

Máquinas de Estados

❑ Blocos de Controle

Em sistemas digitais os registradores permitem o armazenamento e transferência de bits. Esses bits armazenados podem representar o **estado** (memorizado) do sistema digital sequencial.

Controlando-se a transferência de dados entre registradores pode-se controlar a **evolução ordenada dos estados do sistema digital ao longo do tempo**.

Um sistema digital sequencial que **controla saídas booleanas** com base em entradas booleanas e que possui um **comportamento específico**, ordenado no tempo (**estados**), pode ser definido como um **bloco de controle**.

Exemplos:

- Controle de semáforos
- Luzes sequenciais
- Detector de senhas (chave de automóvel, controle de acesso)

1

Máquinas de Estados

❑ Máquinas de Estados Finitos (FSM's - *Finite State Machines*)

Para realizar o projeto de sistemas digitais sequenciais de controle genéricos utiliza-se uma representação formal de sistemas denominada de **máquina de estados finitos (FSM – Finite State Machine)** ou **autômatos de estados finitos**.

Uma **Máquina de Estados (ME)** é um formalismo matemático, composto de:

- ❑ Um conjunto **limitado de estados** (modos do sistema);
- ❑ Um conjunto de **entradas** e um conjunto de **saídas** (interfaces do sistema);
- ❑ Um **estado inicial** (estado onde a sequência começa);
- ❑ Uma descrição que indique a **evolução dos estados**, com base no estado atual e nos valores das entradas. Utilizaremos a representação de **diagramas de estados** para essa descrição.;
- ❑ Uma descrição de quais são os **valores de saída** em cada estado.

No nosso curso utilizaremos a abreviatura **ME** para denominar **Máquina de Estados**.

2

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

Máquinas de Estados

Diagramas de Estado

A representação por diagrama de estados constitui-se de um **grafo orientado**, composto dos seguintes elementos gráficos:



= **Estados** – representa a situação atual do sistema e dos valores de saída associados ao estado:



= **Transições** - ações ou eventos de entrada que provocam a mudança dos estados:



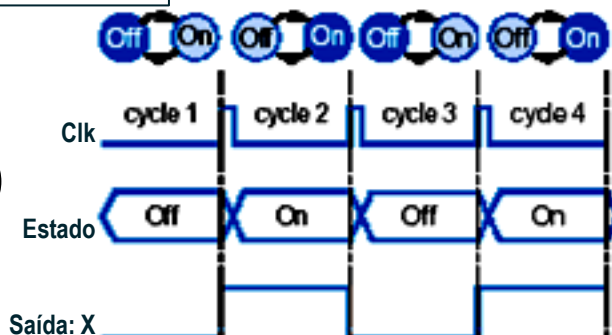
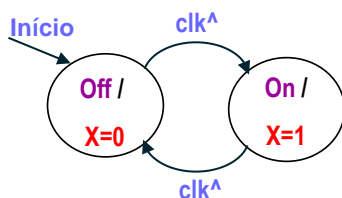
= **Transição de Início** – indica o estado inicial do sistema.

3

Máquinas de Estados

Exemplo 1: Sistema que comuta entre os estados ligado (On) e desligado (Off) a cada ciclo de clock (saída: X).

Representação de Diagrama de Estados:

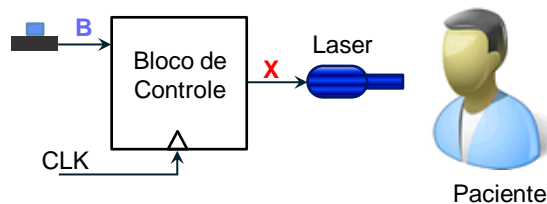


4

Máquinas de Estados

Exemplo 2: Considere o projeto de uma parte de um sistema de cirurgia a laser (para correção oftálmica ou remoção de cicatrizes). Esse sistema exige o funcionamento de um laser durante um intervalo de tempo preciso. O cirurgião pressiona um botão B e o laser deve permanecer ativado por exatamente 30 ns. Considere que o sinal de relógio (clock) tem período de 10 ns (100 MHz). Assim, o sistema de controle do laser deve apresentar as seguintes características:

- O número de períodos de relógio em que o laser deve permanecer ativado é igual a 3;
- O botão B ($B=1$) dispara um pulso de 30 ns de laser;
- A saída X ($X=1$) mantém o laser ligado enquanto permanecer ativo (NL1).

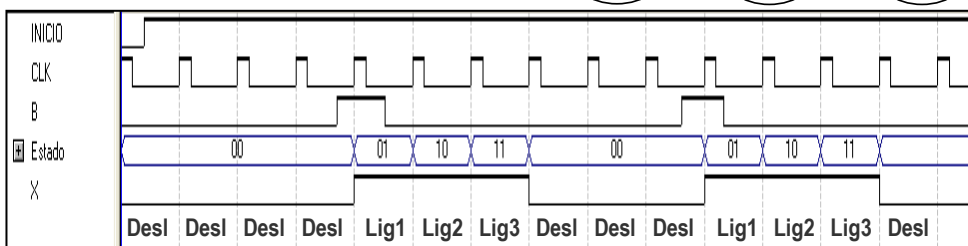
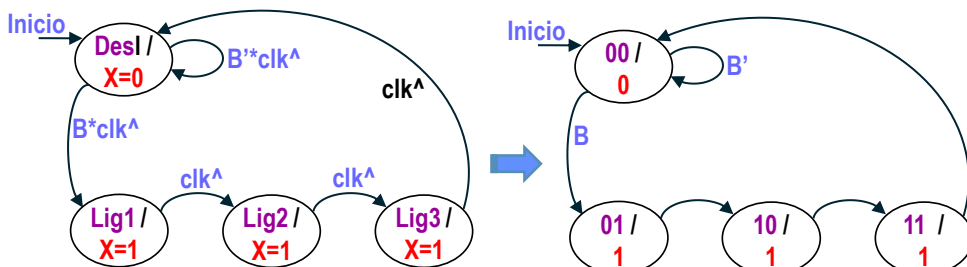


5

Máquinas de Estados

Exemplo 2: Projeto do controlador de laser cirúrgico.

Diagrama de Estados:

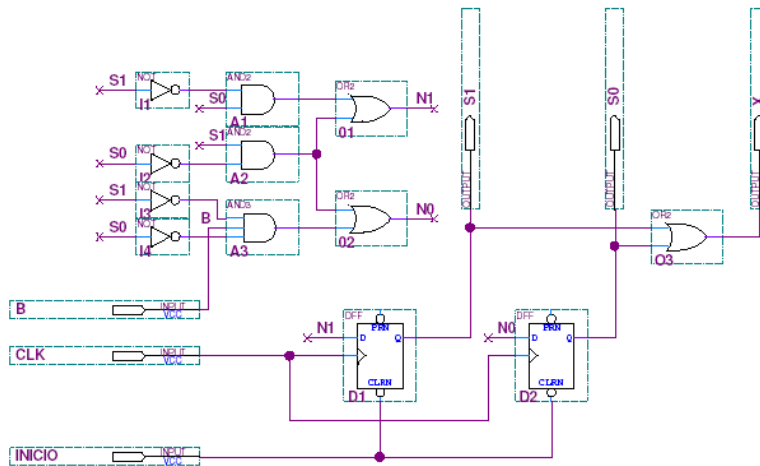


6

Máquinas de Estados

Exemplo 2: Projeto do controlador de laser cirúrgico.

Diagrama Esquemático-Lógico:

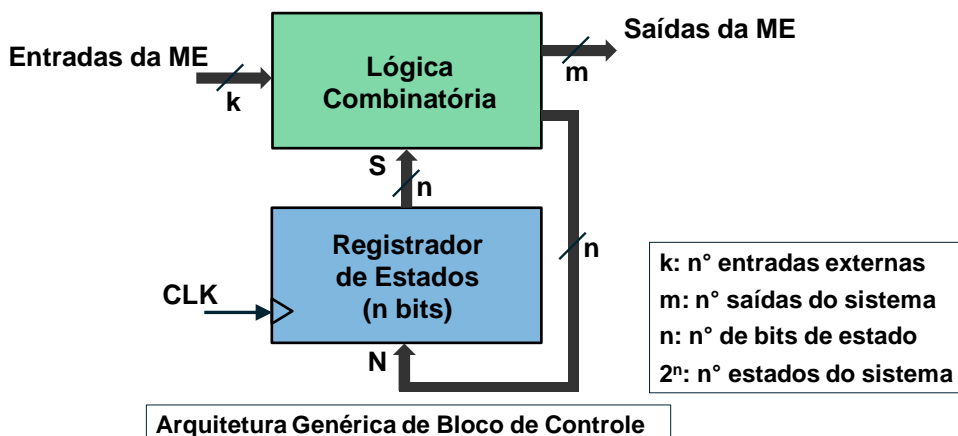


7

Máquinas de Estados

❑Projeto de Blocos de Controle (Máquinas de Estados)

Para realizar o projeto de uma ME adota-se um método que utiliza uma arquitetura de sistema padrão, baseada em um **registrador de estado** e uma **lógica combinatória**, a qual denomina-se **arquitetura de bloco de controle**.



8

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

9

Máquinas de Estados

Projeto de Blocos de Controle (Máquinas de Estados)

Considerando o projeto do controlador do laser cirúrgico:

Estado Atual: s1s0

Saída

Estado Atual: s1s0

Estado Futuro:

k = 1 (entradas externas: B)
 m = 1 (saídas do sistema: X)
 n = 2 (bits de estado: s1 s0)
 $2^n = 4$ (nº estados do sistema)

Arquitetura da ME para o projeto do laser cirúrgico

9

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

10

Máquinas de Estados

Metodologia de Projeto de Máquinas de Estados

Para realizar o projeto de uma ME adota-se uma metodologia de projeto com 7 passos (similar à utilizada para o projeto de contadores):

1. **Compreensão do problema lógico** (Diagrama de Blocos, representando as entradas e saídas do sistema);
2. **Representação abstrata da ME** (Diagrama de Estados);
3. **Descrição da arquitetura** (Bloco de Controle: composto de registrador de estado e lógica combinatória);
4. **Codificação dos estados** (definição de um código binário único para cada estado);
5. **Seleção do tipo de FF** (Tabela de Transição do FF escolhido);
6. **Implementação da ME** (Tabela de Transição de Estados e minimização com Mapas de Karnaugh);
7. **Representação do circuito** (Diagrama Esquemático-Lógico).

10

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

11

Máquinas de Estados

□ **Metodologia de Projeto de Máquinas de Estados**

Exemplo 3: Projeto do controlador de laser cirúrgico:

- Compreensão do problema lógico:**
Diagrama de Blocos do Sistema:
- Representação abstrata da ME:**
Diagrama de Estados:

11

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

12

Máquinas de Estados

□ **Metodologia de Projeto de Máquinas de Estados**

Exemplo 3: Projeto do controlador de laser cirúrgico:

- Descrição da arquitetura do sistema:**
Bloco de Controle:
 - Registrador de 2 bits (4 estados);
 - Entradas: B e Início;
 - Saídas: X;
 - Sinais do Estado Futuro: n1, n0.
- Codificação dos estados:**
A - Código dos Estados:

Estado	Código
Desl	00
Lig1	01
Lig2	10
Lig3	11

Tabela de Transição de Estados:

Estado Atual	Entradas			Estado Futuro		Saída X
	s1	s0	B	n1	n0	

12

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

Máquinas de Estados

Metodologia de Projeto de Máquinas de Estados

Exemplo 3: Projeto do controlador de laser cirúrgico:

4. Codificação dos Estados:

Diagrama de Estados (codificado):

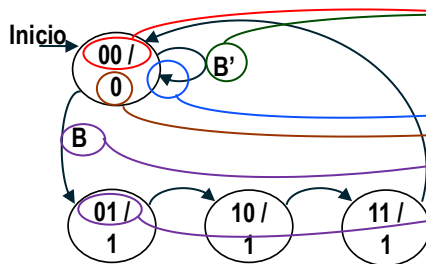


Tabela de Transição de Estados:

Estado Atual	Entradas			Estado Futuro		Saída
	s1	s0	B	n1	n0	X
Desl	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	1	0
Lig1	0	1	0	1	0	1
	0	1	1	1	0	1
Lig2	1	0	0	1	1	1
	1	0	1	1	1	1
Lig3	1	1	0	0	0	1
	1	1	1	0	0	1

5. Seleção do tipo de FF:

- Selecionado o FF tipo D \Rightarrow Tabela de Transição do FF D:

D	$Q_n \rightarrow Q_{n+1}$
0	0 \rightarrow 0
1	0 \rightarrow 1
0	1 \rightarrow 0
1	1 \rightarrow 1

13

Máquinas de Estados

Metodologia de Projeto de Máquinas de Estados

Exemplo 3: Projeto do controlador de laser cirúrgico:

6. Implementação da ME:

A - Tabela de Transição de Estados (completa):

Estado Atual	Entradas			Estado Futuro		Saída	Entradas FF	
	s1	s0	B	n1	n0		D1	D0
Desl	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	1	0	0	1
Lig1	0	1	0	1	0	1	1	0
	0	1	1	1	0	1	1	0
Lig2	1	0	0	1	1	1	1	1
	1	0	1	1	1	1	1	1
Lig3	1	1	0	0	0	1	0	0
	1	1	1	0	0	1	0	0

Tabela de Transição do FF D:

D	$Q_n \rightarrow Q_{n+1}$
0	0 \rightarrow 0
1	0 \rightarrow 1
0	1 \rightarrow 0
1	1 \rightarrow 1

14

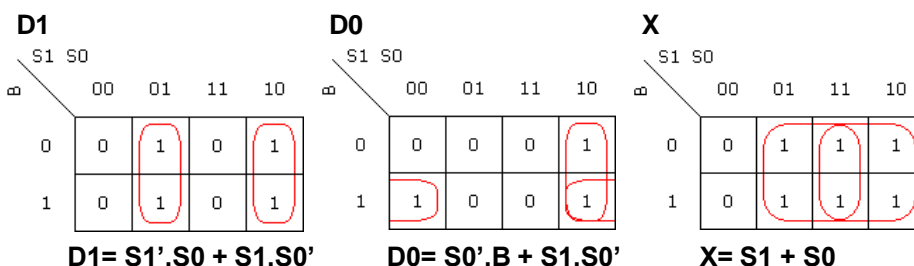
Máquinas de Estados

Metodologia de Projeto de Máquinas de Estados

Exemplo 3: Projeto do controlador de laser cirúrgico:

6. Implementação da ME:

B – Mapas de Karnaugh para as entradas dos FF e Saída:



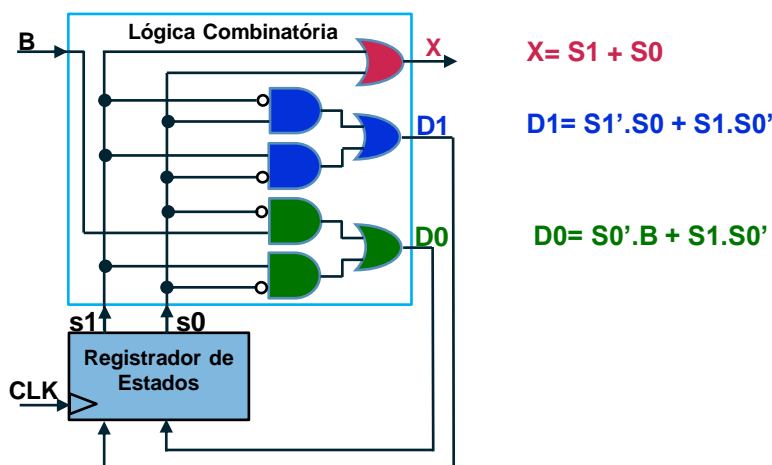
15

Máquinas de Estados

Metodologia de Projeto de Máquinas de Estados

Exemplo 3: Projeto do controlador de laser cirúrgico:

7. Representação do circuito da ME: Diagrama Esquemático-Lógico:



16

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

17

Máquinas de Estados

Exemplo 3: Simulação do comportamento da ME:

Timing Diagram:

Signal	0	1	1	1
B	0	0	1	1
CLK	0	0	1	1
D1	0	0	1	1
D0	0	0	0	1
S1	0	0	0	1
S0	0	0	1	0
X	0	0	1	1

17

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

18

Máquinas de Estados - Projetos

□ Projeto de Blocos de Controle (Máquinas de Estados)

□ Exercício 1: Projeto de máquina de venda de refrigerantes

Uma máquina de venda automática de refrigerantes aceita moedas de R\$1,00 e R\$0,50, que devem ser inseridas individualmente num único orifício. Para cada moeda inserida, o detector de moedas envia ao controlador um pulso, chamado M1, para moedas de R\$1,00 e M50, para moedas de 50 centavos. Desta forma, o controlador deve contabilizar o saldo de moedas inseridas. O preço do refrigerante vendido é de R\$1,50. Assim que o saldo em moedas seja suficiente o controlador dispara o mecanismo de liberação do produto, através da ativação (em nível lógico 1) de um pulso do sinal de saída L. A máquina não dá troco, nem devolve dinheiro. Desenvolver uma máquina de estados que execute as funções desse controlador e implementar o seu circuito lógico utilizando registradores baseados em **FF tipo JK**.

18

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

Máquinas de Estados - Projetos

(2021)

Aula 17

19

❑ **Exercício 1:** Projeto de máquina de venda de refrigerantes:

1. **Compreensão do problema lógico:**
Diagrama de Blocos do Sistema:

2. **Representação abstrata da ME:**
Diagrama de Estados:

19

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

Máquinas de Estados - Projetos

(2021)

Aula 17

20

❑ **Exercício 1:** Projeto de máquina de venda de refrigerantes:

3. **Descrição da arquitetura do sistema:**
Bloco de Controle:
 - Registradores:
 - Entradas:
 - Saídas:
 - Sinais do Estado Futuro:

4. **Codificação dos estados:**

Código dos Estados:

Estado	Código

⇒

Tabela de Transição de Estados:

Estado Atual	Entradas	Estado Futuro	Saída

20

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

centro universitário

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

21

Máquinas de Estados - Projetos

❑ **Exercício 1:** Projeto de máquina de venda de refrigerantes:

4. Codificação dos Estados:

Diagrama de Estados:
(codificado)

Tabela de Transição de Estados:

Estado Atual	Entradas				Estado Futuro	Saída
	0	0	0	0		
	0	0	0	1		
	0	0	1	0		
	0	0	1	1		
	0	1	0	0		
	0	1	0	1		
	0	1	1	0		
	0	1	1	1		
	1	0	0	0		
	1	0	0	1		
	1	0	1	0		
	1	0	1	1		
	1	1	0	0		
	1	1	0	1		
	1	1	1	0		
	1	1	1	1		

21

centro universitário

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

22

Máquinas de Estados - Projetos

❑ **Exercício 1:** Projeto de máquina de venda de refrigerantes:

5. Seleção do tipo de FF:

Utilizando o FF tipo JK ⇒

Tabela de Transição do FF JK:

J	K	$Q_n \rightarrow Q_{n+1}$

22

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

centro universitário

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

23

Máquinas de Estados - Projetos

❑ **Exercício 1:** Projeto de máquina de venda de refrigerantes:

6. Implementação da ME com FF JK:

A - Tabela de Transição de Estados:

Estado Atual	Entradas				Estado Futuro	Saída	Entradas FF			
	0	0	0	0						
	0	0	0	1						
	0	0	1	0						
	0	0	1	1						
	0	1	0	0						
	0	1	0	1						
	0	1	1	0						
	0	1	1	1						
	1	0	0	0						
	1	0	0	1						
	1	0	1	0						
	1	0	1	1						
	1	1	0	0						
	1	1	0	1						
	1	1	1	0						
	1	1	1	1						

Tabela de Transição do FF JK:

J	K	$Q_n \rightarrow Q_{n+1}$

23

centro universitário

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

24

Máquinas de Estados - Projetos

❑ **Exercício 1:** Projeto de máquina de venda de refrigerantes:

6. Implementação da ME com FF JK:

B – Mapas de Karnaugh para as entradas dos FF e Saída:

J1

K1

J0

K0

L

24

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

25

Máquinas de Estados - Projetos

❑ **Exercício 1:** Projeto de máquina de venda de refrigerantes (Exemplo com JK):

7. Representação do circuito: Diagrama Esquemático-Lógico:

25

centro universitário

FEI

CE3512 - Sistemas Digitais - Prof. Dr. Valter F. Avelino

(2021)

Aula 17

26

Máquinas de Estados - Projetos

❑ **Exercício 1:** Projeto de máquina de venda de refrigerantes:

8. Simulação do circuito: Formas de Onda:

26

As notas de aula servem como roteiro de aula para o professor, contendo os principais tópicos que serão explorados durante as aulas. Podem também servir como roteiro de estudo, mas não substituem o livro texto da disciplina: TOCCI, R.J., WIDMER, N.S., MOSS, G. L. – Sistemas Digitais – princípios e aplicações (11ª Ed.)