



# PROJETOS DIGITAIS E MICROPROCESSADORES CLOCK SKEW

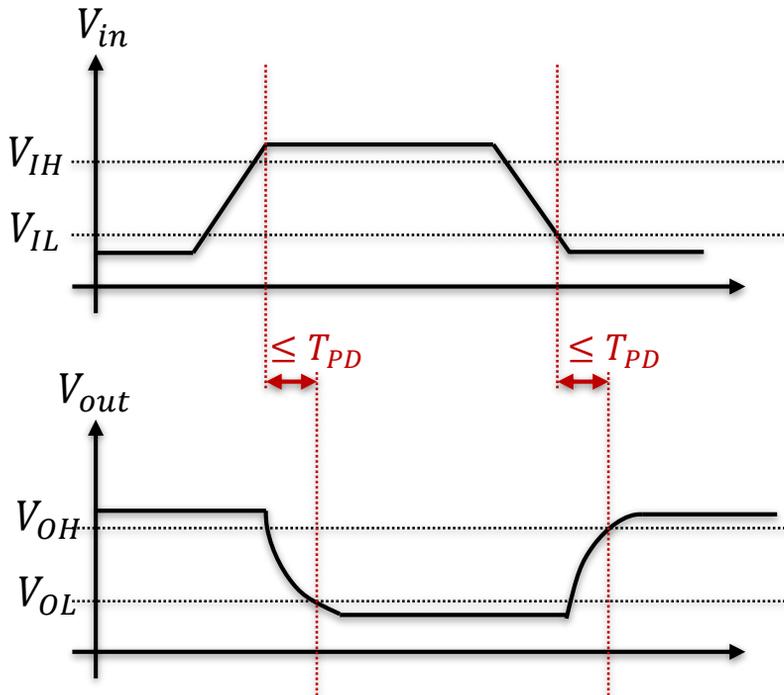
Marco A. Zanata Alves

# ATRASOS: CIRCUITOS COMBINACIONAIS

$T_{PC}$  Tempo de propagação do circuito combinacional

$T_{CC}$  Tempo de contaminação do circuito combinacional

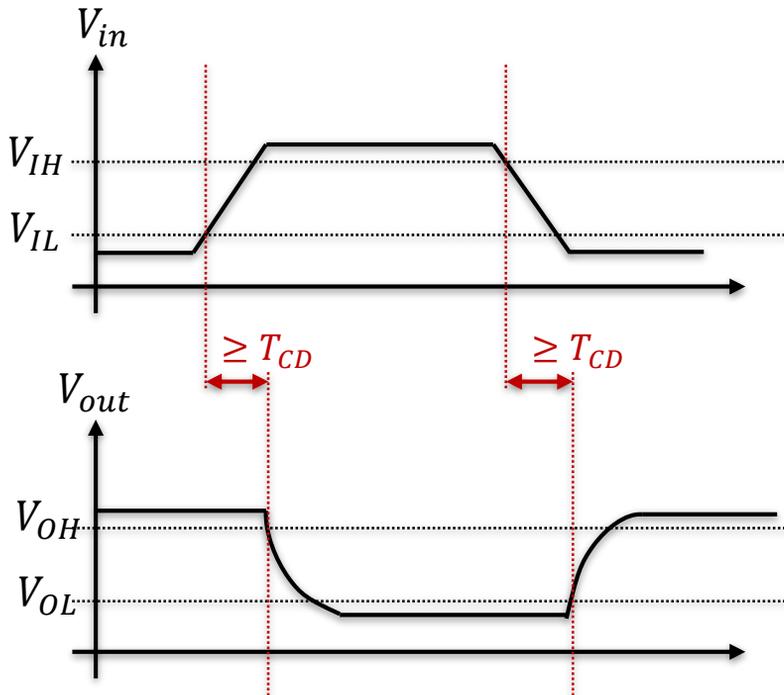
# ATRASO DE PROPAGAÇÃO (PROPAGATION DELAY TIME)



Atraso de **propagação** ( $T_{PD}$ ):  
O **limite superior** no atraso  
entre as **entradas válidas** até  
as **saídas válidas**

Tempo para as saídas  
ficarem prontas

# ATRASO DE CONTAMINAÇÃO (CONTAMINATION DELAY TIME)



Atraso de **contaminação** ( $T_{CD}$ ):  
O **limite inferior** no atraso  
entre as **entradas inválidas**  
até as **saídas inválidas**

Tempo para as saídas  
ficarem inválidas

# ATRASOS: CIRCUITOS SEQUENCIAIS

$T_{PS}$  Tempo de propagação (programação) do circuito sequencial (registrador)

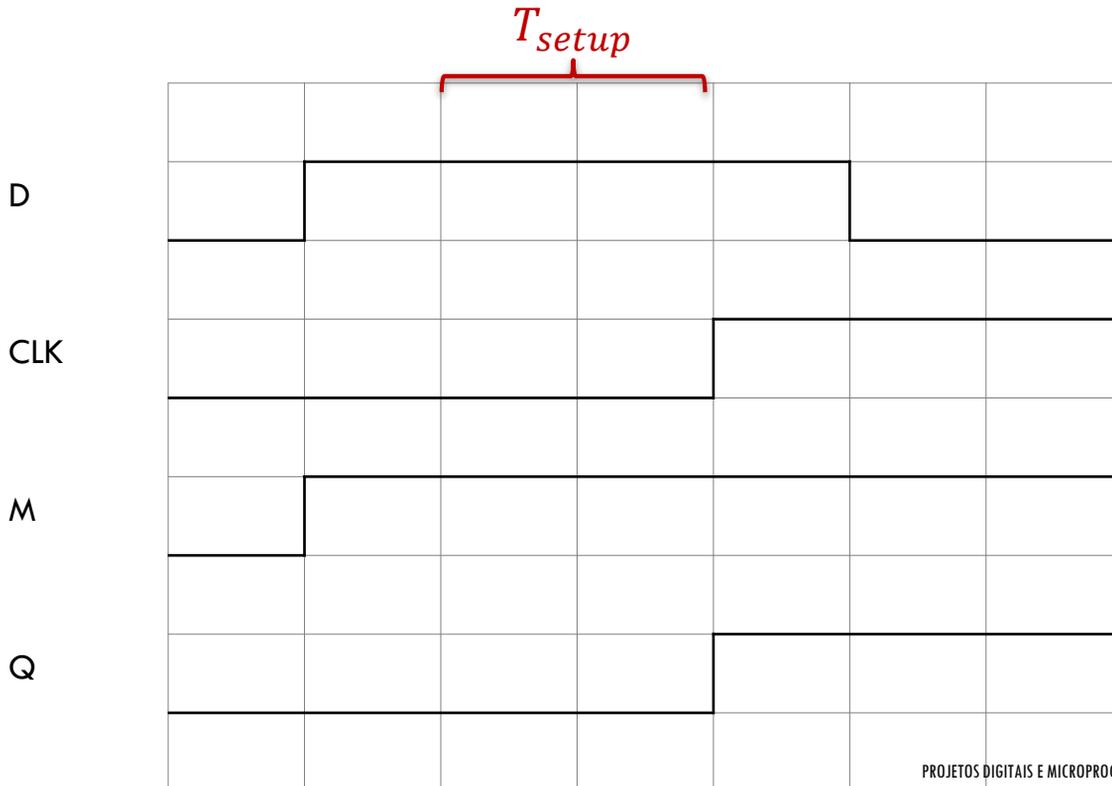
$T_{CS}$  Tempo de contaminação do circuito sequencial (registrador)

$T_{Setup}$  – Trata-se do intervalo imediatamente antes da borda onde a entrada não pode variar

$T_{Hold}$  – Trata-se do intervalo imediatamente após a borda onde a entrada não pode variar

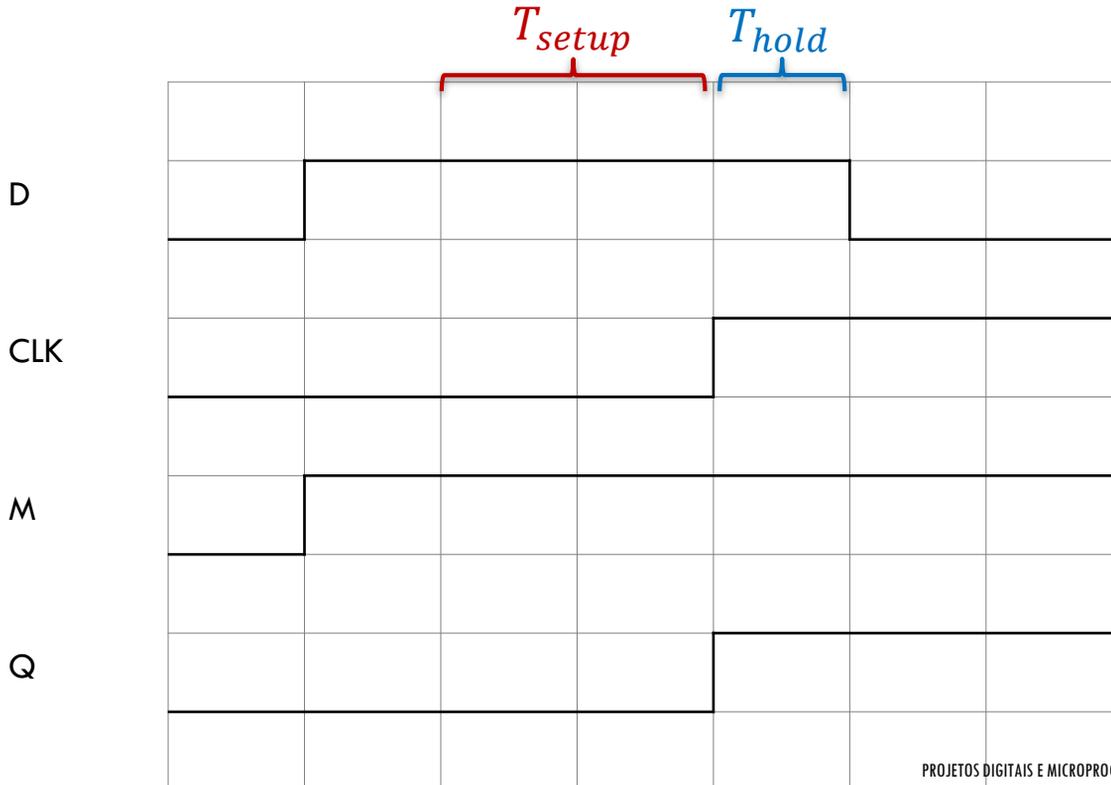
# TEMPO DE SETUP E HOLD

Quanto tempo antes da borda do relógio as entradas devem estar com seus valores prontos?

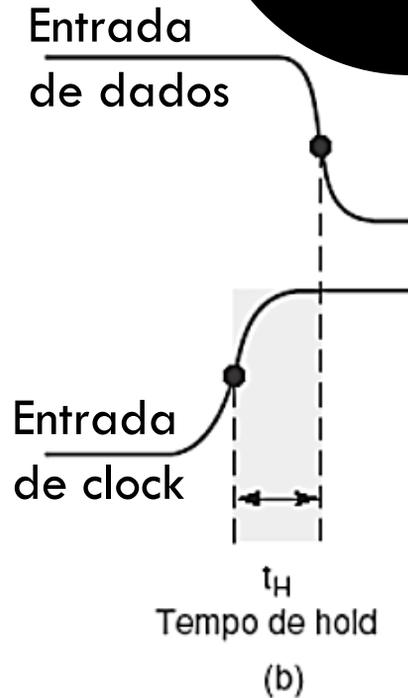
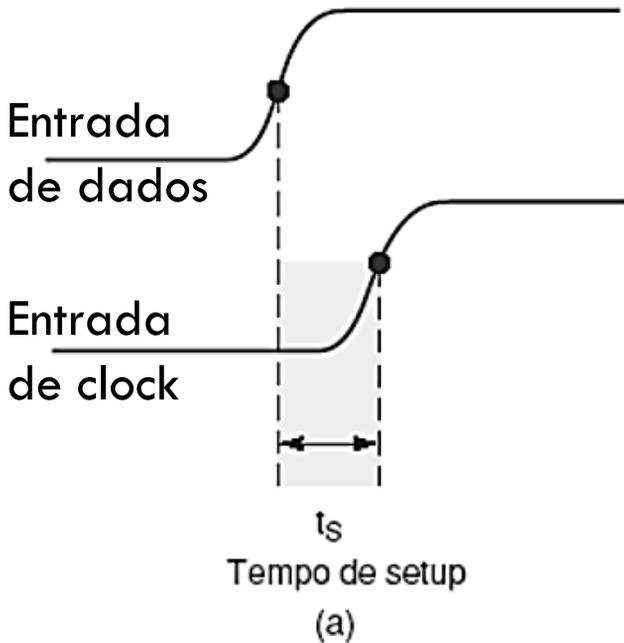


Quanto após a borda do relógio as entradas podem mudar seus valores?

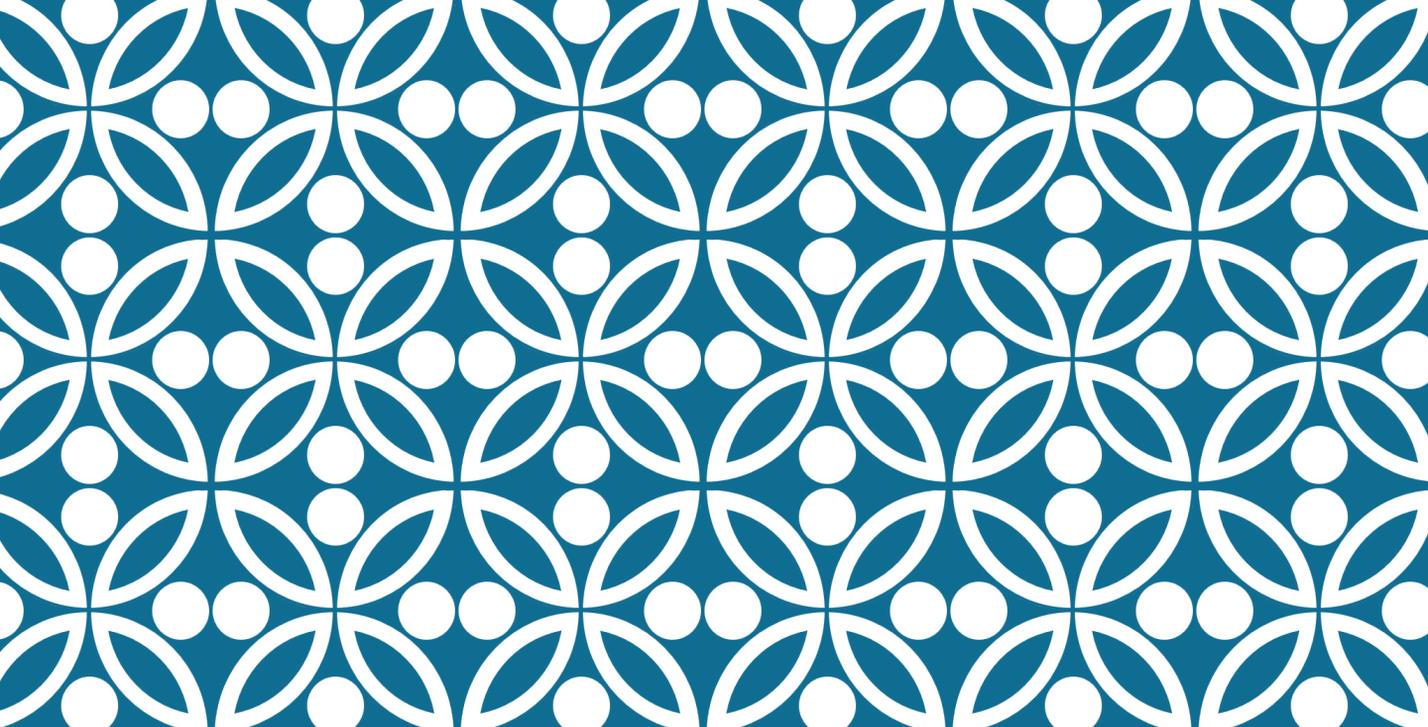
# TEMPO DE SETUP E HOLD



# TEMPO DE SETUP E HOLD



Lembre-se que as transições não acontecem de forma imediata



# OPERAÇÃO CORRETA & APROPRIADA

# OPERAÇÃO CORRETA

Um circuito opera corretamente se seu funcionamento satisfaz à sua especificação

Se uma sequência de valores aceitáveis é apresentada nas suas entradas então o circuito produz uma sequência de valores nas suas saídas que são exatamente aqueles valores determinados pela sua especificação.

# OPERAÇÃO APROPRIADA

Um circuito opera apropriadamente se nenhuma das restrições impostas pela tecnologia de implementação é violada.

Por exemplo:

- A fonte de alimentação mantém um fluxo de corrente estável enquanto opera na sua tensão nominal;
- As restrições de temperatura e umidade são atendidas;
- As **restrições de setup e hold** dos flip-flops são atendidas no projeto do CSS (Circuitos Sequenciais Síncronos).

# OPERAÇÃO APROPRIADA DE UM CSS

Para cada evento de sincronização, todos os flip-flops controlados pelo mesmo sinal de relógio examinam suas entradas e determinam seus próximos estados.

Para tanto, duas condições devem ser satisfeitas:

1) as entradas ficam estáveis e determinadas antes do evento de sincronização;

**A primeira condição** é satisfeita se o tempo de estabilização (setup) dos flip-flops é respeitado.

# OPERAÇÃO APROPRIADA DE UM CSS

Para cada evento de sincronização, todos os flip-flops controlados pelo mesmo sinal de relógio examinam suas entradas e determinam seus próximos estados.

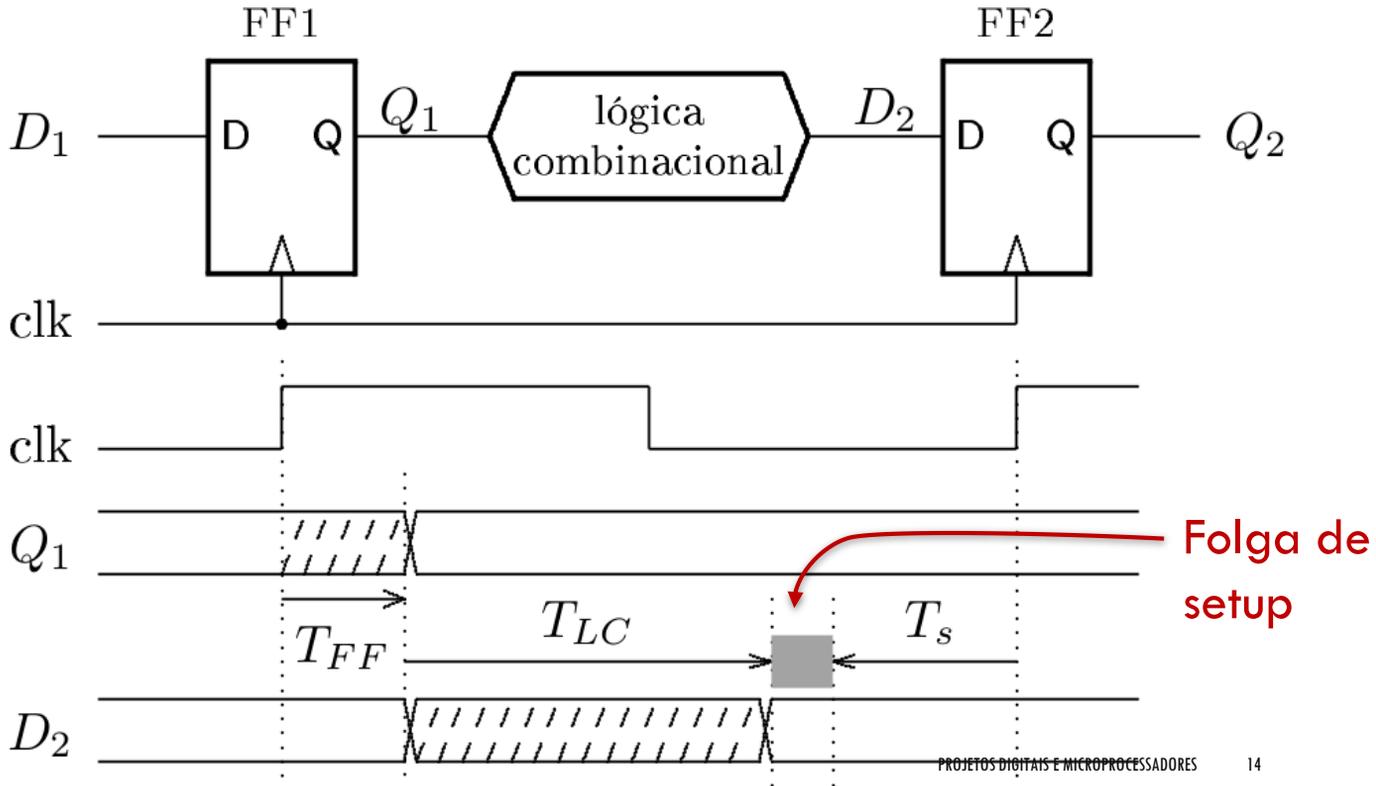
Para tanto, duas condições devem ser satisfeitas:

- 1) as entradas ficam estáveis e determinadas antes do evento de sincronização;
- 2) nenhum flip-flop pode mudar de estado mais do que uma vez em cada evento de sincronização.

**A segunda condição** é satisfeita se o tempo de manutenção (hold) dos flip-flops é respeitado.

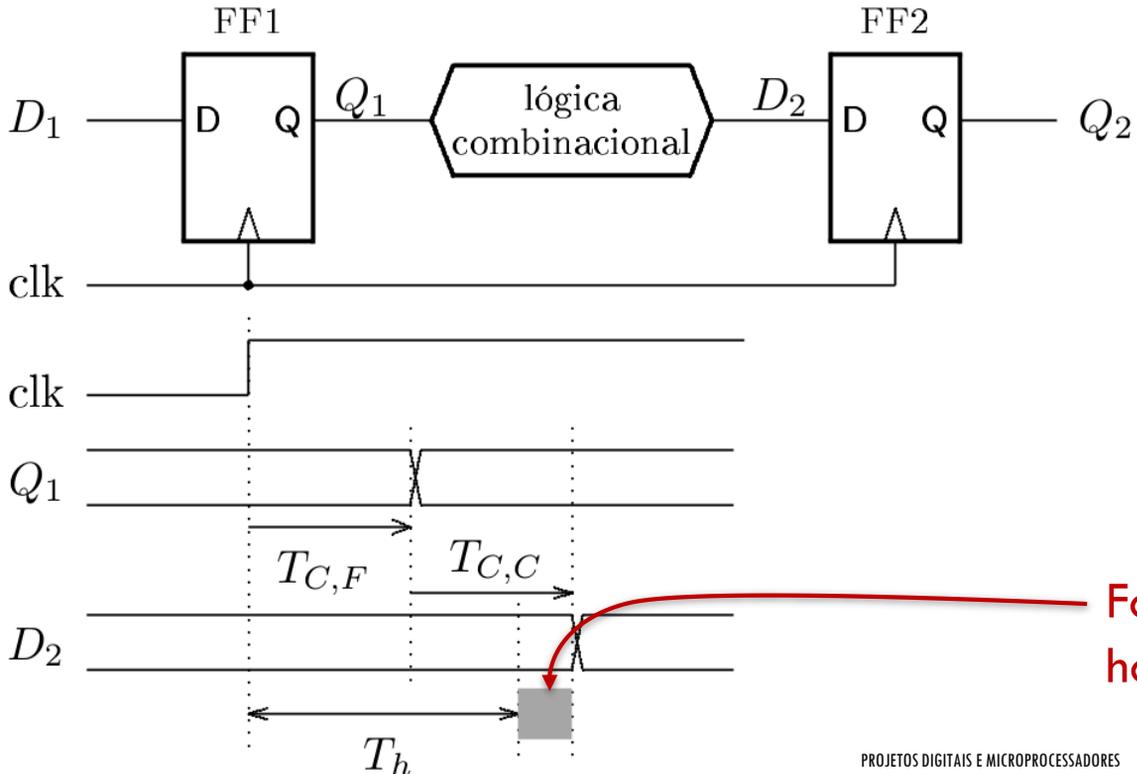
$$T_{PS} + T_{PC} + T_{Setup} \leq T_{clock}$$

# OPERAÇÃO APROPRIADA DE UM CSS



$$T_{CS} + T_{CC} \geq T_{hold}$$

# OPERAÇÃO APROPRIADA DE UM CSS



# OPERAÇÃO APROPRIADA DE UM CSS

Duas condições devem ser satisfeitas:

1) as entradas ficam estáveis e determinadas antes do evento de sincronização;

$$T_{FF} + T_{LC} + T_S \leq T_{clock}$$

2) nenhum flip-flop pode mudar de estado mais do que uma vez em cada evento de sincronização.

$$T_{C,F} + T_{C,C} \geq T_{hold}$$

O cálculo do **período mínimo do relógio** atende à **primeira condição** para a operação apropriada se o intervalo  $T_{setup}$  dos flip-flops é respeitado.

O **tempo de hold** deve ser respeitado para que a **segunda condição** seja atendida.

# OPERAÇÃO APROPRIADA DE UM CSS

Duas condições devem ser satisfeitas:

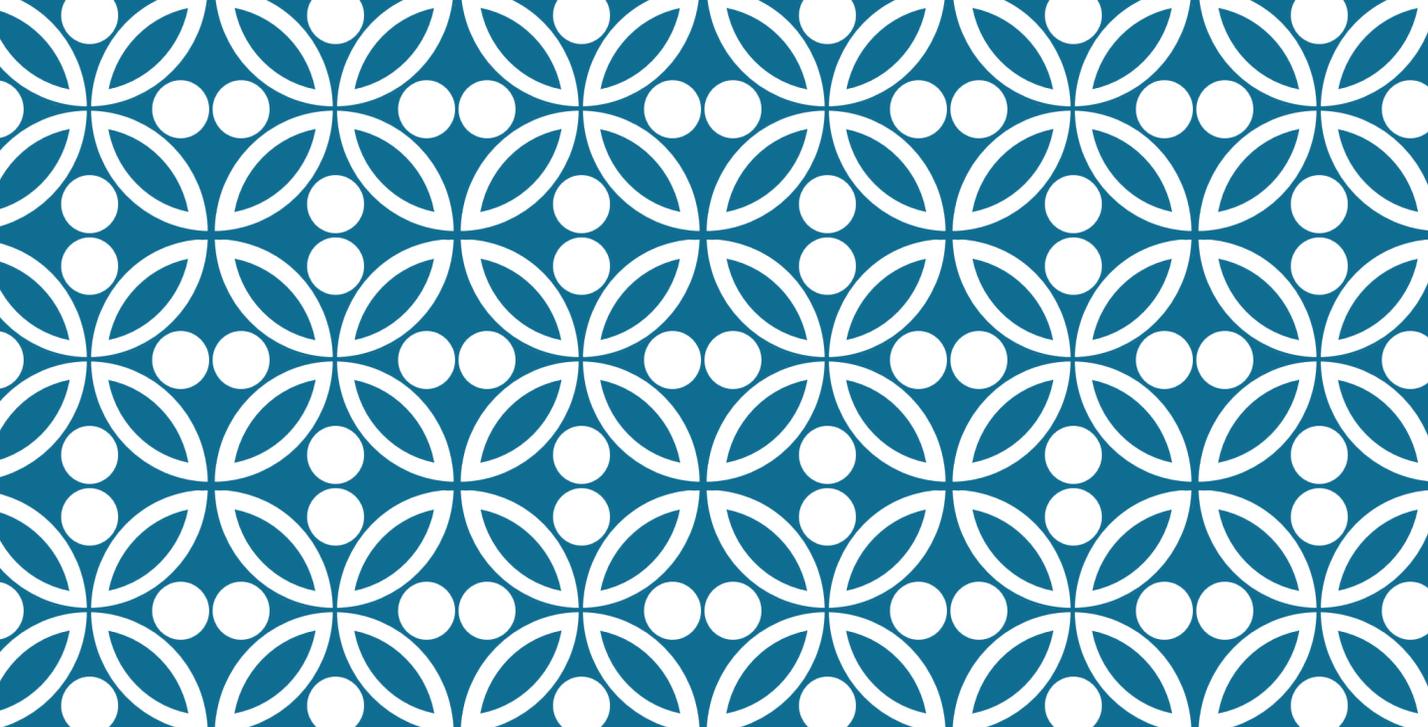
1) as entradas ficam estáveis e determinadas antes do evento de sincronização;

2) nenhum flip-flop pode mudar de estado mais do que uma vez em cada evento de sincronização.

**Mudanças nas entradas** devem se propagar através do circuito combinacional com alguma folga para respeitar o setup dos flip-flops.

$$T_{SE} \geq T_{PC} + T_{Setup}$$

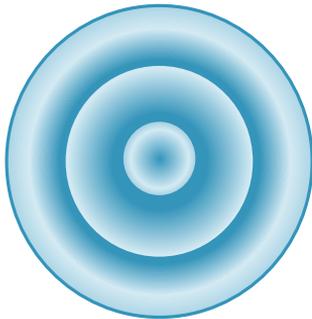
$$T_{HE} \geq T_{hold} - T_{CC}$$



# OPERAÇÃO APROPRIADA: SKEW

# PROPAGAÇÃO DE SINAIS

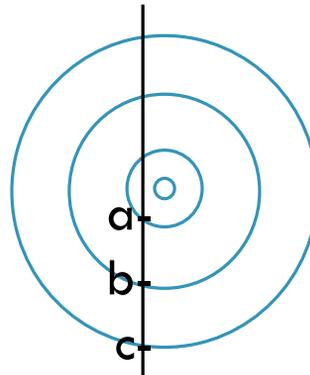
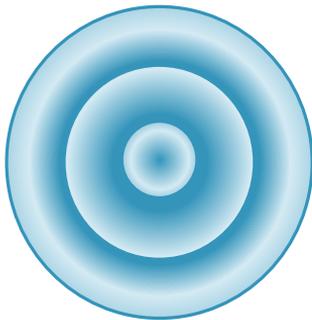
Quando jogamos uma pedra num lago, as frentes de onda se afastam em círculos concêntricos do local onde a pedra afundou.



# PROPAGAÇÃO DE SINAIS

Quando jogamos uma pedra num lago, as frentes de onda se afastam em círculos concêntricos do local onde a pedra afundou.

Da mesma maneira o clock se propaga a uma velocidade de  $0,6 \sim 0,7c$  (velocidade da luz). Aproximadamente um palmo por nanosegundo.



# PROPAGAÇÃO DE SINAIS

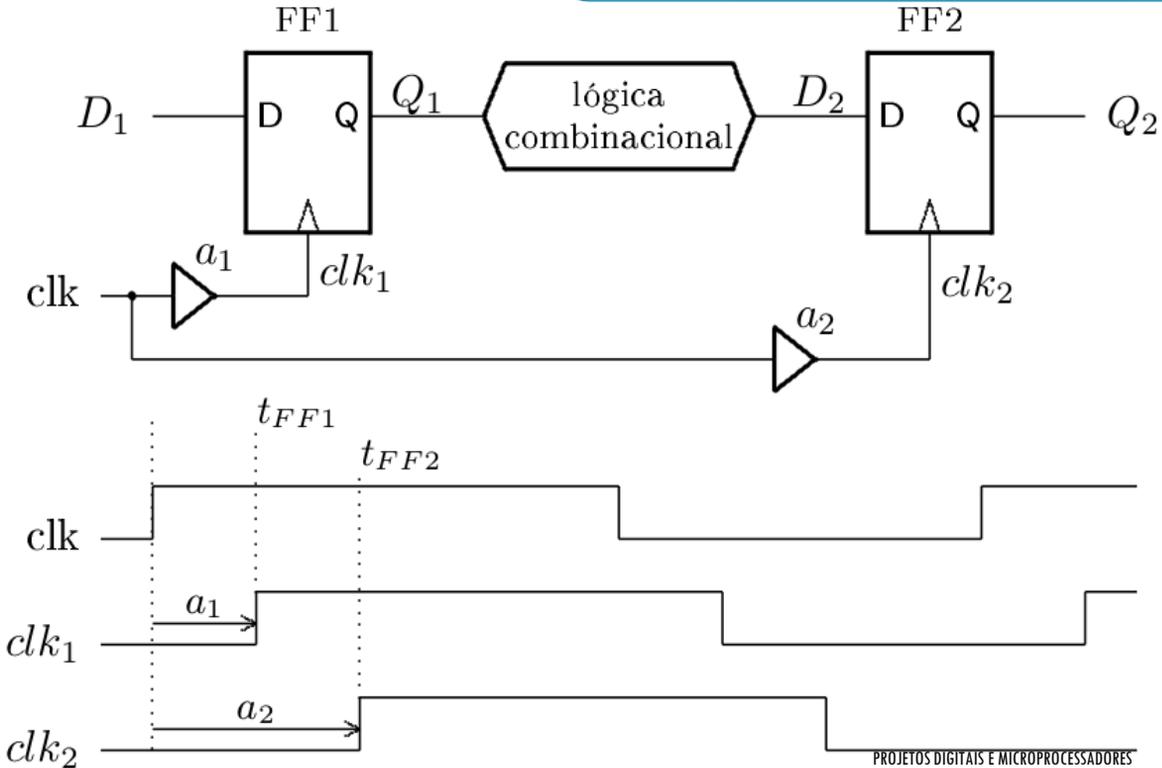
Embora a frente da onda eletromagnética se desloque a  $0,7c$ , a determinação dos níveis lógicos depende da resistência e da capacitância distribuída ao longo do trajeto dos sinais.

Isso significa que uma mesma borda do sinal de relógio chega aos flip-flops em instantes distintos.

Se as ondas forem aproximadas por losangos  $\langle\langle\langle\rangle\rangle\rangle$ , elas avançam de forma enviesada pelo circuito, e este comportamento é batizado de **clock skew**, por causa do viés na propagação do sinal de relógio.

Para cada par de flip-flops adjacentes, nos interessa o atraso relativo entre os dois, e não o atraso com relação ao relógio original.

$$T_{skew\ 1,2} = T_{FF2} - T_{FF1}$$

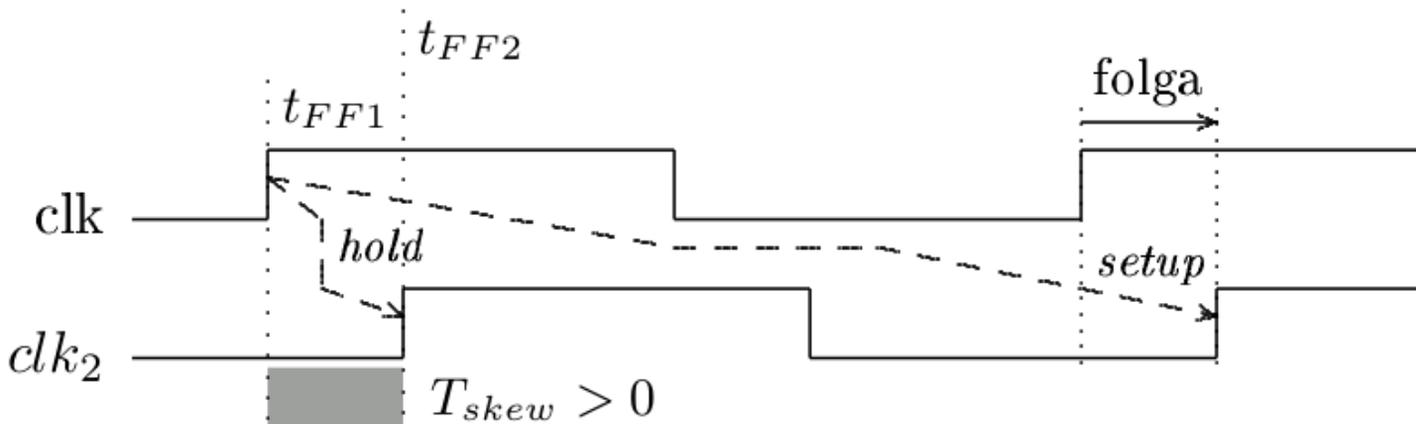


# SKEW POSITIVO

Se a diferença entre os tempos de chegada das bordas de relógio é positiva,  $t_{FF2} - t_{FF1} > 0$ , então o **skew** é **positivo**

→ Neste caso as restrições quanto a **setup**

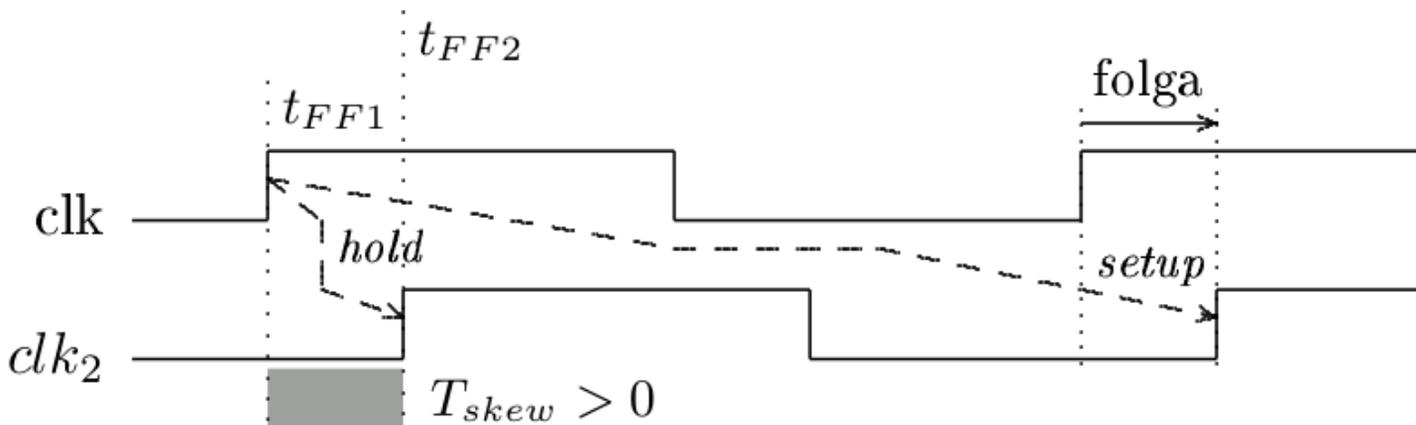
→ Enquanto que as do **hold**



# SKEW POSITIVO

Se a diferença entre os tempos de chegada das bordas de relógio é positiva,  $t_{FF2} - t_{FF1} > 0$ , então o **skew é positivo**

- Neste caso as restrições quanto a **setup melhoram**
- Enquanto que as do **hold pioram**

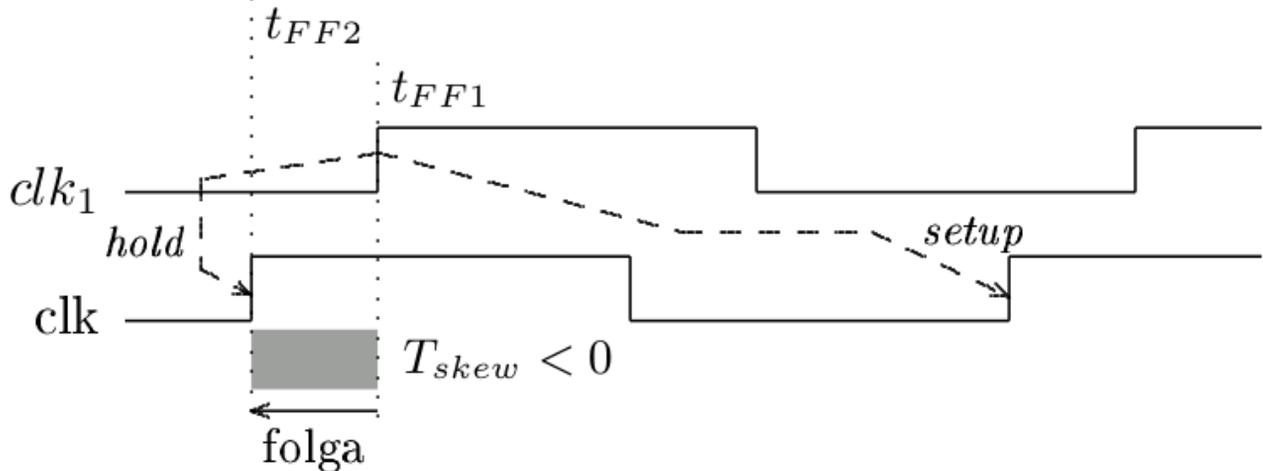


# SKEW NEGATIVO

Se a diferença entre os tempos de chegada das bordas de relógio é negativa,  $t_{FF2} - t_{FF1} < 0$ , então o **skew é negativo**

→ Neste caso as restrições quanto a **setup**

→ Enquanto que as do **hold**

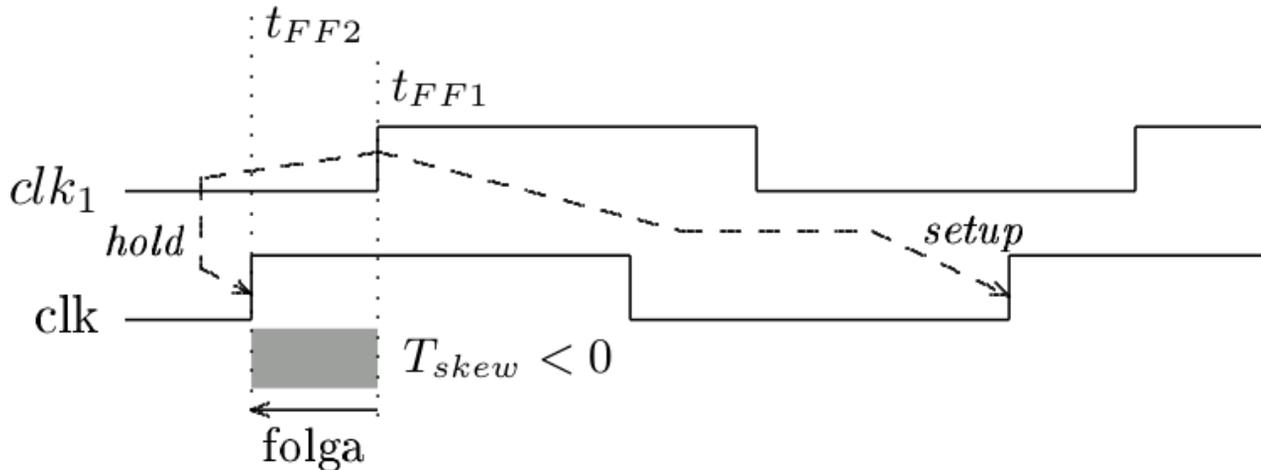


# SKEW NEGATIVO

Se a diferença entre os tempos de chegada das bordas de relógio é negativa,  $t_{FF2} - t_{FF1} < 0$ , então o **skew é negativo**

→ Neste caso as restrições quanto a **setup pioram**

→ Enquanto que as do **hold melhoram**



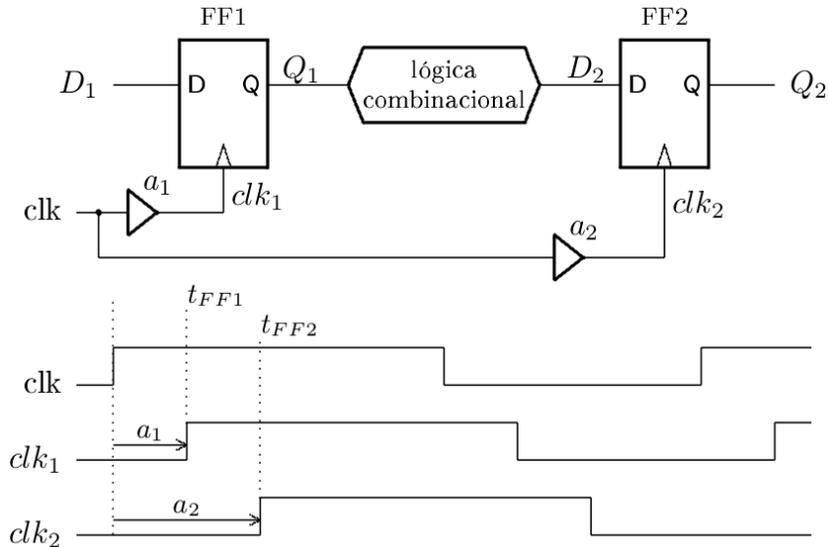
# CLOCK SKEW

## Folga de Setup

- Skew positivo, aumenta a folga
- Skew negativo, reduz a folga

## Folga de Hold

- Skew positivo, reduz a folga
- Skew negativo, aumenta a folga



# TEMPO DE CLOCK COM SKEW

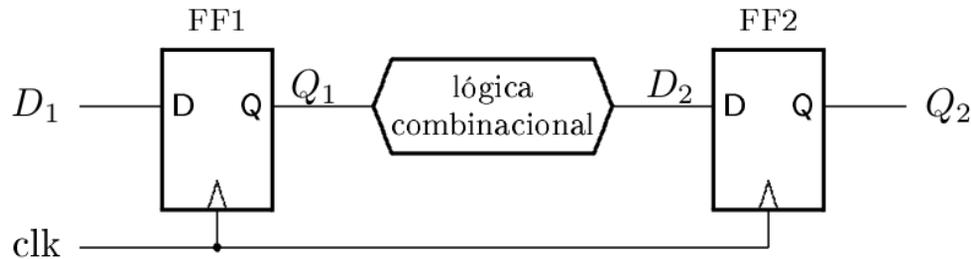
Quando há skew de clock, o período de relógio deve ser adaptado para acomodar as diferenças entre as bordas dos sinais de relógio.

Dado o skew de clocks:  $t_{skew} = t_{FF2} - t_{FF1}$

$$T_{min} \geq T_{PS} + T_{PC} + T_{Setup} - T_{skew}$$

$$T_{CS} + T_{CC} \geq T_{hold} + T_{skew}$$

# EXERCÍCIO



Considere as especificações do circuito sequencial:

$$T_{PS} = 10ns$$

$$T_{CS} = 5ns$$

$$T_{setup} = 4ns$$

$$T_{hold} = 2ns.$$

Especificação do circuito combinacional:

$$T_{PC} = 6ns$$

$$T_{CC} = 2ns.$$

O skew é  $T_{skew} = -5ns.$

Qual é o período mínimo do relógio?

Há folga no tempo de manutenção (hold) do registrador?

Qual deve ser o setup mínimo nas entradas?

Qual deve ser o hold mínimo nas entradas?