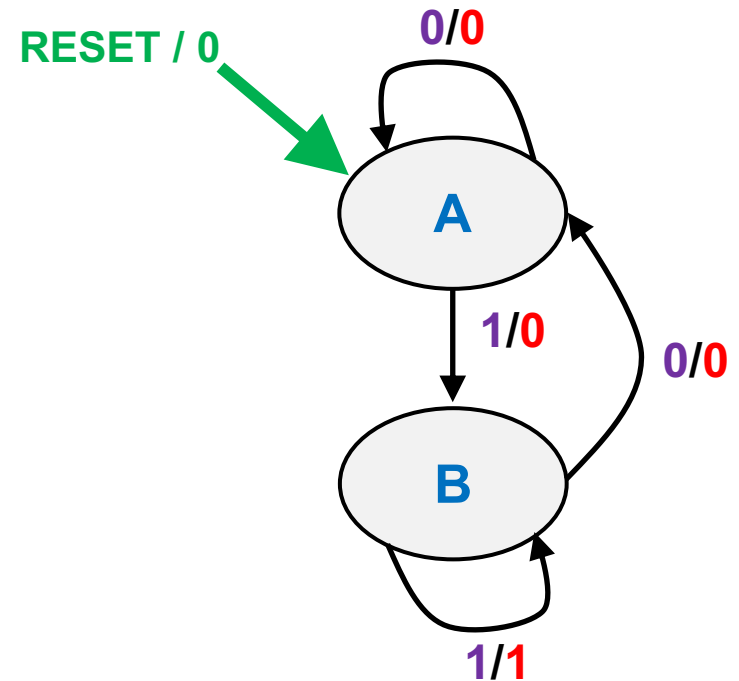
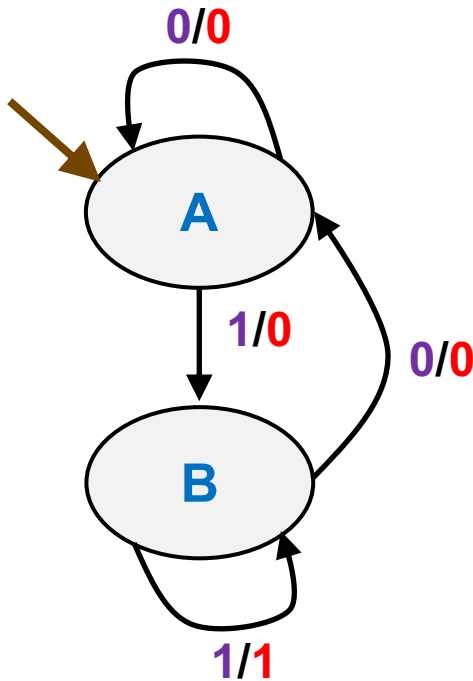


Diagrama de Estados - Mealy

**COMO
TRANSFORMAR
ESSE DIAGRAMA
DE ESTADOS EM
CIRCUITO?**



Passo 1 - Obter a tabela de estados

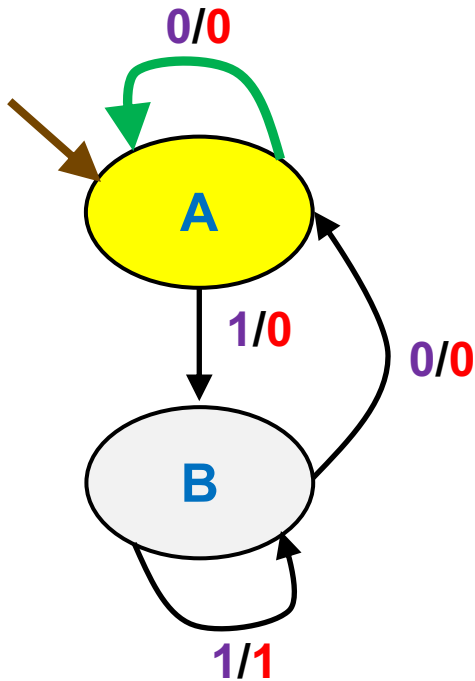


Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)

NA MÁQUINA DE MEALY CADA LINHA DA TABELA DE ESTADOS REPRESENTA UMA FLECHA DO DIAGRAMA DE ESTADOS!

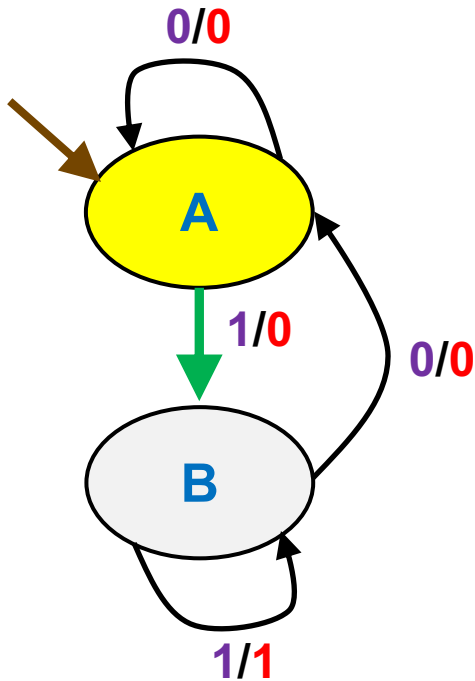
A SAÍDA SERÁ O VALOR CONTIDO NA FLECHA!

Passo 1 - Obter a tabela de estados



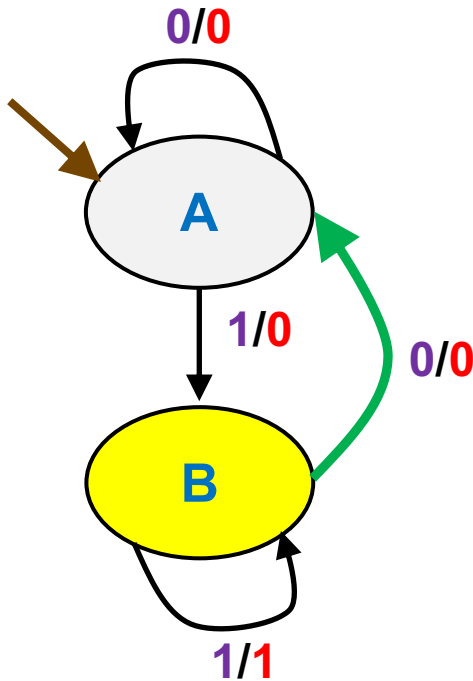
Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0

Passo 1 - Obter a tabela de estados



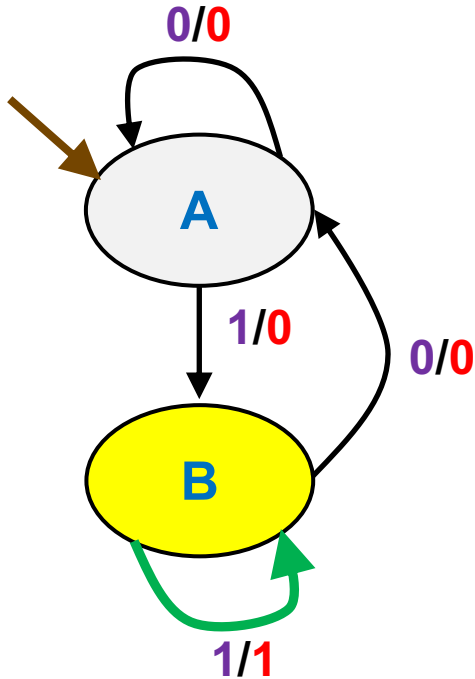
Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0

Passo 1 - Obter a tabela de estados



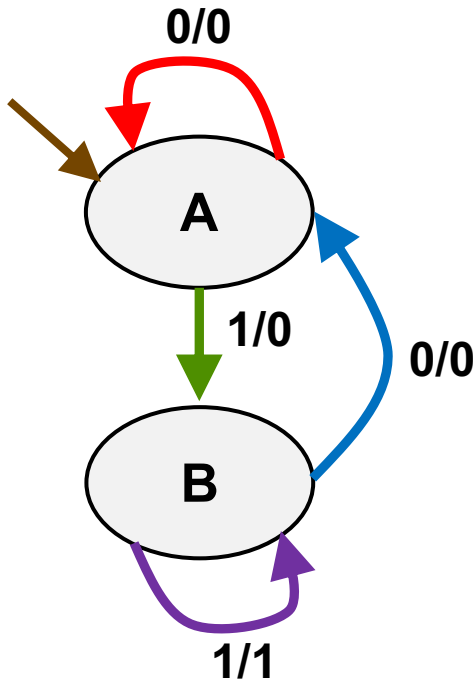
Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0

Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0
B	1	B	1

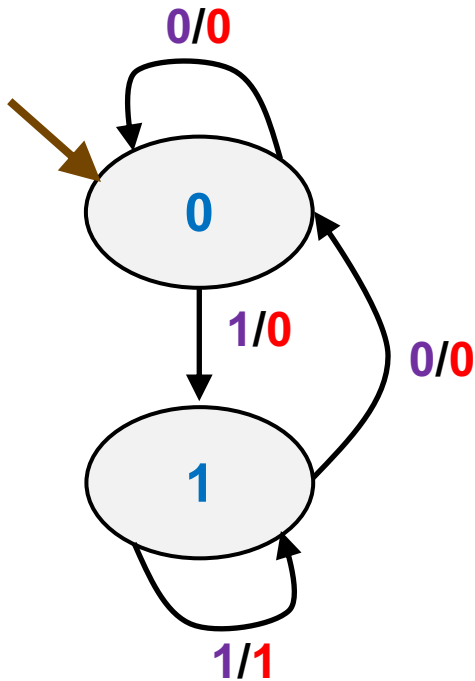
Passo 1 - Obter a tabela de estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
A	0	A	0
A	1	B	0
B	0	A	0
B	1	B	1

NA MÁQUINA DE MEALY CADA LINHA DA TABELA DE ESTADOS REPRESENTA UMA FLECHA DO DIAGRAMA DE ESTADOS!

Passo 2 – Codificação dos Estados



Estado Atual	Entrada (E)	Próximo Estado	Saída (S)
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	1	1	1

CÓDIGO DE CONTAGEM BINÁRIA

Estado	Estado do FF (Q_0)
A	0
B	1

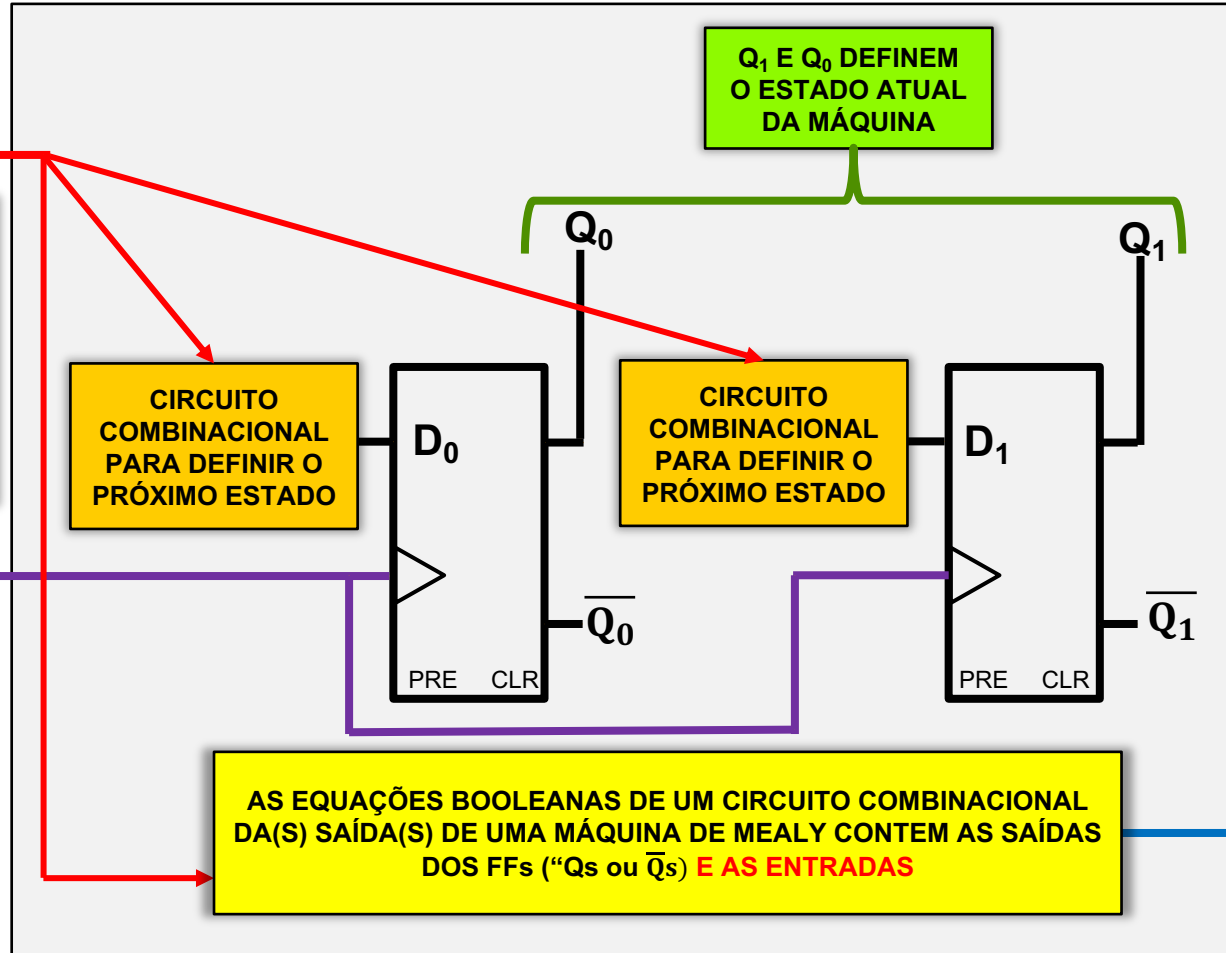
Passo 3 – Escolha do Flip-Flop

□ NESTE EXEMPLO VAMOS UTILIZAR O FLIP-FLOP D

ENTRADA(S)

EM UMA MÁQUINA DE MEALY, AS ENTRADAS SÃO USADAS NOS CIRCUITOS COMBINACIONAIS DE PRÓXIMO ESTADO E NO(S) CIRCUITO(S) DA(S) SAÍDA(S)

CLOCK



Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual	Entrada	Próximo Estado	Saída	Equação de Entrada (FF D)
Q_0	E	Q_0	S	D_0
0	0	0	0	0
0	1	1	0	1
1	0	0	0	0
1	1	1	1	1



Para o FF tipo D, a tabela das equações de entrada é igual a tabela do próximo estado!

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual	Entrada	Próximo Estado	Saída	Equação de Entrada (FF D)
Q_0	E		S	D_0
0	0	0	0	0
0	1	0	0	1
1	0	0	0	0
1	1	1	1	1

DEPOIS DE PREENCHER A PARTE DA TABELA DE EQUAÇÕES DE ENTRADA, VOCÊ PODE DESCARTAR A PARTE DE PRÓXIMO ESTADO

Passo 4 – Equações de Entrada dos FFs

Estado Atual	Entrada	Saída	Equação de Entrada (FF D)
Q_0	E	S	D_0
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	0
1	1	1	1

Equações de Entrada para o FF tipo D :

$$D_0 = \overline{Q_0}E + Q_0 E = E(\overline{Q_0} + Q_0) = E$$

Passo 4 – Equações da(s) Saída(s)

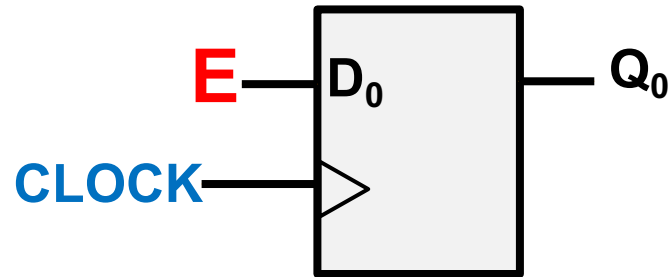
Estado Atual	Entrada	Saída	Equação de Entrada (FF D)
Q_0	E	S	D_0
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	0
1	1	1	1

Equações de Saída :

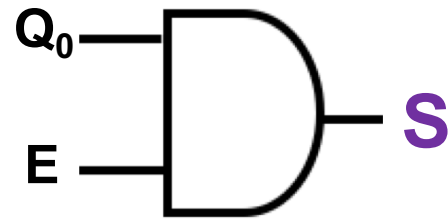
$$S = Q_0 E$$

MÁQUINA DE MEALY → SAÍDA DEPENDE DO ESTADO ATUAL E DA(S) ENTRADA(S)

Passo 5 – Circuito



$$D_0 = E$$

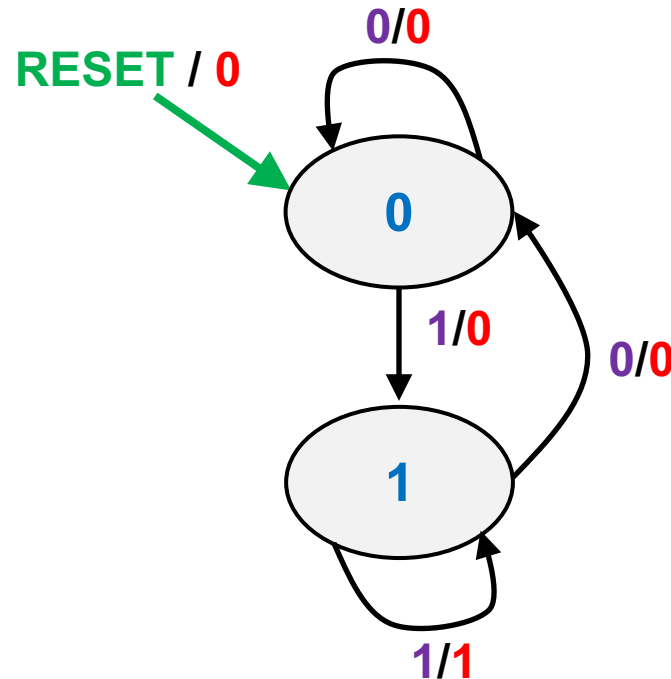


$$S = Q_0 E$$

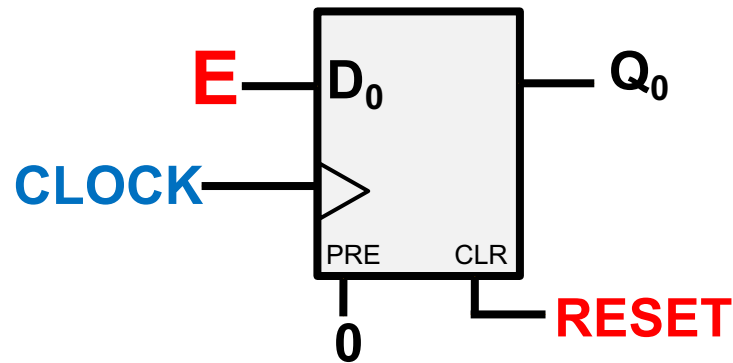
Passo 5 – Circuito → RESET

□ RESET

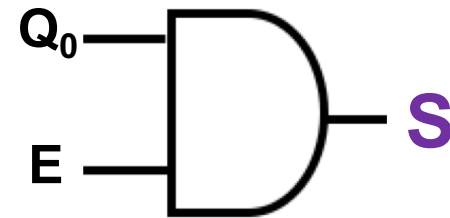
- Define o estado inicial da máquina de estados



Passo 5 – Circuito → RESET



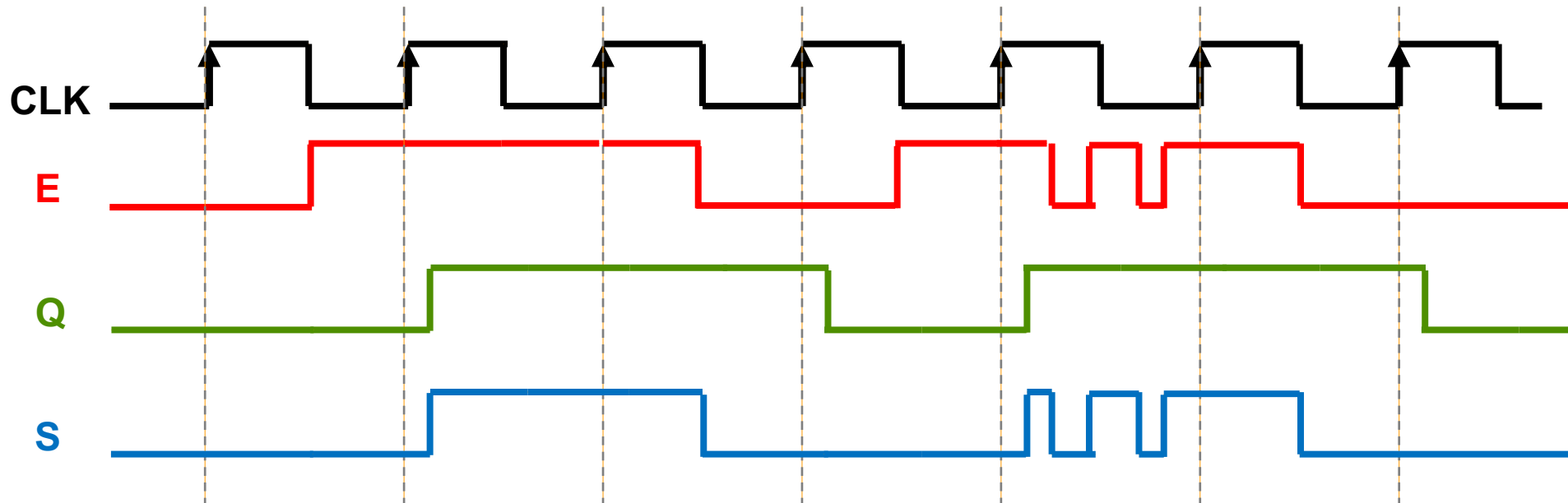
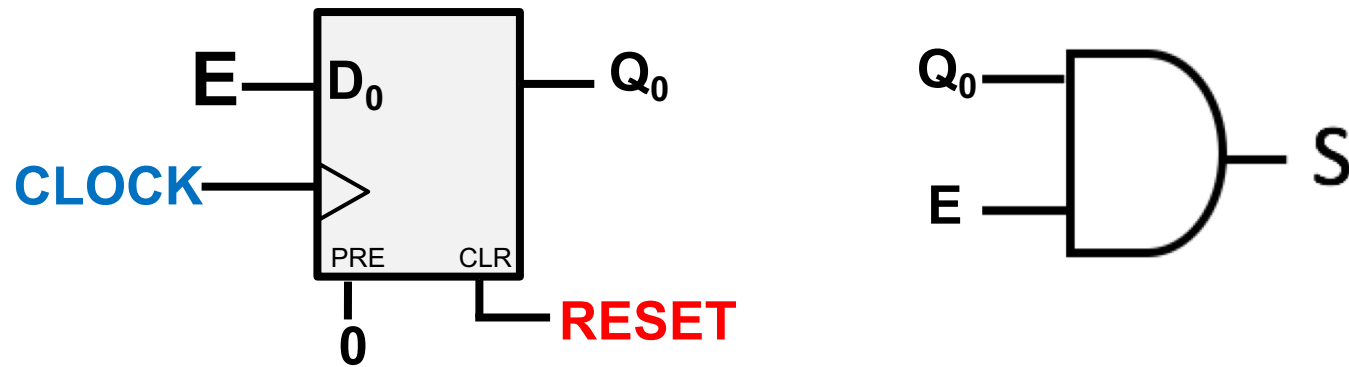
$$D_0 = E$$



$$S = Q_0 E$$

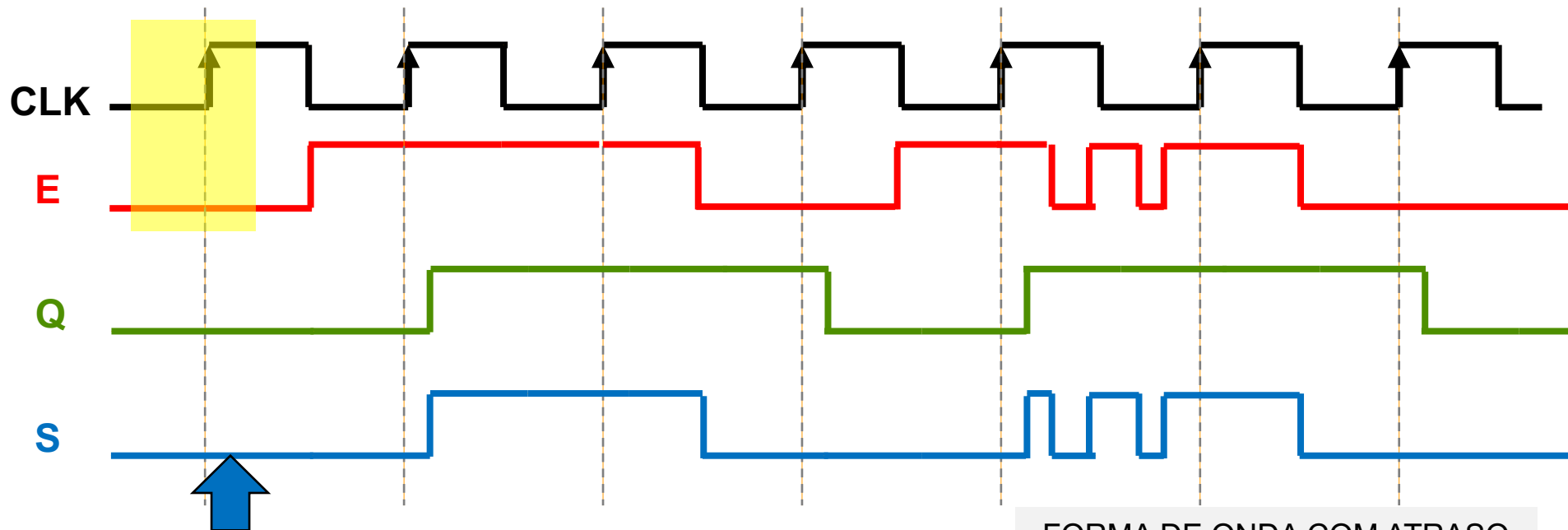
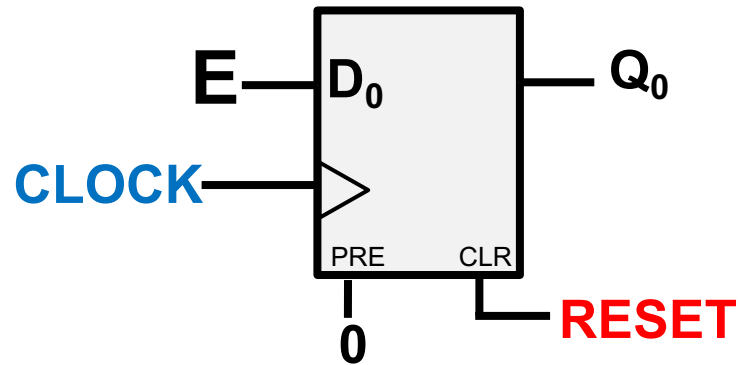
RESET assíncrono!

Análise



FORMA DE ONDA COM ATRASO

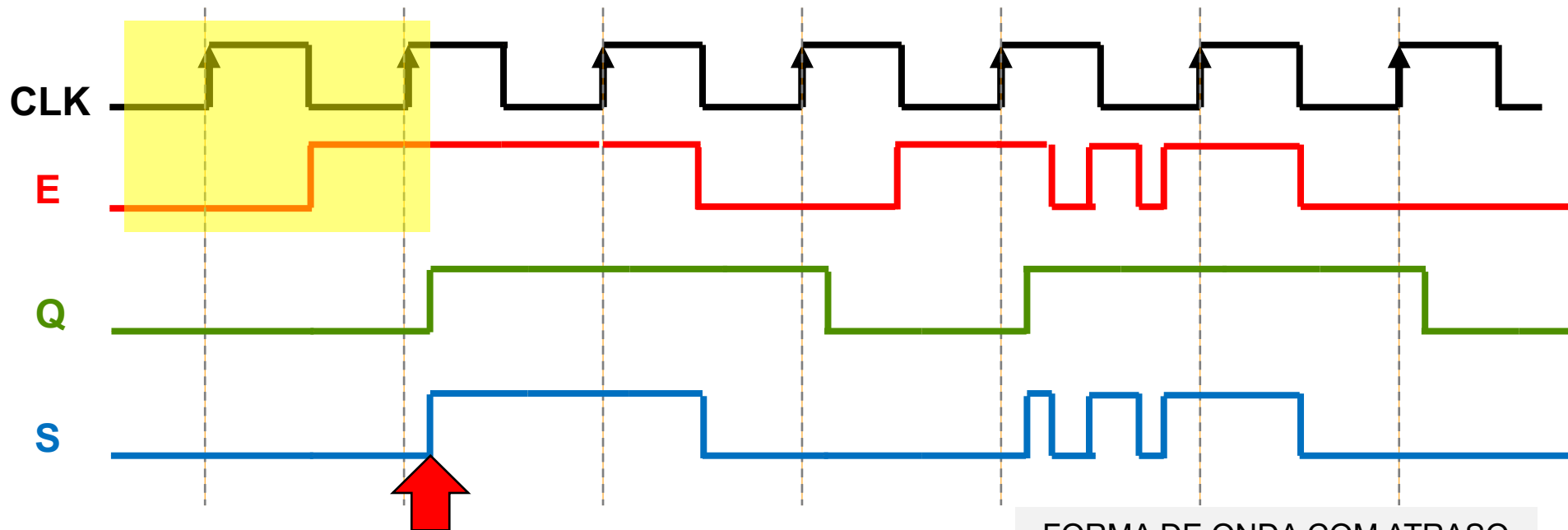
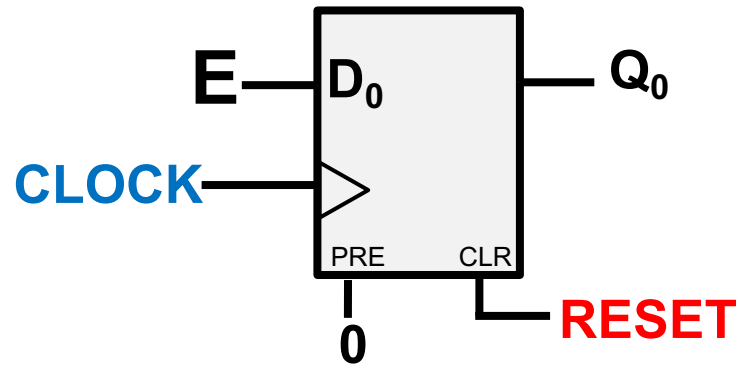
Análise



FORMA DE ONDA COM ATRASO

E FICOU 0 VEZES EM 1 NA BORDA DE CLOCK → **SAÍDA = 0**

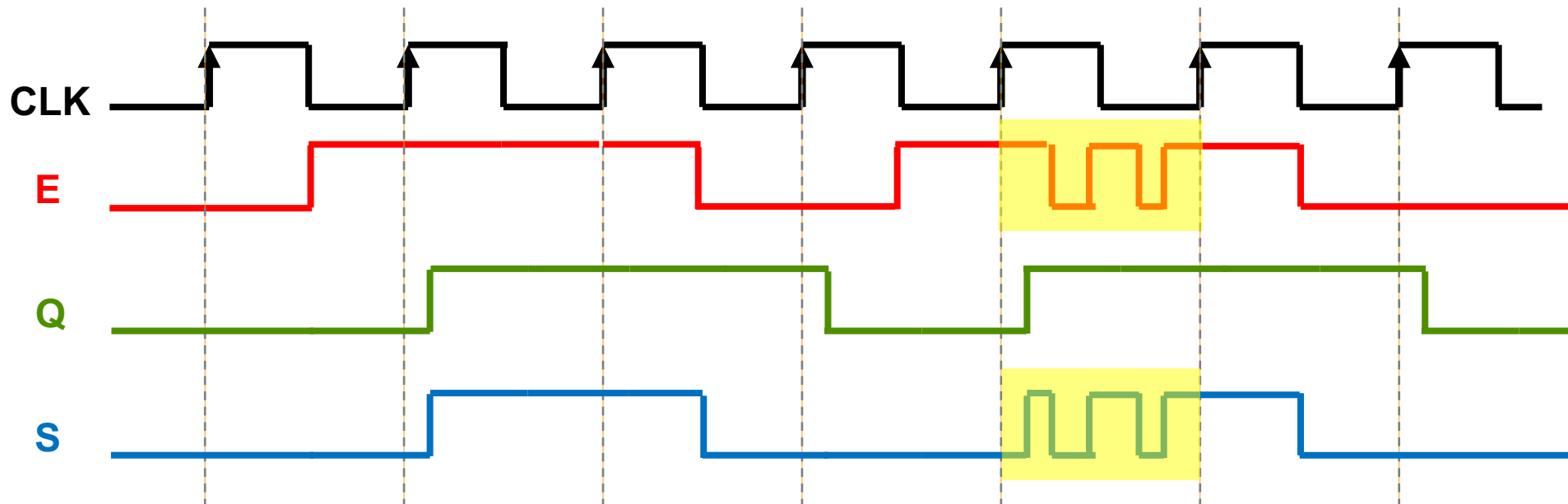
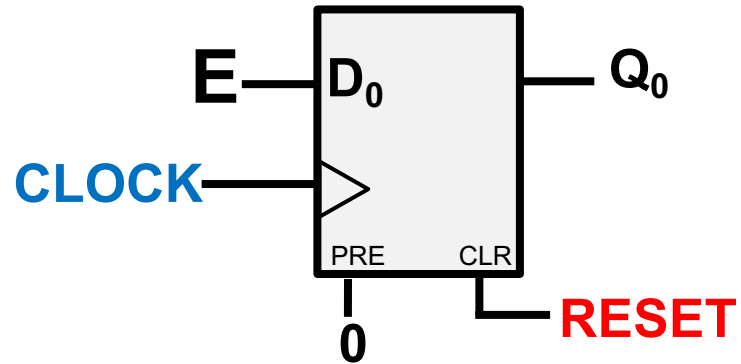
Análise



FORMA DE ONDA COM ATRASO

E FICOU 1 VEZES EM 1 NAS 2 ULT. BORDAS → SAÍDA = 1 ???

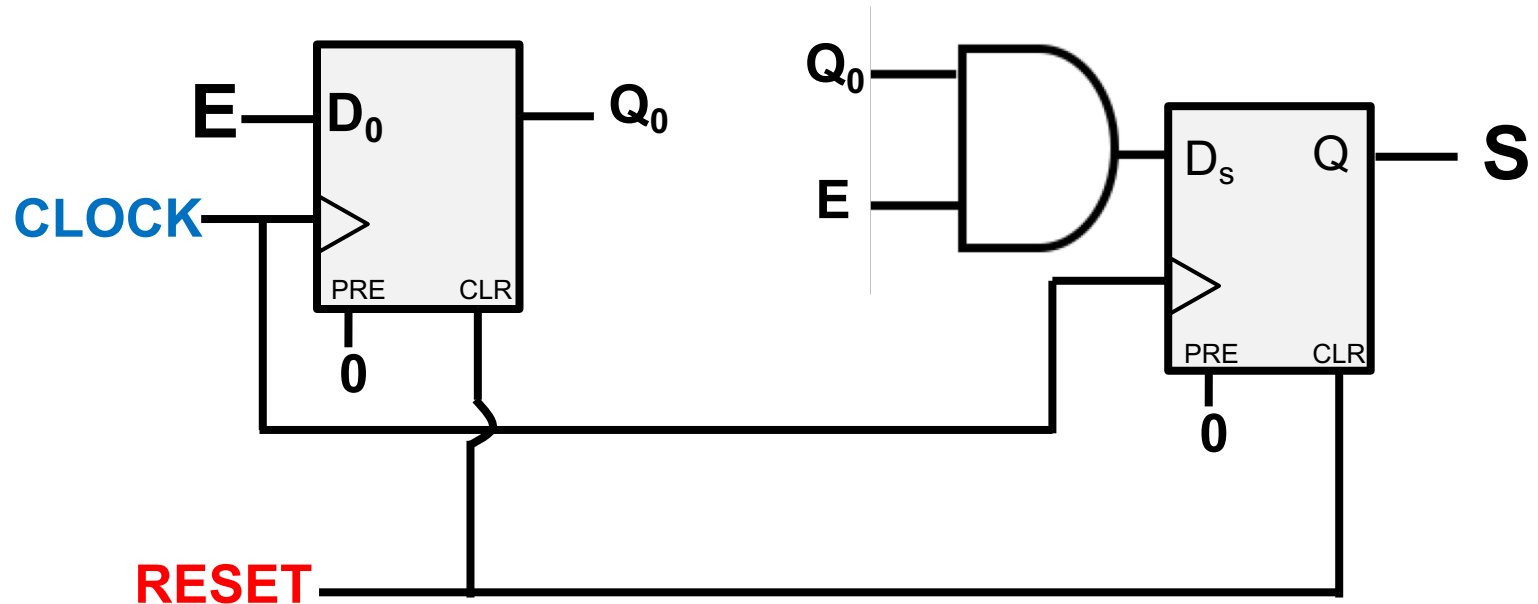
Análise



FORMA DE ONDA COM ATRASO

VARIAÇÕES DA ENTRADA SÃO SENTIDAS NA SAÍDA

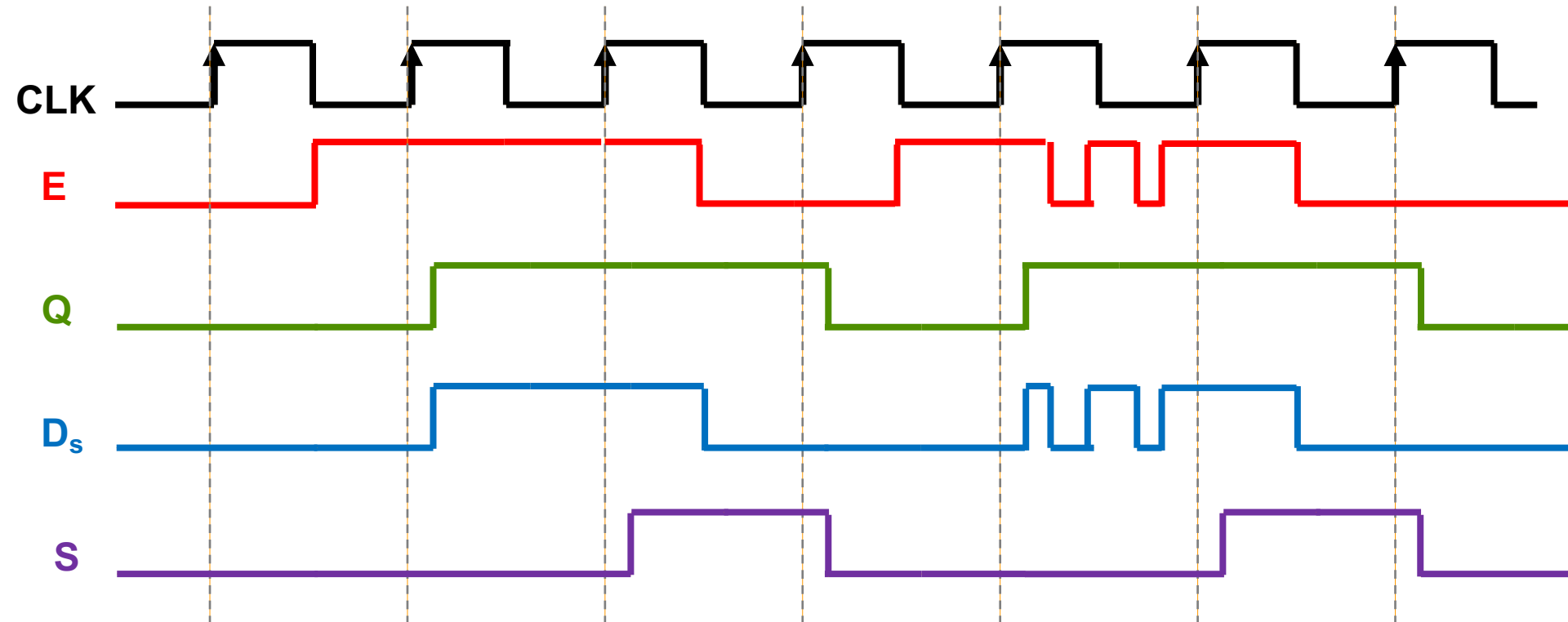
Correção do problema



Máquina de Mealy Síncrona

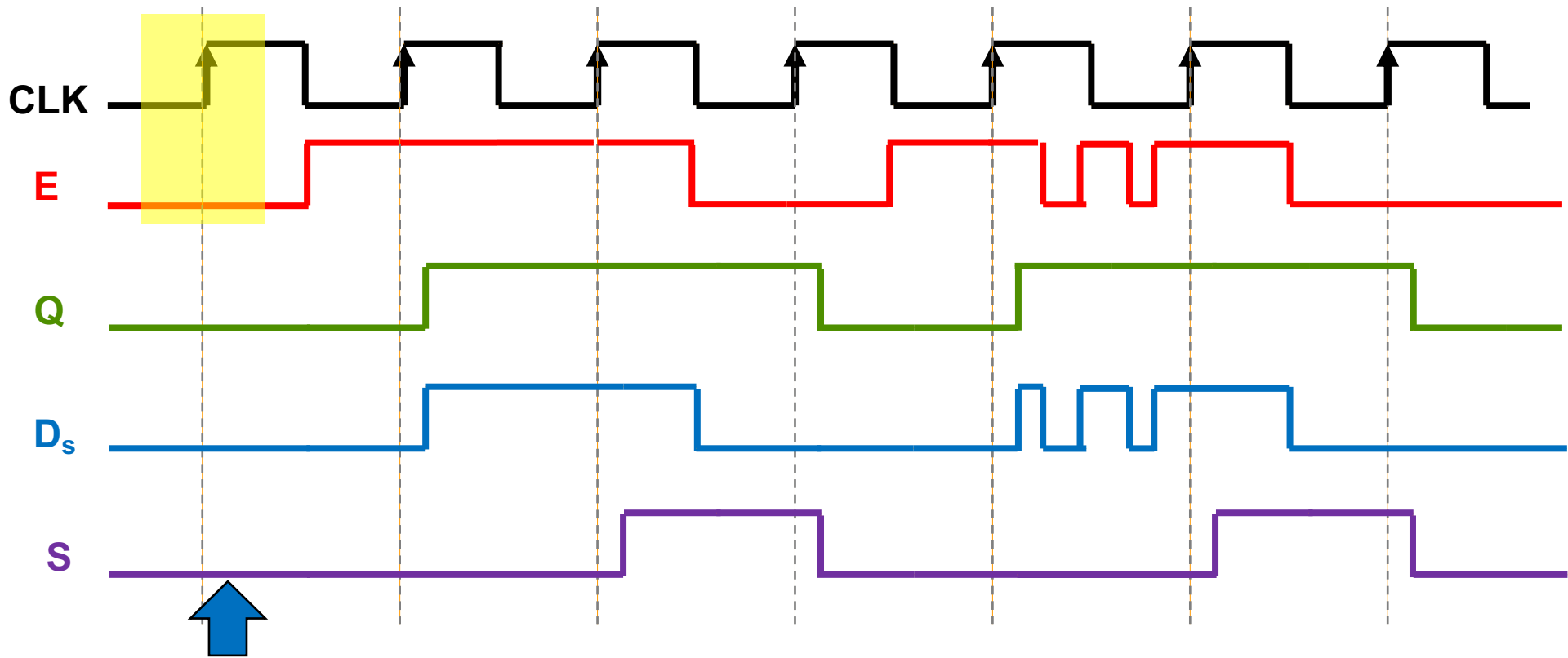
- Na máquina de Mealy tradicional, como a saída depende da entrada, valores incorretos na entrada durante o ciclo de clock podem afetar a saída
- Uma solução para evitar valores incorretos na saída é torná-la síncrona:
 - adiciona-se um flip-flop tipo D na saída do circuito
 - este flip-flop terá o mesmo clock dos demais flip-flops do circuito
 - a nova saída do circuito será a saída Q deste flip-flop

Correção do problema



FORMA DE ONDA COM ATRASO

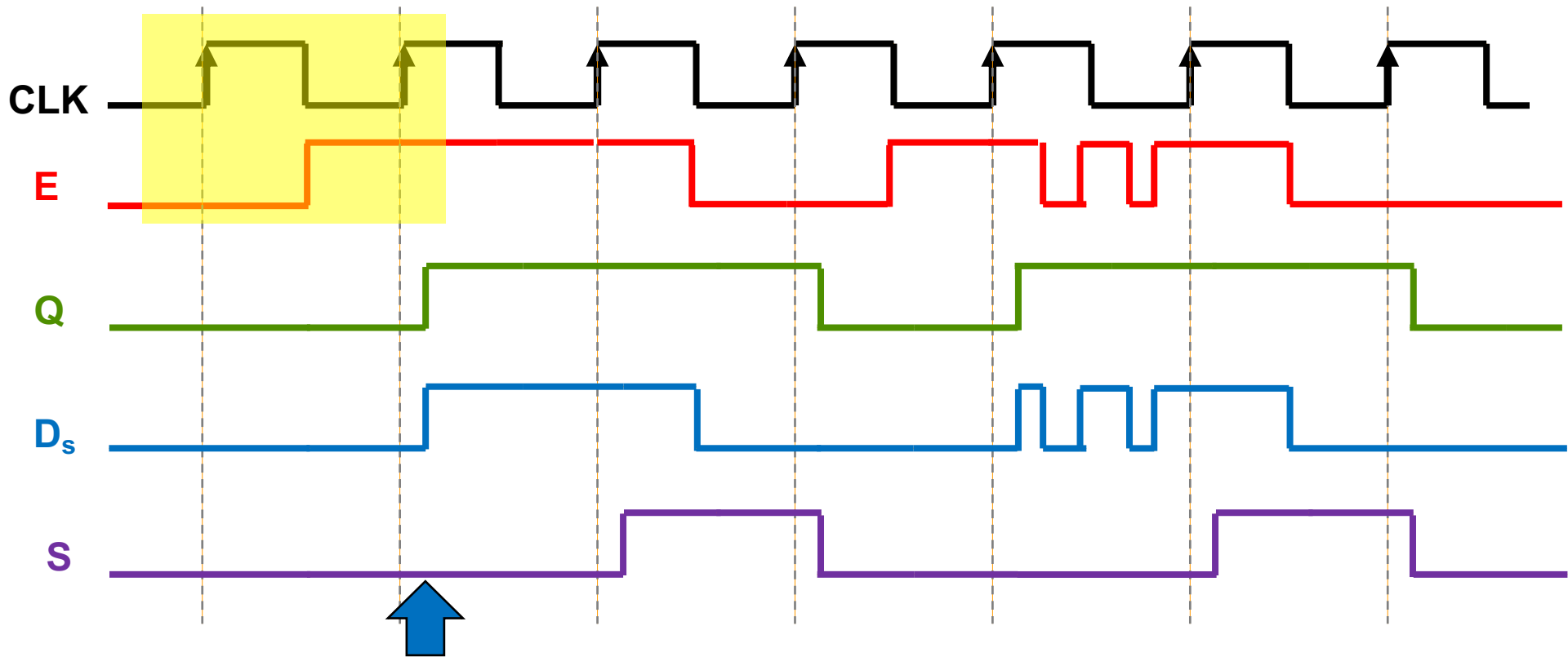
Correção do problema



E FICOU 0 VEZES EM 1 NAS 2 ULT. BORDAS → SAÍDA = 0

FORMA DE ONDA COM ATRASO

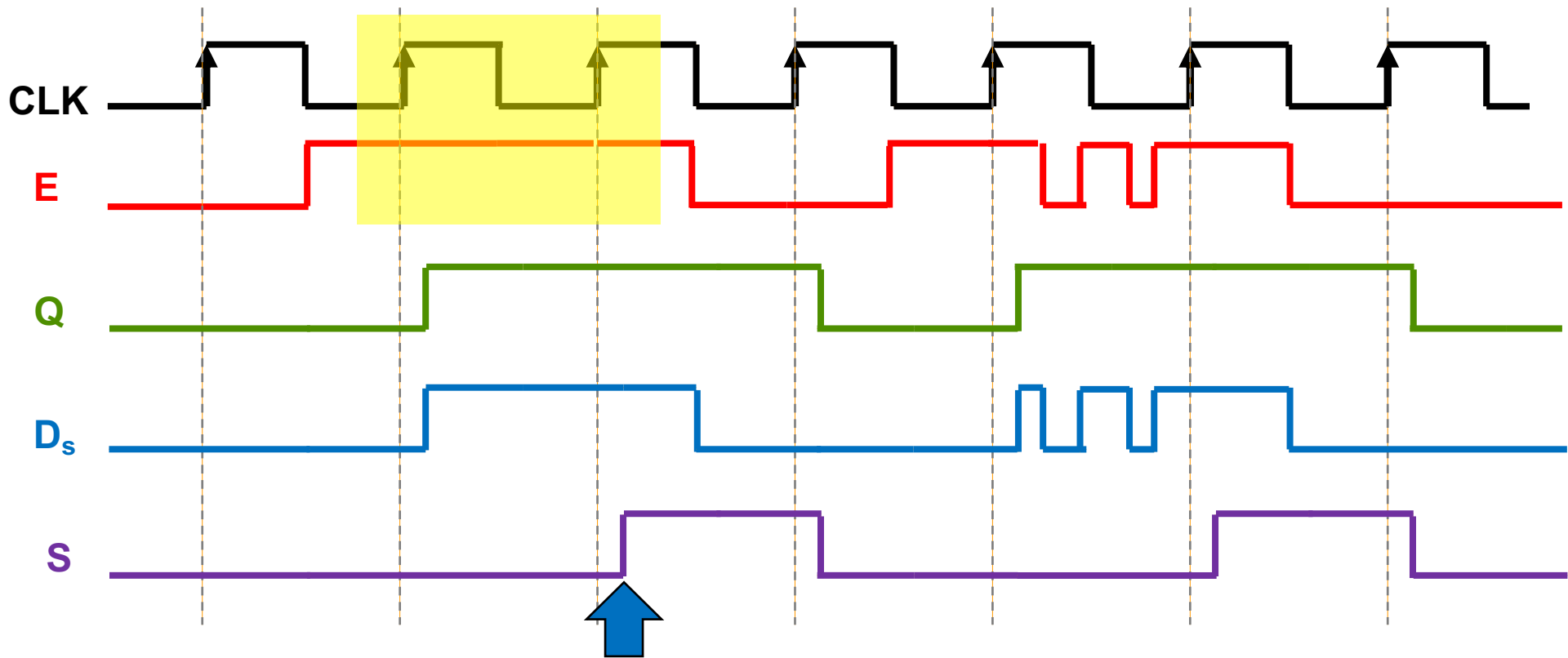
Correção do problema



E FICOU **1** VEZES EM 1 NAS 2 ULT. BORDAS → **SAÍDA = 0**

FORMA DE ONDA COM ATRASO

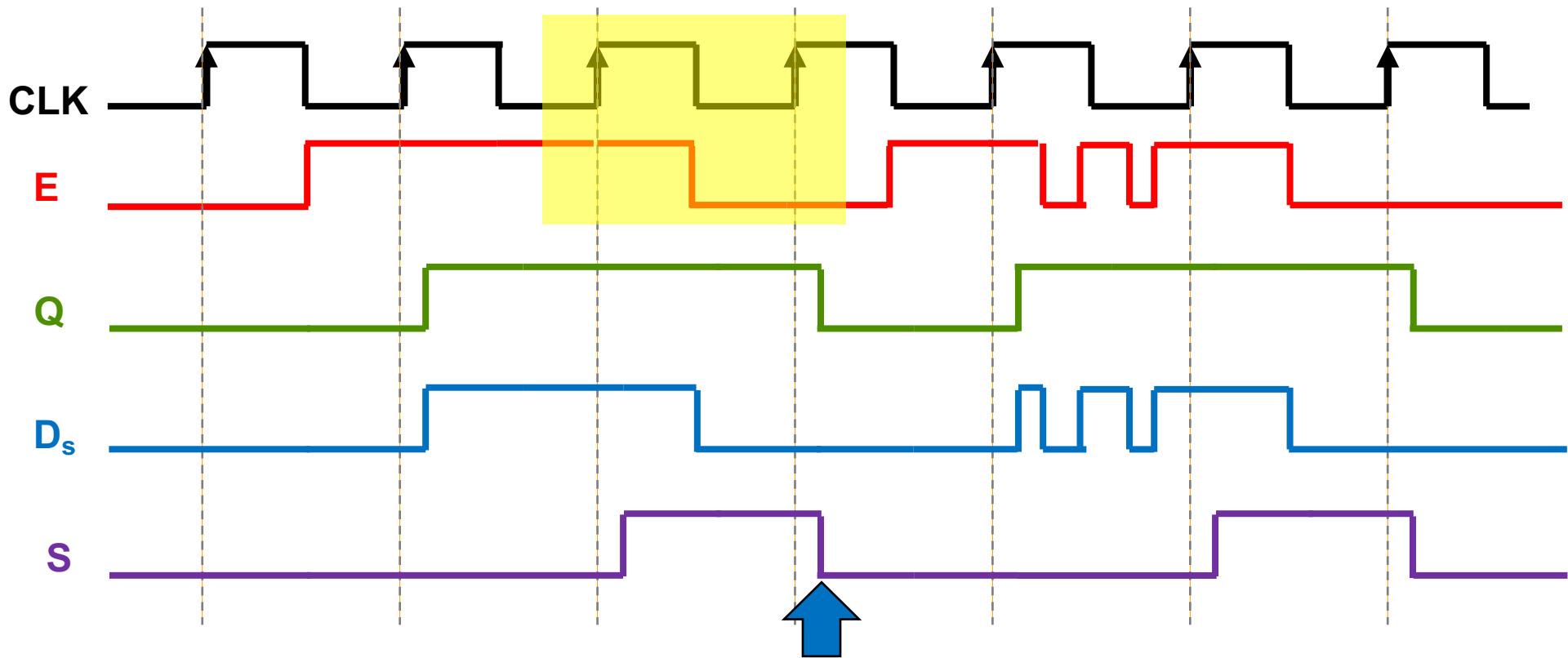
Correção do problema



E FICOU **2** VEZES EM 1 NAS 2 ULT. BORDAS → **SAÍDA = 1**

FORMA DE ONDA COM ATRASO

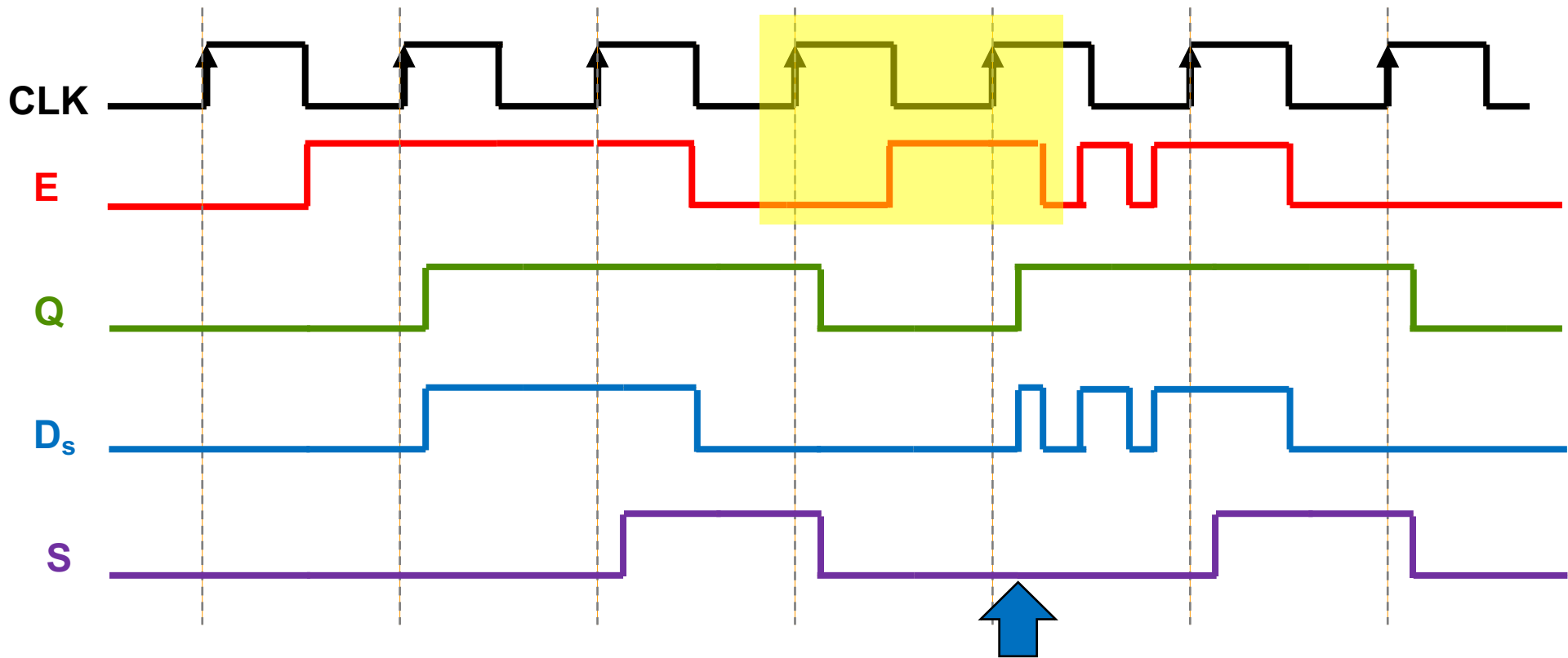
Correção do problema



E FICOU **1** VEZES EM 1 NAS 2 ULT. BORDAS → **SAÍDA = 0**

FORMA DE ONDA COM ATRASO

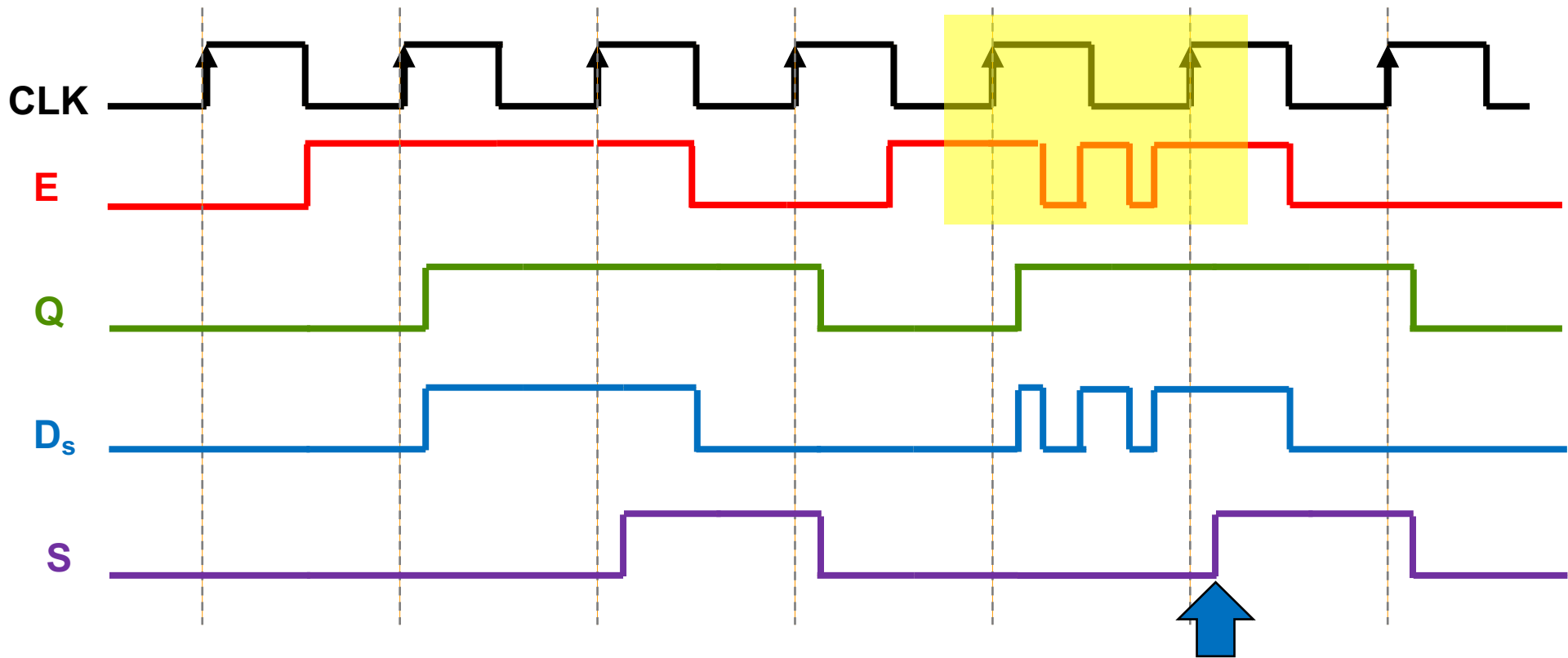
Correção do problema



E FICOU **1** VEZES EM 1 NAS 2 ULT. BORDAS → **SAÍDA = 0**

FORMA DE ONDA COM ATRASO

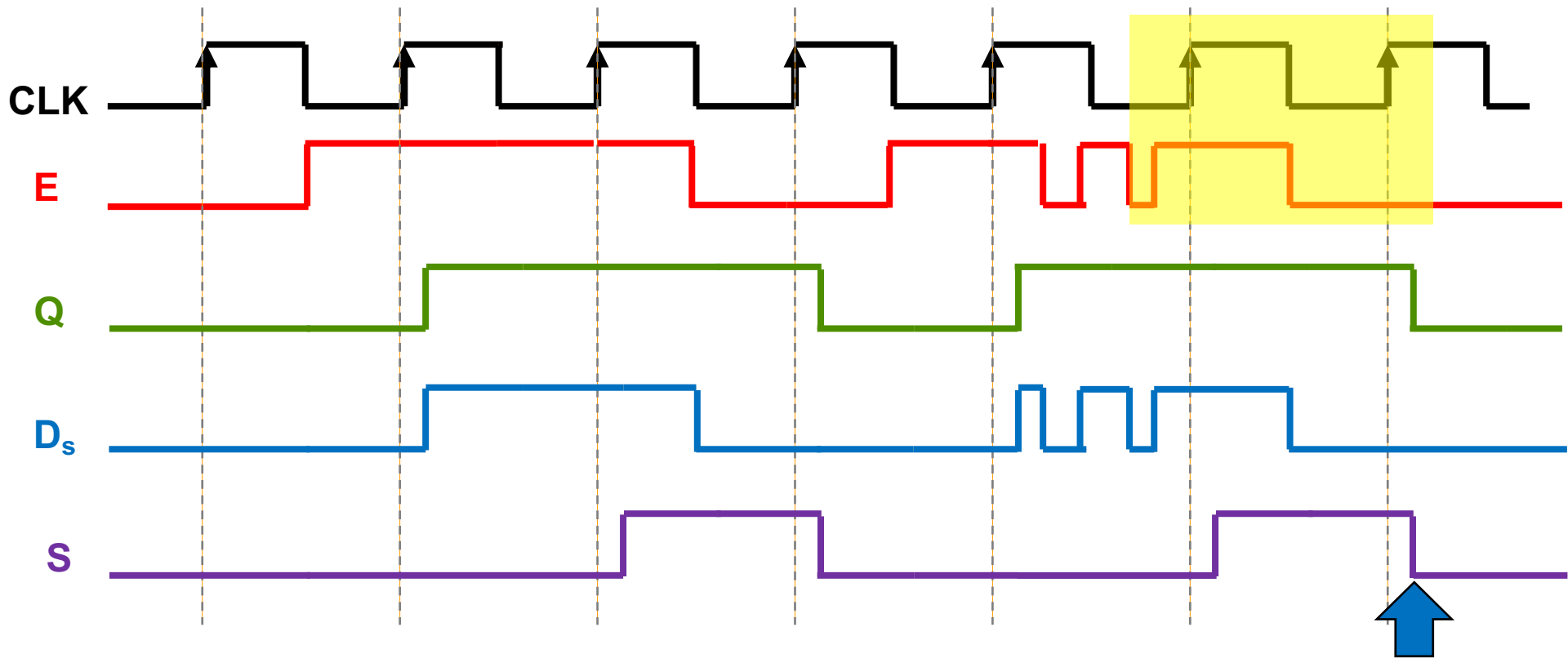
Correção do problema



E FICOU **2** VEZES EM 1 NAS 2 ULT. BORDAS → **SAÍDA = 1**

FORMA DE ONDA COM ATRASO

Correção do problema



E FICOU **1** VEZES EM 1 NAS 2 ULT. BORDAS → **SAÍDA = 0**

FORMA DE ONDA COM ATRASO

Moore ou Mealy?

- ❑ Em geral, uma máquina de Mealy de um circuito será mais econômica em componentes físicos (*hardware*) do que a versão Moore
- ❑ Na máquina de Mealy, como a saída depende da entrada, valores incorretos na entrada durante o ciclo de clock podem afetar a saída
- ❑ Isso pode não ocorrer na versão Moore, pois alterações na saída e no estado só ocorrem na transição do clock (melhor sincronismo)

Máquinas de Estados Síncronas

- Em geral, máquinas de estados **síncronas** são muito mais fáceis de implementar e debugar que máquinas de estados assíncronas
→ **Máquinas de Moore**

- **Você deve usar máquinas Mealy assíncronas somente após uma análise muito cuidadosa do comportamento de temporização de entrada/saída da máquina de estados finitos**