

PCS 3225
Sistemas Digitais II

Módulo 5 – Síntese de Circuitos
Sequenciais

Andrade, Marco Túlio Carvalho de
Professor Responsável

versão: 1.0 (agosto de 2.017)

Conteúdo

- **Síntese de Circuitos Sequenciais**
 - 1. Metodologia de Síntese
 - 2. Modelo de Mealy/Moore
 - 3. Etapas da Metodologia de Síntese
 - 4. Exemplo de Síntese: Mealy
 - 5. Exemplo de Síntese: Moore
 - 6. Simplificação da Tabela de Estados
 - 6.1. Simplificação por Observação Direta
 - 6.2. Simplificação por Tabelas de Implicação
 - Bibliografia

1. Metodologia de Síntese

- A metodologia de síntese aqui adotada segue praticamente os mesmos passos da metodologia de análise, com os passos sendo adotados em ordem inversa.
- Para o projeto de circuitos mais complexos, como UCP's de computadores, existem métodos mais eficientes.
- Pode-se escolher entre o modelo de Mealy e o modelo de Moore.

2. Modelo de Mealy/Moore

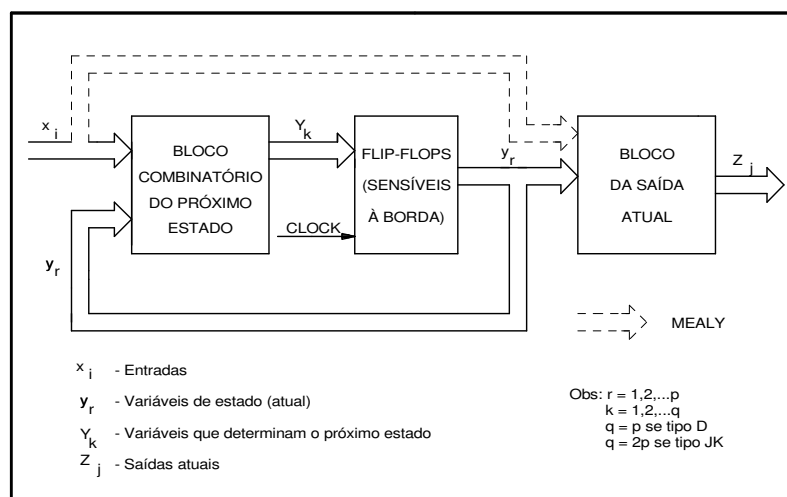
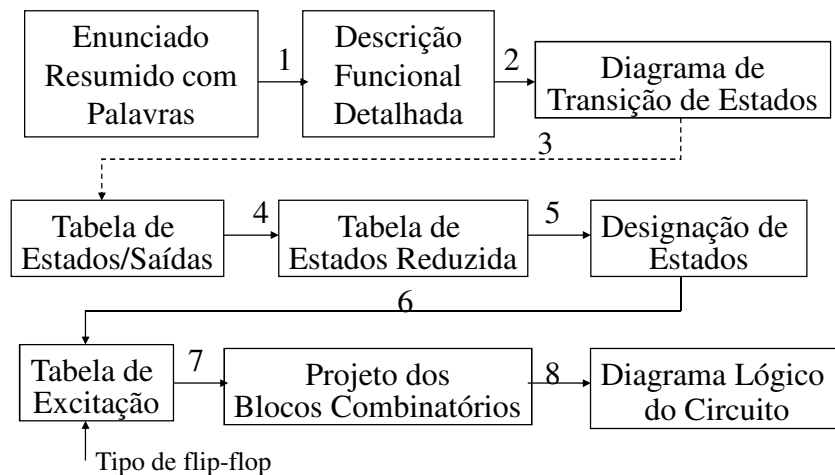


FIGURA 9.1 - MODELO GERAL DE CIRCUITO SÍNCRONO

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplício e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

5

3. Etapas da Metodologia de Síntese

■ Etapa 1: Detalhamento da Descrição Funcional

O comportamento do circuito deve ser expresso de forma sintética, relacionando o número de entradas e saídas e indicando como as entradas atuam sobre as saídas, do ponto de vista dinâmico.

Às vezes, é preciso agregar exemplos, diagramas de blocos simplificados ou até uma carta de tempos.

Deve ficar claro **quando e em que condições as saídas ocorrem.**

Deve-se escolher entre os modelos de Mealy e Moore.

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplício e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

6

3. Etapas da Metodologia de Síntese

■ Etapa 2: Obtenção do Diagrama de Estados

A partir da descrição funcional, deve-se identificar o número de estados necessários, suas saídas e suas transições, em função das entradas.

■ Etapa 3: Obtenção da Tabela de Estados/Saídas

As informações obtidas no passo anterior são organizadas na forma de uma tabela.

3. Etapas da Metodologia de Síntese

■ Etapa 4: Obtenção da Tabela de Estados Reduzida

Eliminam-se os estados redundantes, gerando uma tabela reduzida.

A redundância entre estados será definida através de uma relação de equivalência.

3. Etapas da Metodologia de Síntese

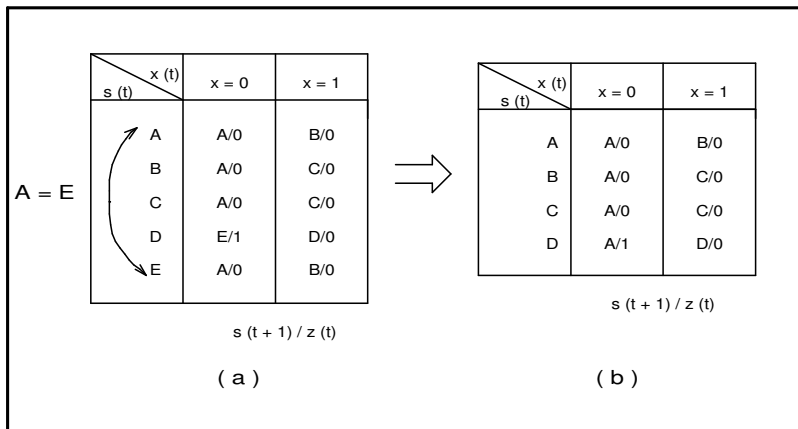


FIGURA 9.2 - EQUIVALÊNCIA DE ESTADOS

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

9

3. Etapas da Metodologia de Síntese

■ Etapa 5: Designação dos Estados

De posse da tabela de estados reduzida, pode-se identificar quantas são as variáveis de estado e, portanto, quantos flip-flops serão necessários.

Podem ocorrer duas situações:

- número de estados = 2^n
- número de estados < 2^n

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

10

3. Etapas da Metodologia de Síntese

No primeiro caso, são necessários n flip-flops e a designação dos y_i pode ser feita de qualquer modo.

Ex:

s	y1	y2
A	0	0
B	0	1
C	1	1
D	1	0

No segundo caso, também são necessários n flip-flops, mas haverá estados cujo comportamento não está definido pela tabela de estados

3. Etapas da Metodologia de Síntese

■ Etapa 6: Obtenção da Tabela de Excitação

Define-se qual o tipo de flip-flop a ser utilizado e obtém-se a tabela de excitação. Como resultado, têm-se as equações de excitação.

■ Etapa 7: Projeto dos Blocos Combinatórios

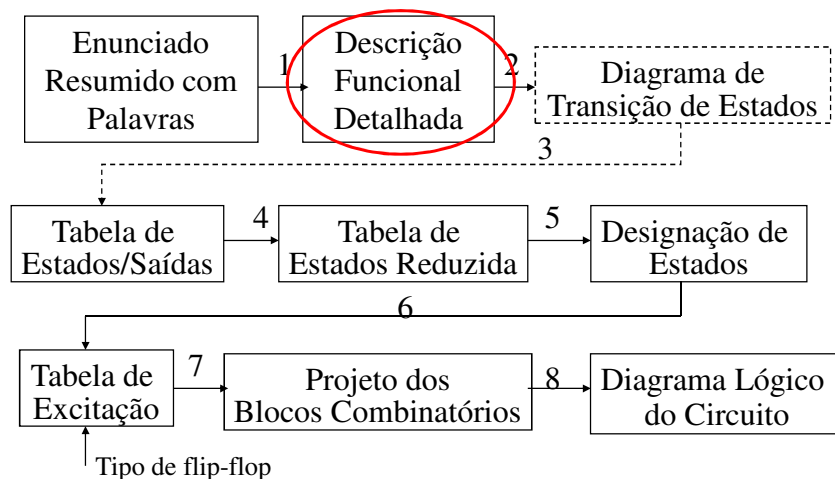
Projeta-se os circuitos combinatórios, minimizando as funções de chaveamento. Como resultado, obtém-se as equações de estado e de saída.

■ Etapa 8: Diagrama Lógico do Circuito

4. Exemplo de Síntese - Mealy

Enunciado: Projetar um circuito sequencial síncrono que reconhece o primeiro ZERO após a ocorrência de três ou mais UNS consecutivos.

3. Etapas da Metodologia de Síntese



4. Exemplo de Síntese - Mealy

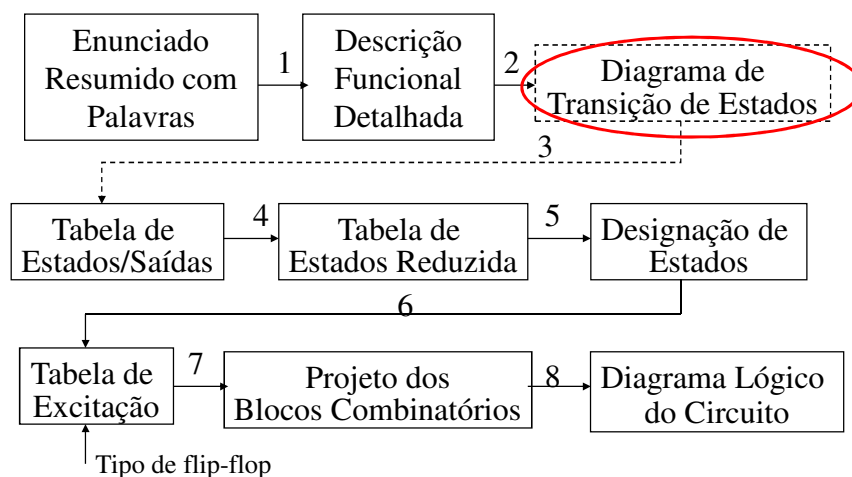
Etapa 1: Descrição Funcional

- circuito tipo Mealy
- o comportamento entrada/saída na borda de atuação de clock será:

x: 0 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 0 1

y: 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0

3. Etapas da Metodologia de Síntese



4. Exemplo de Síntese - Mealy

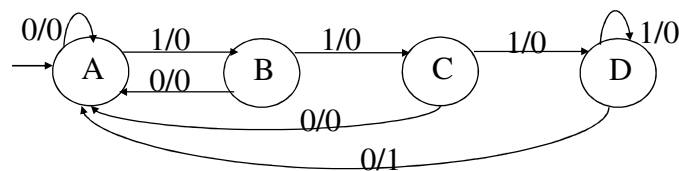
Etapa 2: Diagrama de Transição de Estados

pela descrição funcional e enunciado, pode-se ver que serão necessários pelo menos 4 estados:

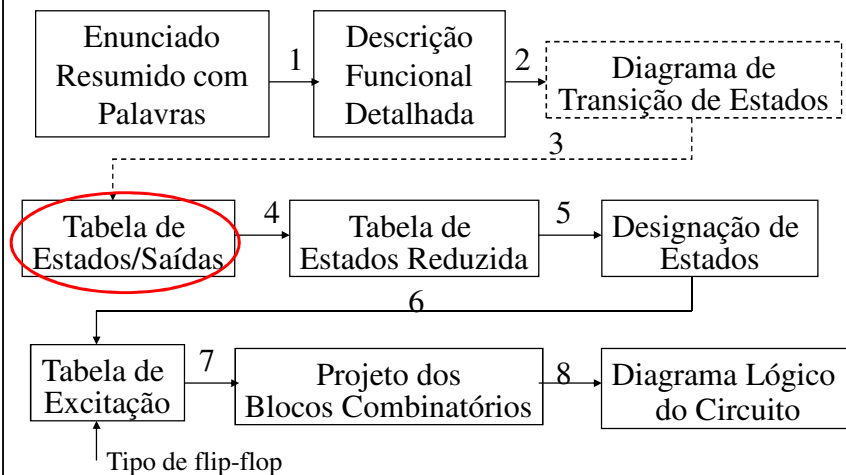
- A: estado inicial
- B: estado que armazena a ocorrência de 1 UM
- C: estado que armazena a ocorrência de 2 UNS consecutivos
- D: estado que armazena a ocorrência de 3 ou mais UNS consecutivos

4. Exemplo de Síntese - Mealy

Etapa 2: Diagrama de Transição de Estados



3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 19

4. Exemplo de Síntese - Mealy

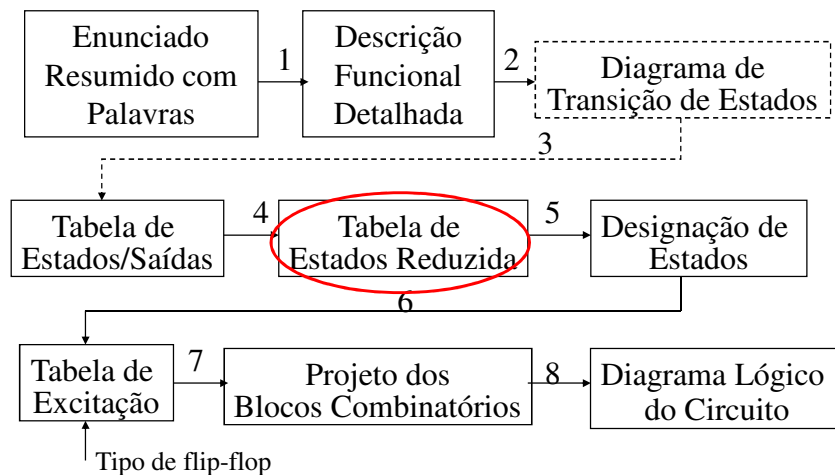
Etapa 3: Tabela de Estados/Saída

s^t	x^t	$x = 0$	$x = 1$
A		A / 0	B / 0
B		A / 0	C / 0
C		A / 0	D / 0
D		A / 1	D / 0

s^{t+1} / z^t

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 20

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 21

4. Exemplo de Síntese - Mealy

Etapa 4: Tabela de Estados Reduzida

Não é possível simplificar a tabela anterior

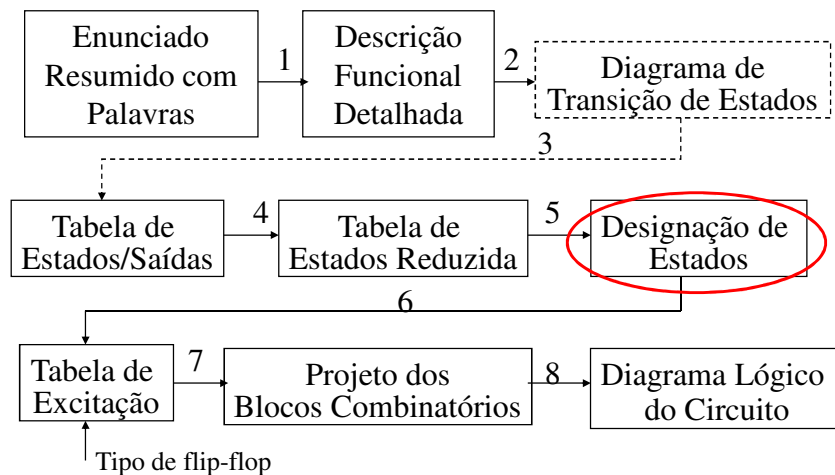
Etapa 5: Designação dos Estados

Como existem 4 estados, n é igual a 2

s	y1	y2
A	0	0
B	0	1
C	1	1
D	1	0

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 22

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplício e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 23

4. Exemplo de Síntese - Mealy

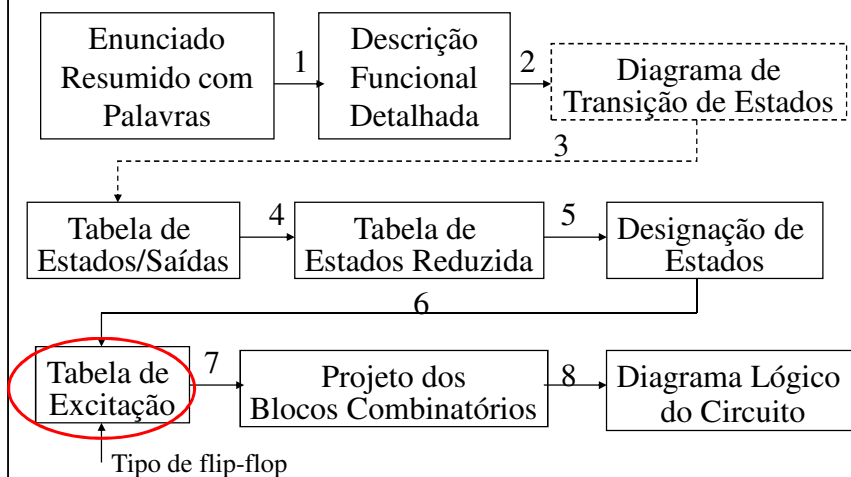
Etapa 5: Designação dos Estados

A tabela de estados/saída assume então a seguinte forma:

$y_1^t y_2^t \quad x^t$	$x = 0$	$x = 1$
0 0	0 0 / 0	0 1 / 0
0 1	0 0 / 0	1 1 / 0
1 1	0 0 / 0	1 0 / 0
1 0	0 0 / 1	1 0 / 0
$y_1^{t+1} y_2^{t+1} / z^t$		

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplício e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 24

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 25

4. Exemplo de Síntese - Mealy

Etapa 6: Tabela de Excitação

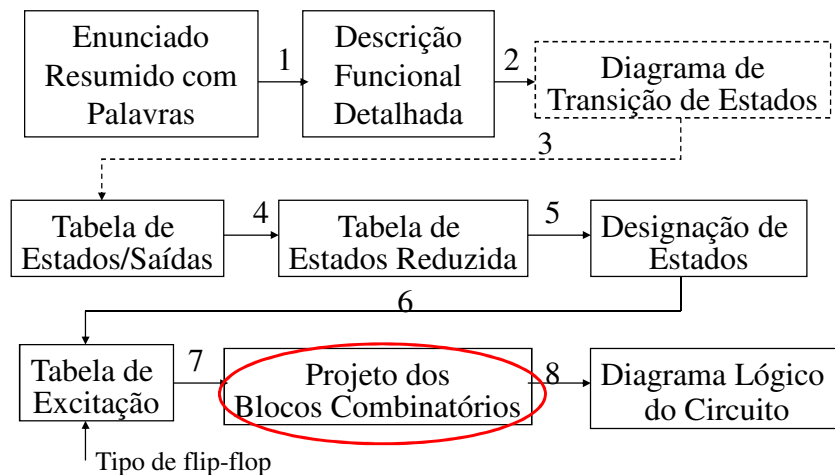
Supondo que deva-se usar flip-flops tipo D ↑:

$y_1^t y_2^t \ x^t$	$x = 0$	$x = 1$
0 0	0 0	0 1
0 1	0 0	1 1
1 1	0 0	1 0
1 0	0 0	1 0

$D_1^t \ D_2^t$

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 26

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 27

4. Exemplo de Síntese - Mealy

Etapa 7: Projeto dos Blocos Combinatórios

y1	y2	x	0	1
0	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	1	0	0	0
1	0	1	0	0

z

$$z = x' y_1 y_2'$$

y1	y2	x	0	1
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	1	0	1	0
1	0	0	1	0

D₁

$$D_1 = x y_2 + x y_1$$

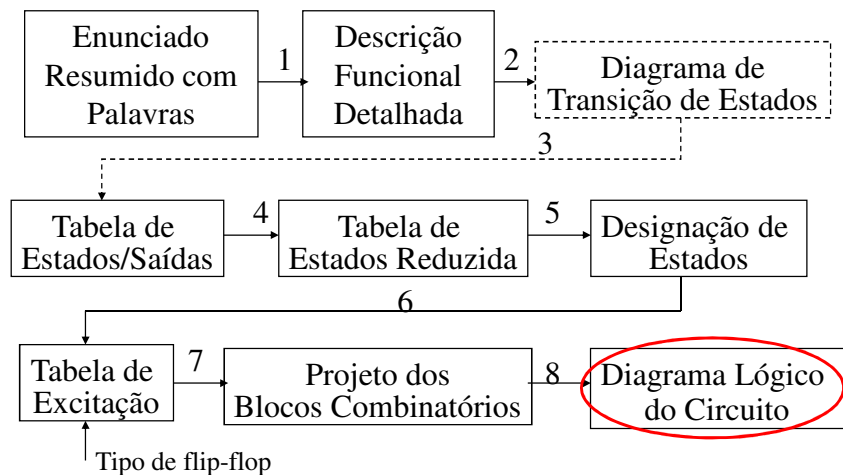
y1	y2	x	0	1
0	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	0	0
1	0	0	0	0

D₂

$$D_2 = x y_1'$$

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 28

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 29

4. Exemplo de Síntese – Mealy – Etapa 8: Diagrama Lógico

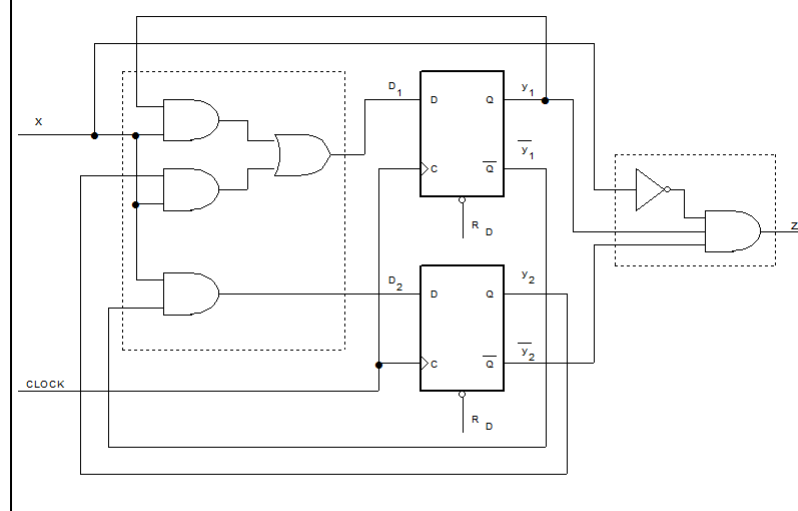
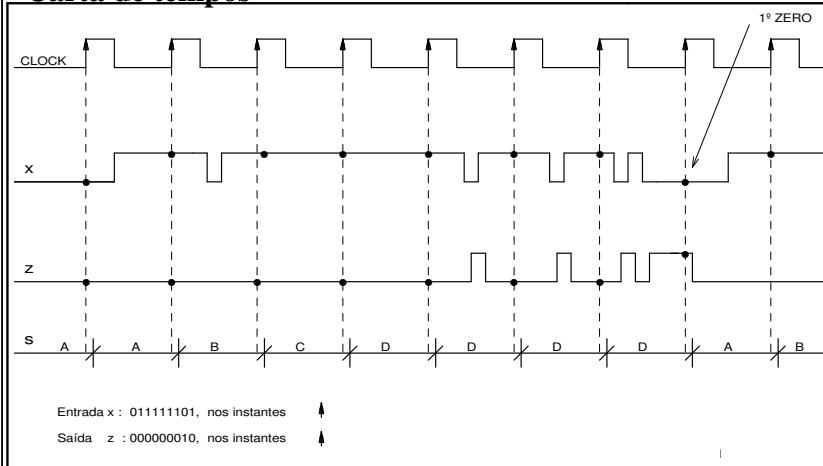


FIGURA 9.4 - CIRCUITO DO 1º EXEMPLO (MEALY)

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 30

4. Exemplo de Síntese - Mealy

Carta de tempos



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017

<Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

31

5. Exemplo de Síntese - Moore

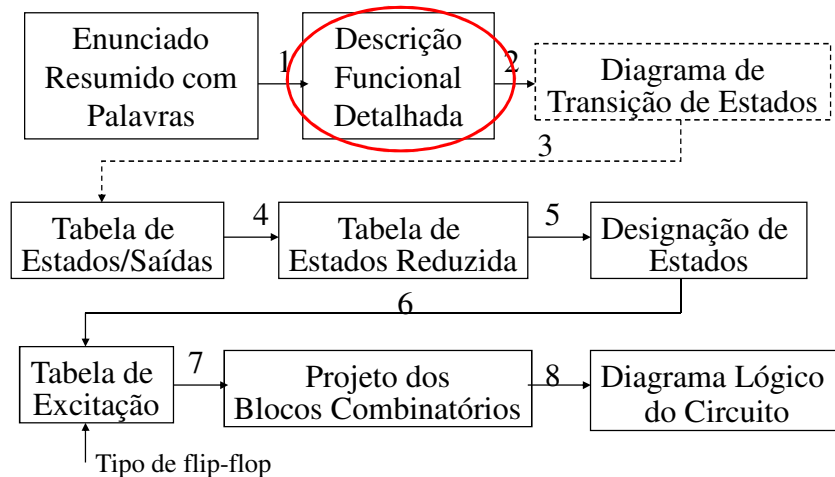
Enunciado: Projetar um circuito sequencial síncrono que reconhece o primeiro ZERO após a ocorrência de três ou mais UNS consecutivos. Adotar uma solução do tipo Moore e flip-flops tipo D.

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017

<Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

32

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplício e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 33

5. Exemplo de Síntese - Moore

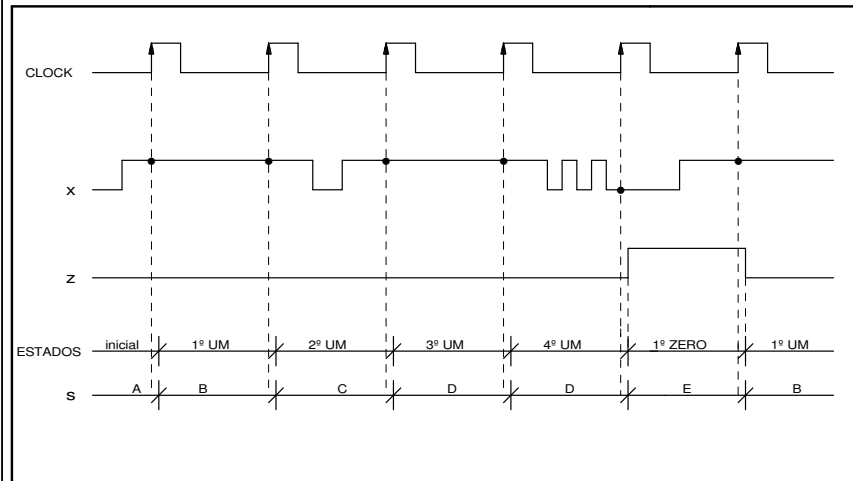
Etapa 1: Detalhamento da Descrição Funcional

O enunciado é o mesmo do primeiro exemplo, mas para melhor entender o comportamento entrada/saída é melhor desenhar a carta de tempos.

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplício e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 34

5. Exemplo de Síntese - Moore

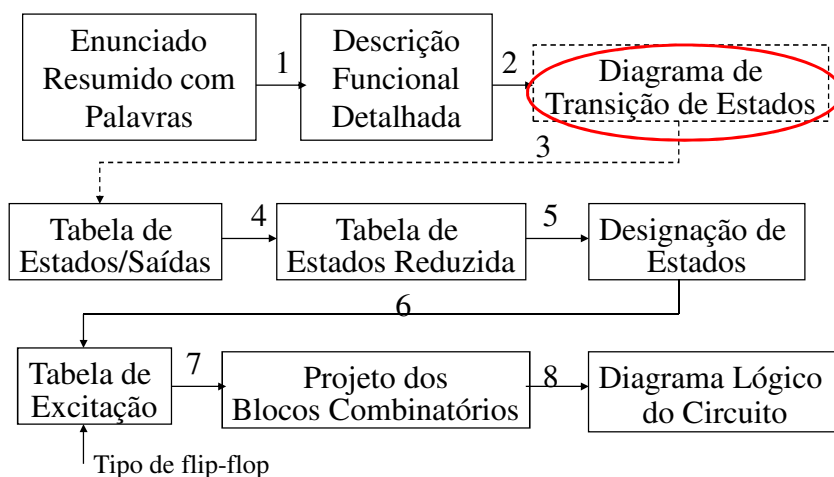
Carta de tempos



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Símplicio e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

35

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Símplicio e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

36

5. Exemplo de Síntese - Moore

Etapa 2: Diagrama de Transição de Estados

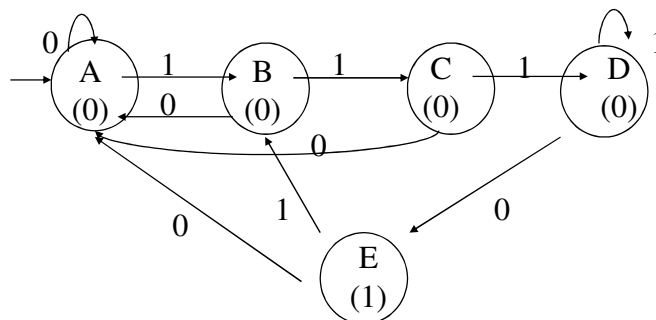
Serão necessários pelo menos 5 estados:

- A: estado inicial
- B: armazena a ocorrência do primeiro UM
- C: armazena a ocorrência do segundo UM consecutivo
- D: armazena a ocorrência do terceiro e demais UNS consecutivos
- E: armazena o primeiro ZERO após três ou mais UNS consecutivos

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 37

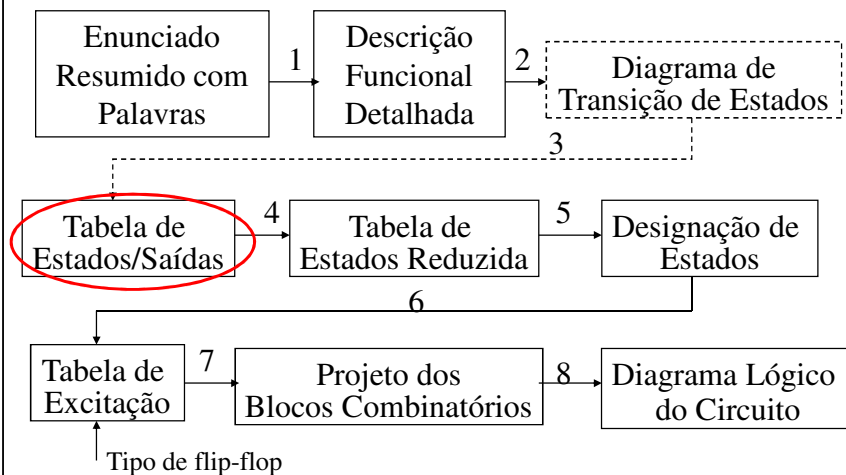
5. Exemplo de Síntese - Moore

Etapa 2: Diagrama de Transição de Estados



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 38

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simpício e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 39

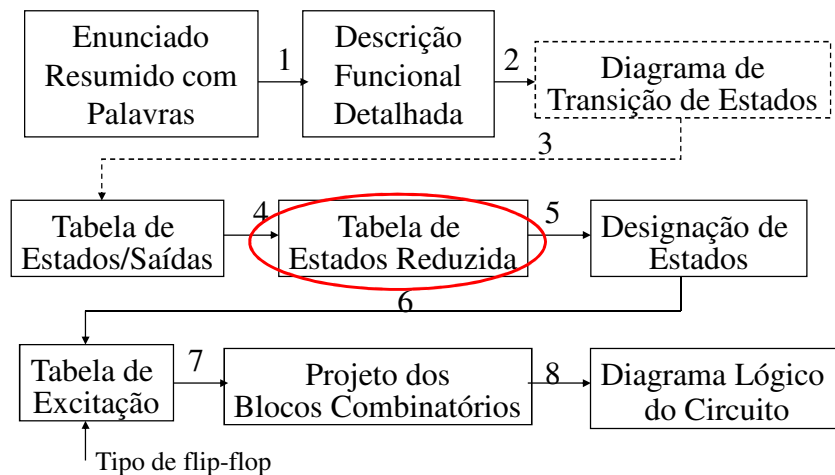
5. Exemplo de Síntese - Moore

Etapa 3: Tabela de Estados/Saída

s^t	x^t	$x = 0$	$x = 1$	z^t
A		A	B	0
B		A	C	0
C		A	D	0
D		E	D	0
E		A	B	1

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simpício e Spina 2.017 <Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 40

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017

<Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

41

5. Exemplo de Síntese - Moore

Etapa 4: Tabela de Estados Reduzida

Não é possível simplificar a tabela anterior

Etapa 5: Designação dos Estados

Como são necessários 5 estados, n é igual a 3 e utilizaremos a seguinte designação (arbitrária):

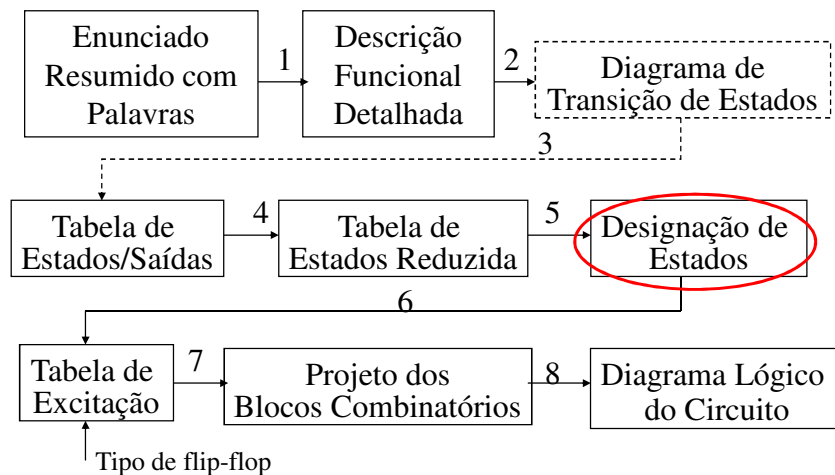
s	y1	y2	y3	s	y1	y2	y3
A	0	0	0	E	0	0	1
B	0	1	0	F	0	1	1
C	1	1	0	G	1	1	1
D	1	0	0	H	1	0	1

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017

<Sínt. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

42

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 43

5. Exemplo de Síntese - Moore

Etapa 5: Designação dos Estados

Existem duas alternativas para tratar os casos não especificados:

Alternativa 1: Não especificar

s^t	x^t	$x = 0$	$x = 1$	z^t
F		X	X	X
G		X	X	X
H		X	X	X

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 44

5. Exemplo de Síntese - Moore

Etapa 5: Designação dos Estados

Alternativa 2: Impor que o estado seguinte seja o estado inicial e a saída seja 0

s^t	x^t	$x = 0$	$x = 1$	z^t
F		A	A	0
G		A	A	0
H		A	A	0

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplício e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 45

5. Exemplo de Síntese - Moore

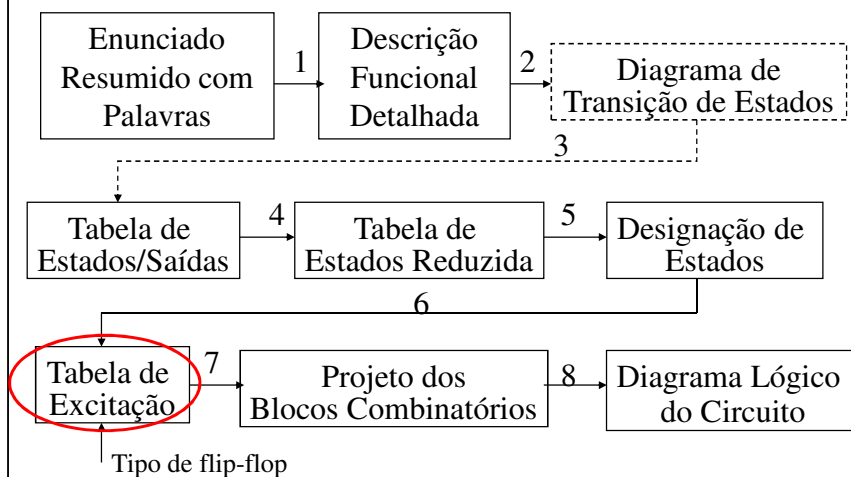
Etapa 5: Designação dos Estados

s^t	y_1	y_2	y_3	$x = 0$	$x = 1$	z^t
A	0	0	0	0	0	0
B	0	1	0	0	1	0
C	1	1	0	0	0	0
D	1	0	0	0	0	0
E	0	0	1	0	0	1
F	0	1	1	0	0	0
G	1	1	1	0	0	0
H	1	0	1	0	0	0

s^{t+1}

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplício e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 46

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simpício e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

47

5. Exemplo de Síntese - Moore

Etapa 6: Tabela de Excitação

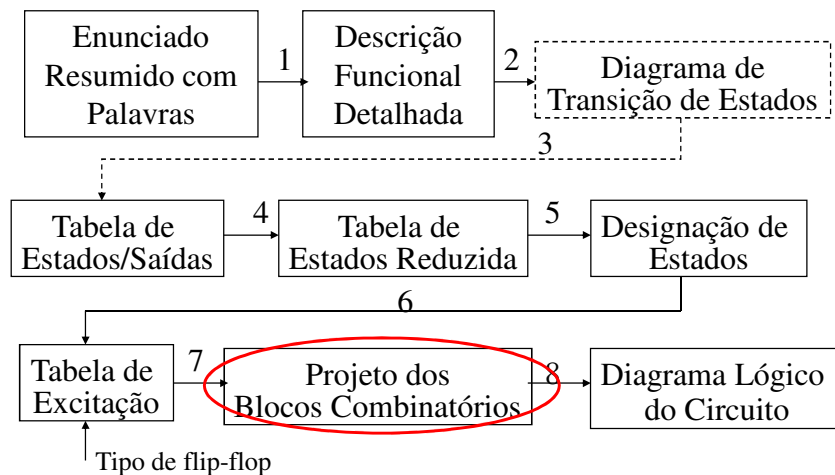
y1 y2 y3	x = 0	x = 1
0 0 0	0 0 0	0 1 0
0 1 0	0 0 0	1 1 0
1 1 0	0 0 0	1 0 0
1 0 0	0 0 1	1 0 0
0 0 1	0 0 0	0 1 0
0 1 1	0 0 0	0 0 0
1 1 1	0 0 0	0 0 0
1 0 1	0 0 0	0 0 0

$D1^t D2^t D3^t$

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simpício e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

48

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 49

5. Exemplo de Síntese - Moore

Etapa 7: Projeto dos Blocos Combinatórios

y ₁ y ₂ / xy ₃	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	0	0	0	1
11	0	0	0	1
10	0	0	0	1

D1^t

y ₁ y ₂ / xy ₃	00	01	11	10
00	0	0	1	1
01	0	0	0	1
11	0	0	0	0
10	0	0	0	0

D2^t

y ₁ y ₂ / xy ₃	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	0	0	0	0
11	0	0	0	0
10	1	0	0	0

D3^t

$$D1 = xy_2y_3' + x y_1y_3'$$

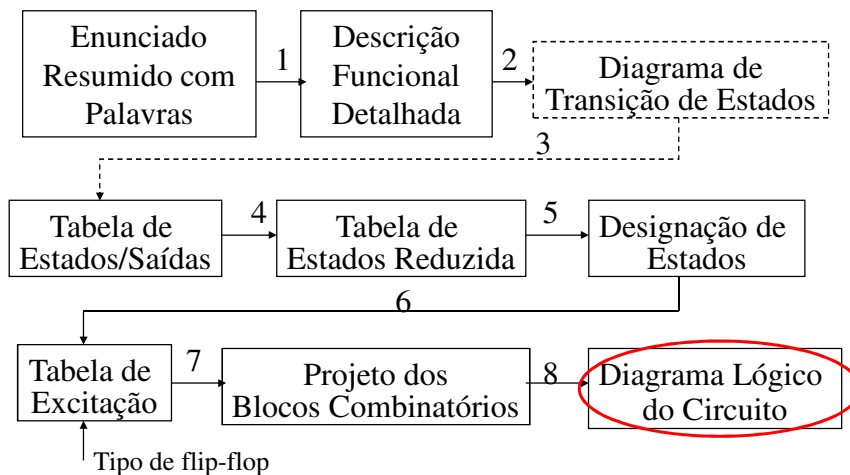
$$D2 = xy_1'y_2' + x y_1'y_3'$$

$$D3 = x'y_1y_2'y_3'$$

$$z = y_1'y_2'y_3$$

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 50

3. Etapas da Metodologia de Síntese



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simpício e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 51

5. Exemplo de Síntese – Moore: 8) Diagrama Lógico do Circuito

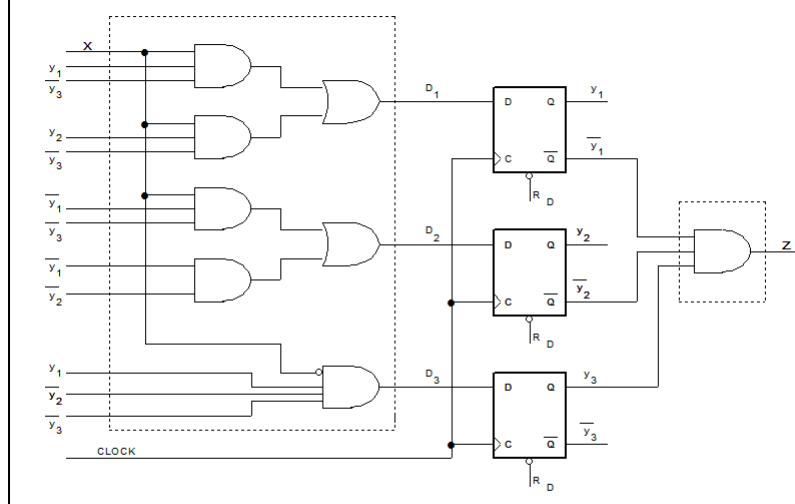


FIGURA 9.8 - CIRCUITO DO 2º EXEMPLO (MOORE)

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simpício e Spina 2.017 <Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II 52

6. Simplificação da Tabela de Estados

Para se obter um circuito mais simples, é importante reduzir a tabela de estados, quando possível. Esta redução é possível quando existirem na tabela **estados equivalentes**.

Definição: Dois estados são **equivalentes** quando:

- produzem a mesma saída para o mesmo valor das entradas
- são levados a estados equivalentes para o mesmo valor das entradas

6. Simplificação da Tabela de Estados

Esta noção de estados equivalentes tem as propriedades matemáticas de uma relação de equivalência

Existem dois métodos de simplificação:

- observação direta
- tabelas de implicação

6.1. Simplificação por Observação Direta

s^t	x^t	$x = 0$	$x = 1$
A		A / 0	B / 0
B		A / 1	C / 0
C		A / 0	D / 1
D		E / 1	D / 0
E		A / 0	B / 0

s^{t+1} / z^t

6.1. Simplificação por Observação Direta

s^t	x^t	$x = 0$	$x = 1$
A		A / 0	B / 0
B		A / 1	C / 0
C		A / 0	D / 1
D		A / 1	D / 0

s^{t+1} / z^t

6.2. Simplificação por Tabelas de Implicação

Trata-se de um método útil quando o número de estados é muito grande.

A idéia é testar iterativamente se estados podem ser equivalentes dois a dois, seguindo um certo procedimento.

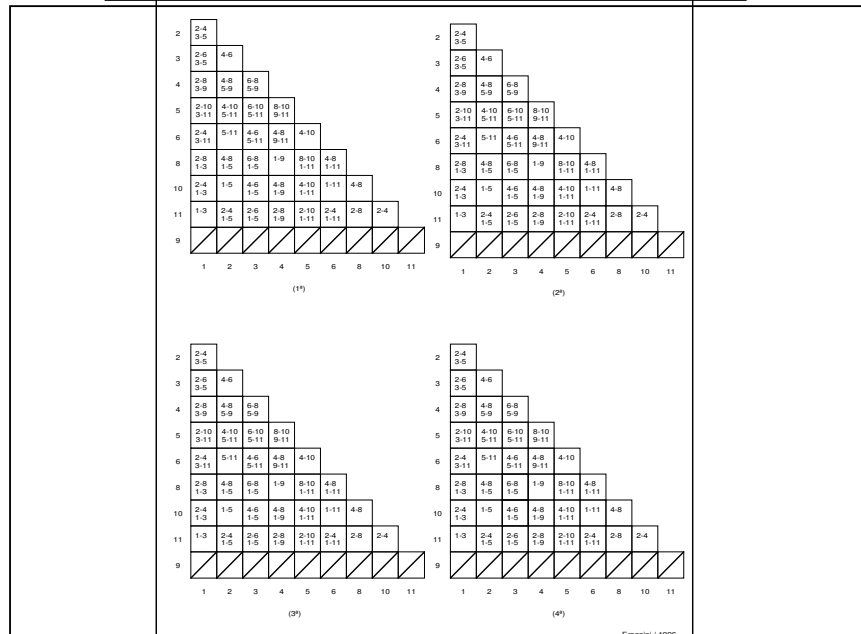
Para isto, utiliza-se uma tabela de implicação.

© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017

<Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

57

6.2. Simplificação por Tabelas de Implicação



© Andrade, Bruno, Midorikawa, Simplicio e Spina 2.017

<Sint. Circ. Seq.> PCS 3225 Sistemas Digitais II

58

FIGURA 9.16 - TABELAS DE IMPLICAÇÃO (A SERM COMPLETADAS DURANTE A AULA)

Lição de Casa

- **Leitura Obrigatória:**
 - Capítulo 7.0, ítem 7.4 do Livro Texto.
- **Exercícios Obrigatórios:**
 - Capítulo 7.0 do Livro Texto.

Livro Texto

- **Wakerly, J.F.; *Digital Design – Principles & Practices*; Fourth Edition, ISBN: 0-13-186389-4, Pearson & Prentice-Hall, Upper Saddle, River, New Jersey, 07458, 2006.**

Bibliografia Adicional Deste Assunto

- Dias, Francisco José de Oliveira; *Introdução aos Circuitos de Chaveamento*; Apostila, PEL/EPUSP, 1.980;
- Fregni, Edson; Ranzini, Edith; *Teoria da Comutação: Introdução aos Circuitos Digitais (Partes 1 e 2)*; Apostila PCS/EPUSP, Outubro de 1.999;

Bibliografia Adicional Deste Assunto

- Hill, Frederic and Peterson, Gerald; *Introduction to Switching Theory and Logical Design*; Ed. John Wiley and Sons, 1.974;
- Ranzini, Edith; *Circuitos de Chaveamento* (notas de aula); Apostila, EPUSP, 1.983.