

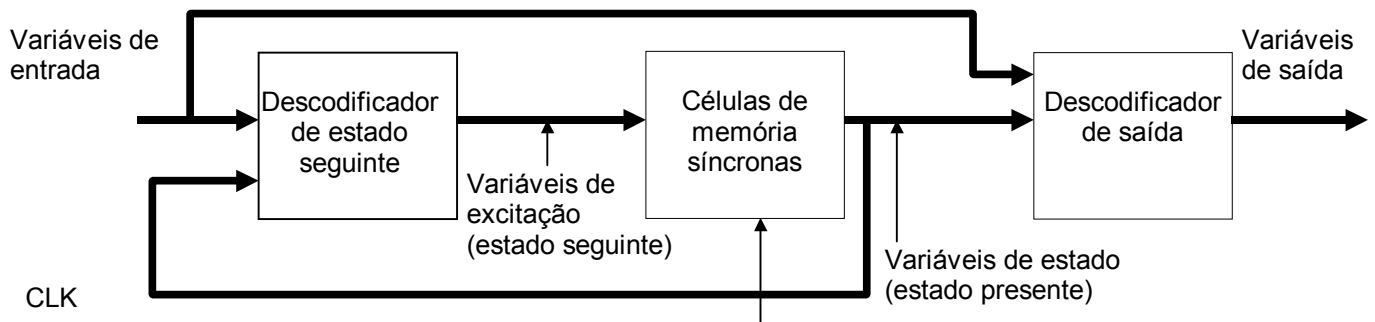
Circuitos sequenciais síncronos

Os circuitos sequenciais síncronos, também designados por máquinas sequenciais síncronas ou máquinas de estados, utilizam células de memória síncronas que definem, em qualquer instante, o estado do sistema.

Modelo geral

Em qualquer circuito sequencial síncrono, é identificável:

- uma unidade de memória, constituída por um número finito de células de memória que implementam a função de memória do sistema;
- um decodificador de saída, constituído por um circuito combinacional responsável pela implementação das saídas do sistema;
- um decodificador de estado seguinte, também designado por decodificador de entrada, constituído por um circuito combinacional que gera as entradas da unidade de memória.



Variáveis do modelo geral

Variáveis de entrada

Variáveis de excitação = saídas do decodificador de estado seguinte = entradas das células de memória síncronas (estado seguinte) = $f(\text{Variáveis de entrada}, \text{Variáveis de estado})$

Variáveis de estado = saídas das células de memória síncronas (estado presente)

Variáveis de saída = saídas do decodificador de saída

Máquina de estados finitos

Circuito sequencial síncrono, constituído por um número finito de células de memória que reagem à mesma vertente do sinal de relógio (CLK) comum a todas as células.

Máquina de Mealy

Variáveis de saída = saídas do decodificador de saída = $f(\text{Variáveis de entrada}, \text{Variáveis de estado})$.

O facto de existirem entradas que alimentam directamente o decodificador de saída introduz um comportamento assíncrono nas saídas.

Máquina de Moore

Variáveis de saída = saídas do decodificador de saída = $f(\text{Variáveis de estado})$.

As variáveis de saída dependem apenas das variáveis de estado, pelo que a alteração de estado nas saídas encontra-se sincronizada com o sinal de relógio.

Entradas adicionais assíncronas

Alguns circuitos têm uma ou mais entradas assíncronas que, normalmente, efectuem a inicialização ou colocam o sistema num estado desejado.

Análise de circuitos sequenciais síncronos(Máquinas de estados finitos)

A partir do diagrama lógico, pretende-se obter uma descrição funcional do circuito, traduzida num diagrama de estados e, quando possível, numa descrição verbal.

Método sistematizado de análise

- 1- Considerar as entradas assíncronas de forma independente do restante diagrama lógico.
- 2- Identificar os elementos do circuito de acordo com o modelo geral: decodificador de estado seguinte, unidade de memória, decodificador de saída, variáveis de entrada, variáveis de excitação, variáveis de estado e variáveis de saída.
- 3- Determinar: as expressões das funções lógicas das variáveis de excitação que dependem das variáveis de entrada e das variáveis de estado (funções de excitação); as expressões das funções lógicas das variáveis de saída que dependem das variáveis de estado e das variáveis de entrada(funções de saída).
- 4- Construir a tabela de estados, também designada por tabela de transição de estados.
- 5- Construir, a partir da tabela de estados, o diagrama de estados.
- 6- Determinar, quando possível, uma descrição verbal para o comportamento funcional do circuito.

Tabela de estados (tabela de transição de estados)

Variáveis de estado (Estado presente)	Variáveis de entrada	Variáveis de excitação (funções de excitação)	Variáveis de estado (Estado seguinte)	Variáveis de saída (funções de saída)

Como preencher a tabela de estados?

1. Considerar todas as combinações possíveis dos valores binários para as variáveis de estado e variáveis de entrada (coluna 1 e 2 da tabela). Sendo N o número de variáveis de estado e de entrada, obtém-se 2^N combinações distintas destas variáveis.
2. Com base nas funções lógicas (funções de excitação) das variáveis de excitação, preencher a coluna 3 da tabela de estados.
3. Com base nos valores das variáveis de excitação (coluna 3 = entradas dos flip-flops) e as tabelas funcionais ou as equações características dos flip-flops, determinar o estado seguinte (coluna 4).
4. Com base nas funções lógicas (funções de saída) das variáveis de saída, preencher a coluna 5 da tabela de estados. Note-se que o preenchimento é o resultado da avaliação das funções para as combinações de valores definidos na coluna 1(estado presente) e 2(variáveis de entrada).

Diagrama de estados

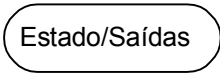
O diagrama de estados é um grafo orientado, constituído por nós, representativos dos estados, e por arcos orientados, representativos das transições entre estados. Constitui uma representação gráfica dos estados e transições entre estados de um circuito sequencial síncrono. Permite uma melhor leitura/interpretação do comportamento funcional deste tipo de circuitos. A informação contida no diagrama de estados é acompanhada de uma legenda, de modo a associar os elementos gráficos com as variáveis do circuito sequencial síncrono.

Representação gráfica dos estados

Cada estado é representado por um nó (círculo), com a informação que lhe está associada. Num circuito sequencial síncrono com N variáveis de estado, o diagrama de estados é constituído por 2^N estados distintos (2^N Nós).

Máquina de Moore

Neste tipo de máquina, as variáveis de saída encontram-se associadas ao próprio estado, dado serem função apenas das variáveis de estado.

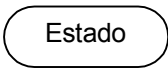


Estado/Saídas

Estado = Designação ou código de estado (valores lógicos das variáveis de estado)
Saídas = Valores das saídas

Máquina de Mealy

Neste tipo de máquina, as variáveis de saída encontram-se associadas às transições entre estados, dado serem função das variáveis de estado e das variáveis de entrada.



Estado

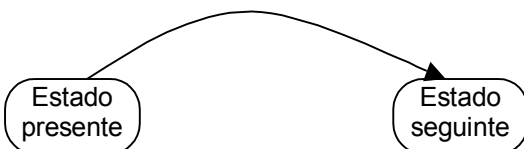
Estado = Designação ou código de estado (valores lógicos das variáveis de estado)

Representação gráfica das transições entre estados

As transições entre estados são representadas por um arco orientado entre o estado presente e o estado seguinte. De cada estado partem 2^P arcos orientados, representativos das transições possíveis para P variáveis de entrada.

Máquina de Mealy

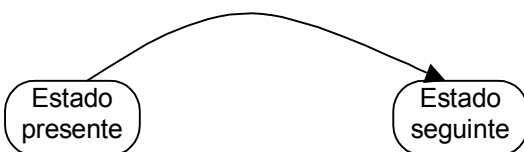
Entradas/Saídas



Neste tipo de máquina, as variáveis de entrada e de saída estão associadas às transições entre estados.

Máquina de Moore

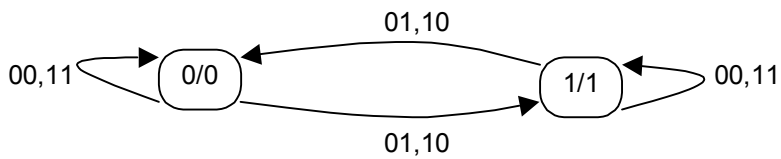
Entradas



Neste tipo de máquina, apenas as variáveis de entrada estão associadas às transições entre estados.

Exemplos de diagramas de estados

Máquina de Moore



Legenda

Estado/Saída: A/Z

(A=var. de estado; Z=var. de saída)

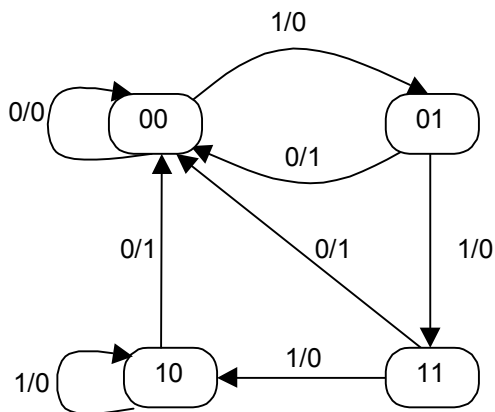
Transição de estado: Entradas = W Y
(W, Y = var. de entrada)

Tabela de estados

Estado	Entradas		Estado seguinte	Saída
	A	B		
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

Descrição funcional: Verifica-se a transição entre estados quando $W \neq Y$ ($W=0$ e $Y=1$) ou ($W=1$ e $Y=0$). O estado do sistema mantém-se quando $W=Y$ ($W=Y=0$ ou $W=Y=1$). A saída Z é igual à variável de estado A.

Máquina de Mealy



Legenda

Estado: A B

(A, B= var. de estado)

Transição de estado: Entradas/Saídas = X/Y
(X = var. de entrada ; Y = var. de saída)

Tabela de estados

Estado presente		Entrada	Estado seguinte		Saída
A	B		A	B	
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	0	1
1	1	1	1	0	0

Descrição funcional: A partir do estado 00, o sistema activa a saída Y sempre que, em duas vertentes consecutivas do sinal de relógio, é detectada a sequência 10 na entrada X.

Exemplo:

Var. entrada X: 00100110001110000111110

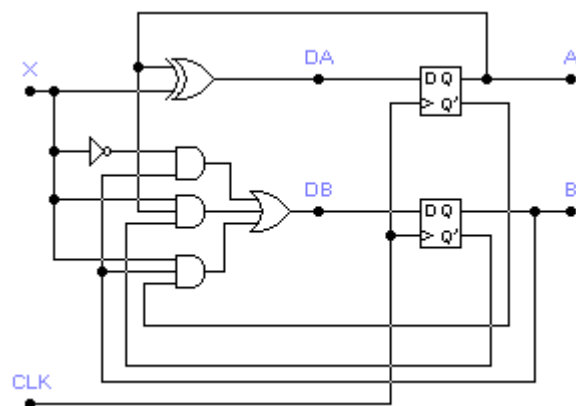
Var. saída Y: 00010001000001000000001

Exemplos de análise de circuitos sequenciais síncronos

Dado o diagrama lógico, determinar a tabela de estados, o diagrama de estados e uma possível descrição verbal do funcionamento do circuito.

Exemplo 1:

Diagrama lógico



Var. entrada: X

Var. saída = Var. estado (saídas dos flip-flops): B, A

Var. excitação (entradas dos flip-flops): DB, DA

É uma máquina de Moore dado que as saídas (B,A) são coincidentes com as variáveis de estado.

Funções de excitação

$$DB = B X' + B' A X + B A' X$$

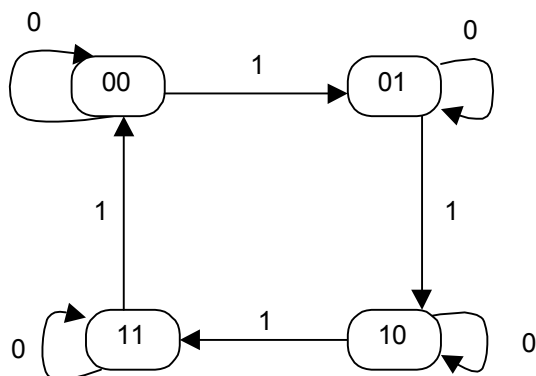
$$DA = A \oplus X$$

Tabela de estados

Estado presente		Var. entrada	Var. excitação		Estado seguinte	
B	A	X	$DB = B X' + B' A X + B A' X$	$DA = A \oplus X$	B	A
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1
0	1	0	0	1	0	1
0	1	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	1	0
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	0	0	0	0

Nota: A coluna correspondente ao estado seguinte pode ser eliminada já que, tratando-se de flip-flops do tipo D, o estado seguinte corresponde aos valores das variáveis de excitação.

Diagrama de estados



Legenda:

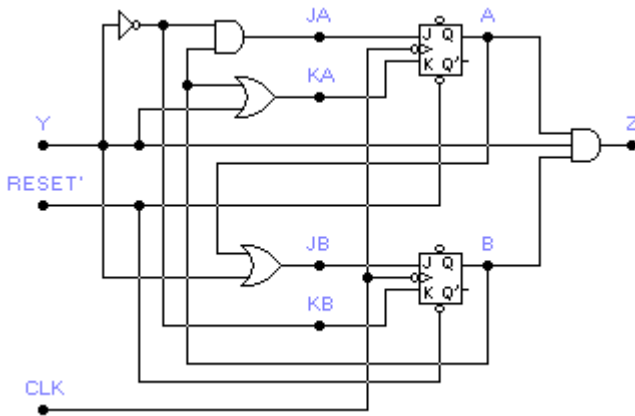
Estado: B A

Transição entre estados : X

Descrição funcional: Quando $X = 1$ o sistema segue a sequência de estados 00, 01, 10, 11. Quando $X=0$ o sistema mantém-se no mesmo estado. Ao considerar as saídas BA como um número binário de dois bits, está-se perante um contador binário, crescente, de dois bits, com a entrada X para desinibir/inibir a contagem.

Exemplo 2:

Diagrama lógico



Entrada assíncrona: RESET'

Var. entrada: Y

Var. saída: Z

Var. estado (saídas dos flip-flops): A,B

Var. excitação (entradas dos flip-flops): JA,KA,JB,KB

É uma máquina de Mealy dado que a saída (Z) depende das variáveis de estado (A,B) e da variável de entrada (Y).

Funções de excitação

$$JA = B Y'$$

$$KA = B + Y$$

$$JB = A + Y$$

$$KB = Y'$$

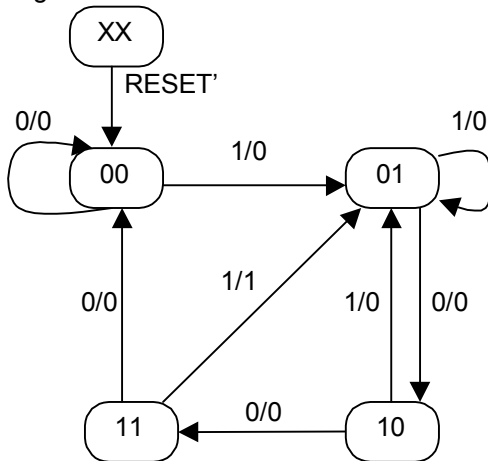
Função de saída

$$Z = A B Y$$

Tabela de estados

Estado presente		Var. entrada Y	Var. excitação				Estado seguinte		Saída Z=A B Y
A	B		JA=B Y'	KA=B+Y	JB=A+Y	KB=Y'	A	B	
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	1	0	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	1	1	0	0	1	0
1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
1	0	1	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	1	1	0	0	1	1

Diagrama de estados



Legenda:

Estado: A B

Transição entre estados : Y / Z

Descrição funcional: A saída Z é colocada a 1 sempre que, em quatro vertentes consecutivas do sinal de relógio, é detectada a sequência 1001 na entrada Y. A entrada RESET', quando activa, coloca o sistema no estado 00.

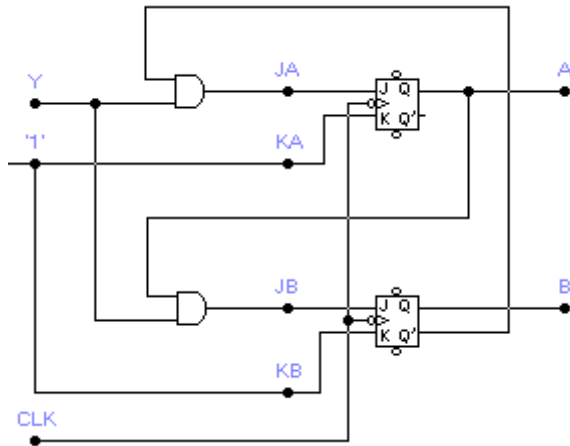
Exemplo:

Var. entrada Y: 0001010010000101001001

Var. saída Z: 0000000010000000001001

Exemplo 3:

Diagrama lógico



Var. entrada: Y

Var. saída = Var. estado (saídas dos flip-flops): B,A

Var. excitação (entradas dos flip-flops): JB, KB, JA, KA

É uma máquina de Moore dado que as saídas (B,A) são coincidentes com as variáveis de estado.

Funções de excitação

$$JB = AY$$

$$KB = 1$$

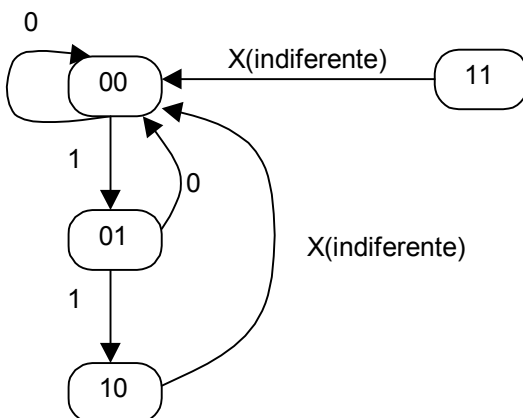
$$JA = B'Y$$

$$KA = 1$$

Tabela de estados

Estado presente		Var. entrada Y	Var. excitação				Estado seguinte	
B	A		$JB = AY$	$KB = 1$	$JA = B'Y$	$KA = 1$	B	A
0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	1	1	1	0	1
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0
1	1	0	0	1	0	1	0	0
1	1	1	1	1	0	1	0	0

Diagrama de estados



Legenda:

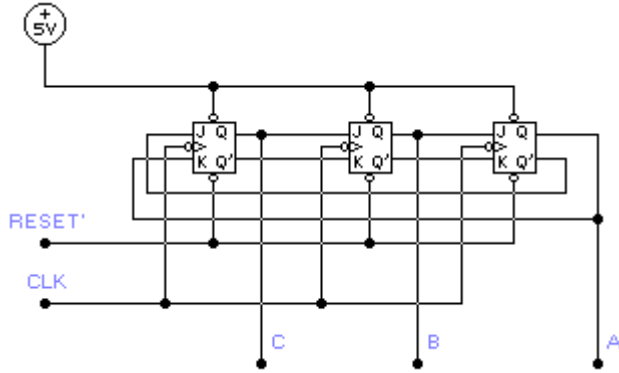
Estado: B A

Transição entre estados : Y

Descrição funcional: O sistema segue a sequência principal de estados 00, 01, 10, enquanto a entrada Y estiver a 1. Sempre que a entrada Y é colocada a 0, qualquer que seja o estado presente, o sistema muda para o estado 00. O estado 11 não faz parte da sequência principal.

Exemplo 4:

Diagrama lógico



Funções de excitação

$JC=A'$
 $KC=A$
 $JB=C$
 $KB=C'$
 $JA=B$
 $KA=B'$

Entrada assíncrona: $RESET'$

Var. saída = Var. estado (saídas dos flip-flops):
C, B, A

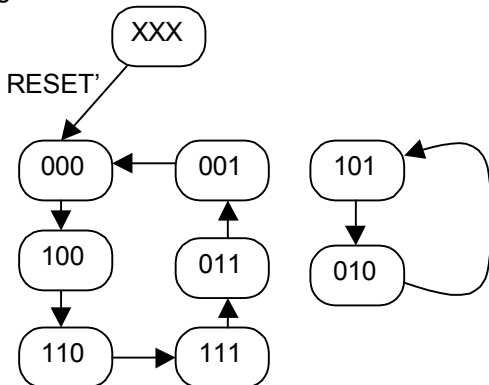
Var. excitação (entradas dos flip-flops): JC, KC,
JB, KB, JA, KA

É uma máquina de Moore dado que as saídas (C, B, A) são coincidentes com as variáveis de estado.

Tabela de estados

Estado presente			Var. excitação						Estado seguinte		
C	B	A	JC=A'	KC=A	JB=C	KB=C'	JA=B	KA=B'	C	B	A
0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1
0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1
1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1
1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1

Diagrama de estados

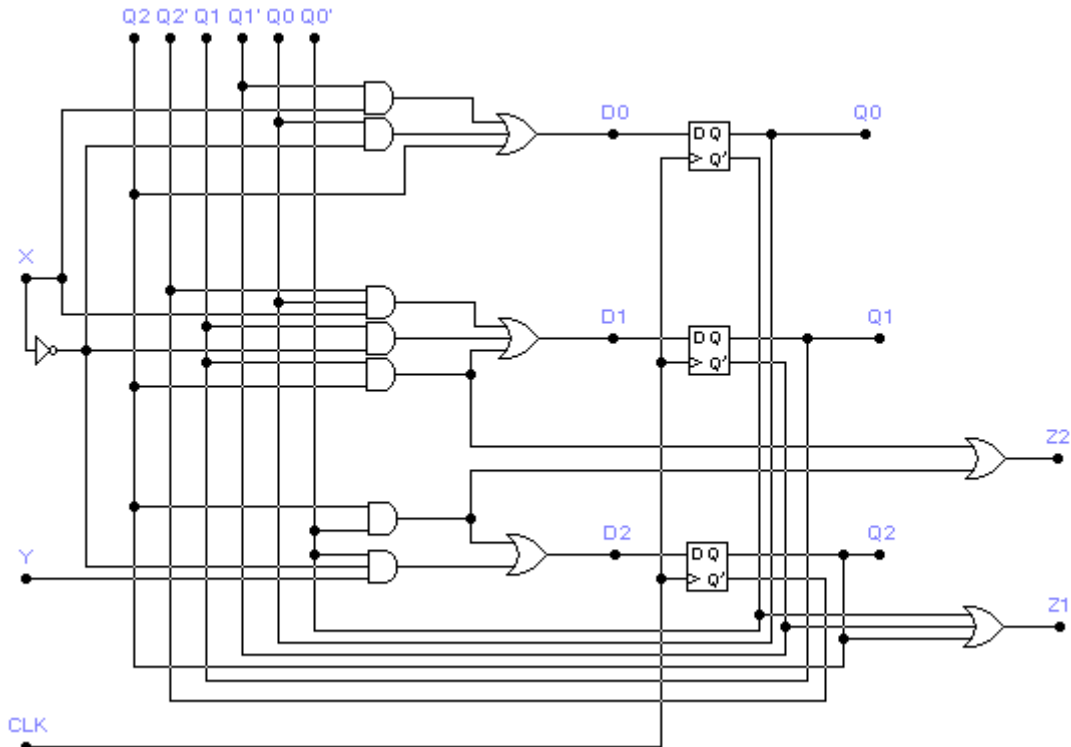


Legenda:

Estado: C B A

Descrição funcional: O sistema segue a sequência principal de estados 000, 100, 110, 111, 011, 001. O sistema tem uma sequência secundária constituída pelos estados 101 e 010. A entrada assíncrona $RESET'$ permite a inicialização do sistema no estado 000.

Exemplo 5:
Diagrama lógico



Var. entrada = X, Y

Var. saída = Z1, Z2

Var. estado = Q2, Q1, Q0

Var. excitação = D2, D1, D0

Funções de excitação:

$$D2 = Q2 Q0' + Q0' X' Y$$

$$D1 = Q2' Q0 X + Q1 X' + Q2 Q1$$

$$D0 = Q1' X + Q0 X' + Q2$$

Funções de saída:

$$Z2 = Q2 Q1 + Q2 Q0'$$

$$Z1 = Q2 + Q1' + Q0'$$

Trata-se de uma máquina de Moore dado que as saídas dependem apenas das variáveis de estado.

Tabela de estados

Por forma a reduzir a dimensão da tabela e tratando-se de flip-flops do tipo D (Var. excitação = estado seguinte), a tabela de estados é reorganizada conforme se exemplifica.

Estado presente	Entradas (X Y)				Saídas
Q2 Q1 Q0	00	01	10	11	Z2 Z1
000	000	100	001	001	01
001	001	001	011	011	01
010	010	110	000	000	01
011	011	011	010	010	00
100	101	101	101	101	11
101	001	001	001	001	01
110	111	111	111	111	11
111	011	011	011	011	11
Estado seguinte (Q2 Q1 Q0)					

Exemplificação da leitura desta tabela de estados:

Do estado 000, o sistema mantém-se no mesmo estado se X=0 e Y=0, o sistema transita para o estado 100 se X=0 e Y=1, o sistema transita para o estado 001 se X=1 e Y=0 ou X=1 e Y=1. Do estado 001, o sistema mantém-se no mesmo estado se X=0 e Y=0 ou X=0 e Y=1, etc..

Tabela de estados
Identificando os estados através das letras de A a H, obtém-se a nova tabela de estados:

Estado presente Q2 Q1 Q0	Entradas (X Y)				Saídas Z2 Z1
	00	01	10	11	
A	A	E	B	B	01
B	B	B	D	D	01
C	C	G	A	A	01
D	D	D	C	C	00
E	F	F	F	F	11
F	B	B	B	B	01
G	H	H	H	H	11
H	D	D	D	D	11
Estado seguinte (Q2 Q1 Q0)					

Diagrama de estados
Neste diagrama de estados optou-se por associar aos arcos orientados a expressão lógica (expressão de transição), dependente das variáveis de entrada, que provoca a transição entre estados.

