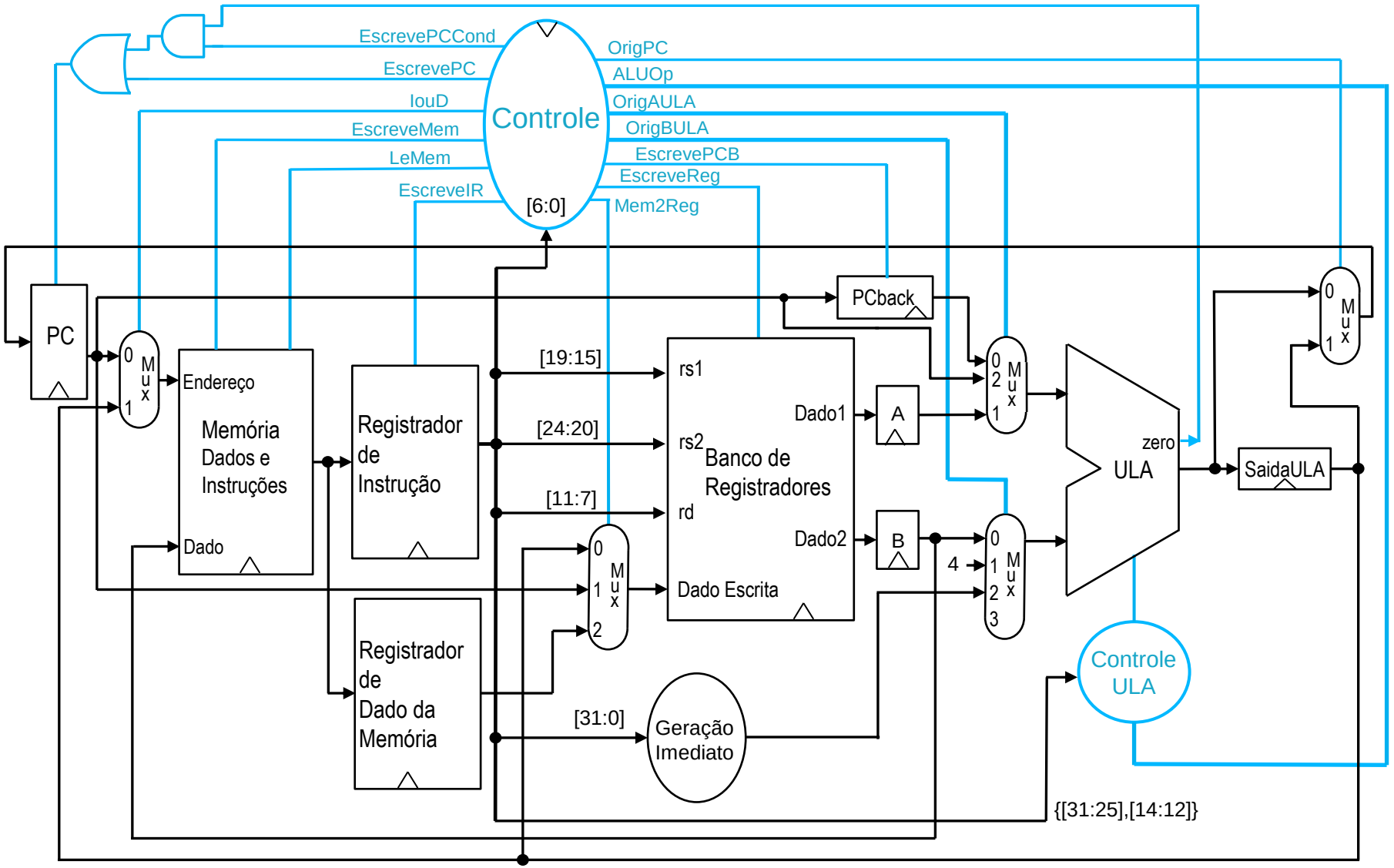
Universidade de Brasília
Departamento de Ciência da Computação

Aula 15
Implementação RISC-V
Multiciclo – Unidade de Controle

Caminho de Dados Multiciclo



Resumo Controle Multiciclo

Etapa	Tipo-R	Acesso à Memória	Desvios Condicionais	Desvios Incondicionais
Busca da Instrução	IR<=Mem[PC] PCback<=PC PC<=PC+4			
Decodificação, Leitura dos registradores	A<=Reg[IR[19:15]] B<=Reg[IR[24:20]] SaidaULA<=PCBack+imm			
Execução, cálculo do endereço	SaidaULA<=A *op* B	SaidaULA<=A+imm	Se (A==B) PC<=SaidaULA	Reg[IR[11:7]]<=PC+4 PC<=SaidaULA
Acesso à memória, conclusão tipo-R	Reg[IR[11:7]]<=SaidaULA	Load: MDR<=Mem[SaidaULA] Store: Mem[SaidaULA]<=B		
Conclusão lw		Load: Reg[IR[11:7]]<=MDR		

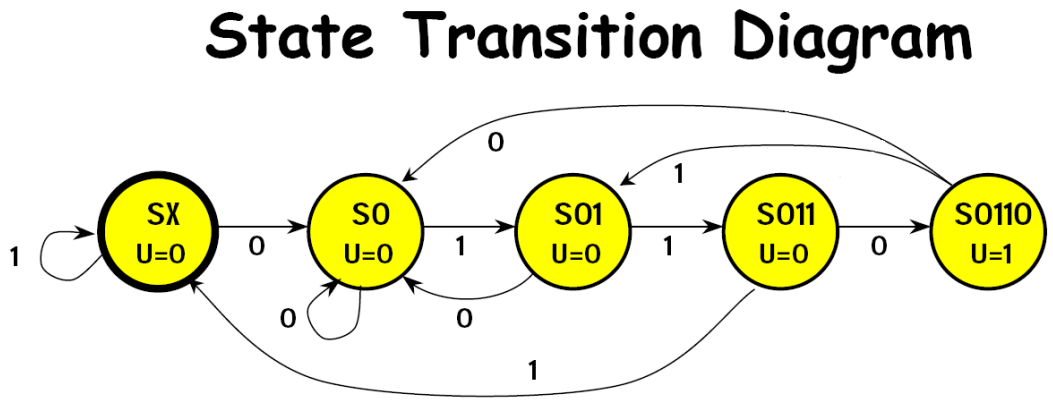
Projeto do Controle Multiciclo

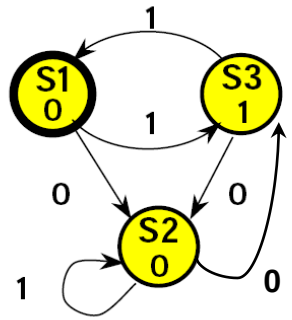
- Controle feito em uma série de etapas
- Técnicas de Implementação:
  - Máquinas de Estado Finito
  - Microprogramação

Representação Inicial	Diagrama de estados finitos	Microprograma
Controle de Sequenciação	Função de próximo estado explícita	Contador de programa + ROM
Representação Lógica	Equações Lógicas	Tabelas Verdade
Técnica de Implementação	PLA	ROM

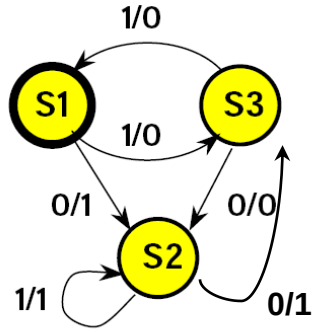
Máquina de Estados Finitos - MEF

- **Diagrama de Estados**
- Cada nó do diagrama representa um estado
- A transição entre estados é indicada por arcos
- As condições de disparo de uma transição são associadas aos arcos
- Cada estado corresponde a um ciclo de relógio





MOORE Machine:
Outputs on States



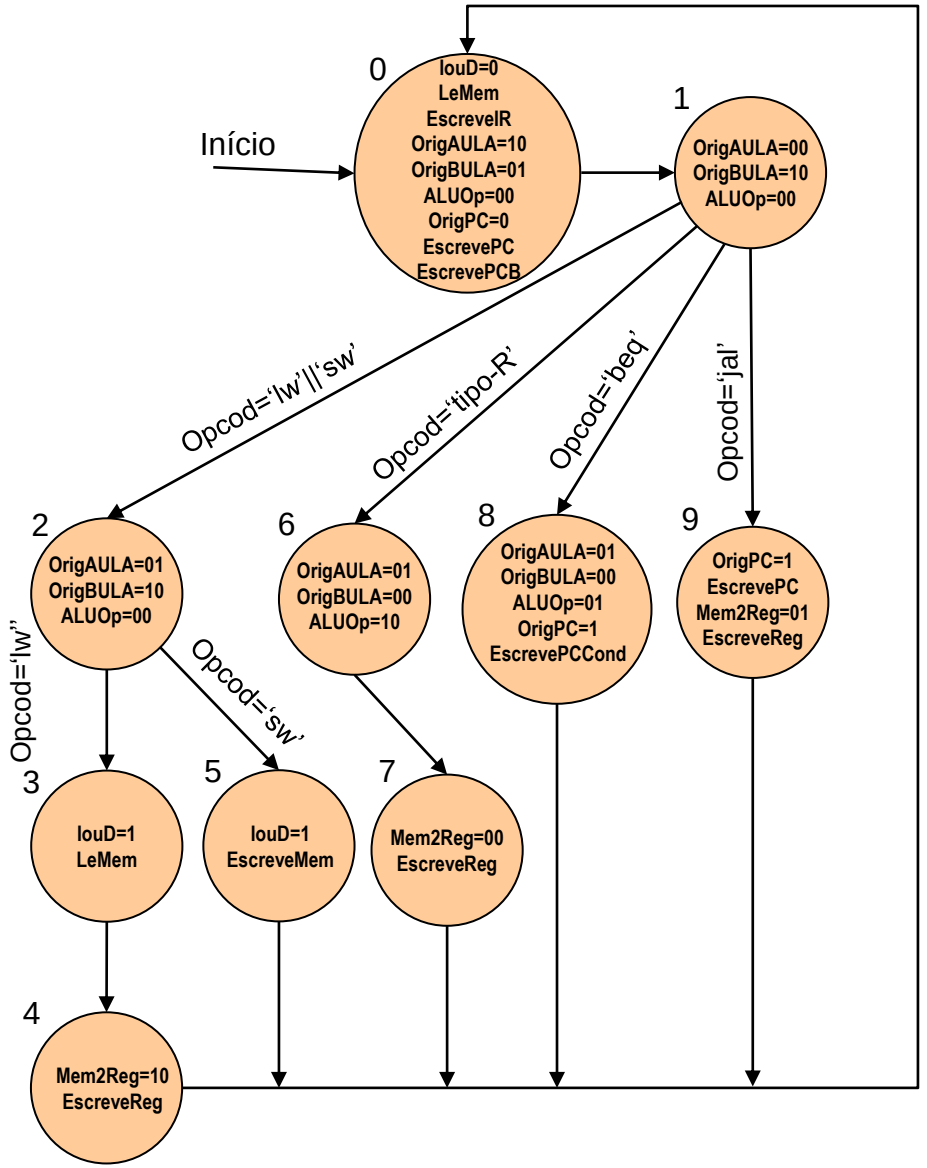
MEALY Machine:
Outputs on Transitions

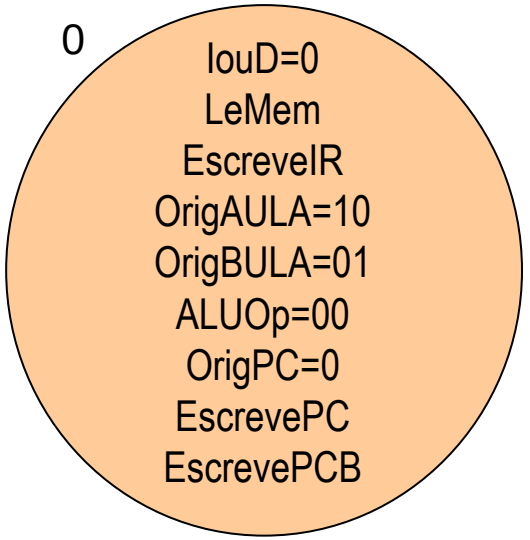
MEF do Controle do RISC-V Multiciclo

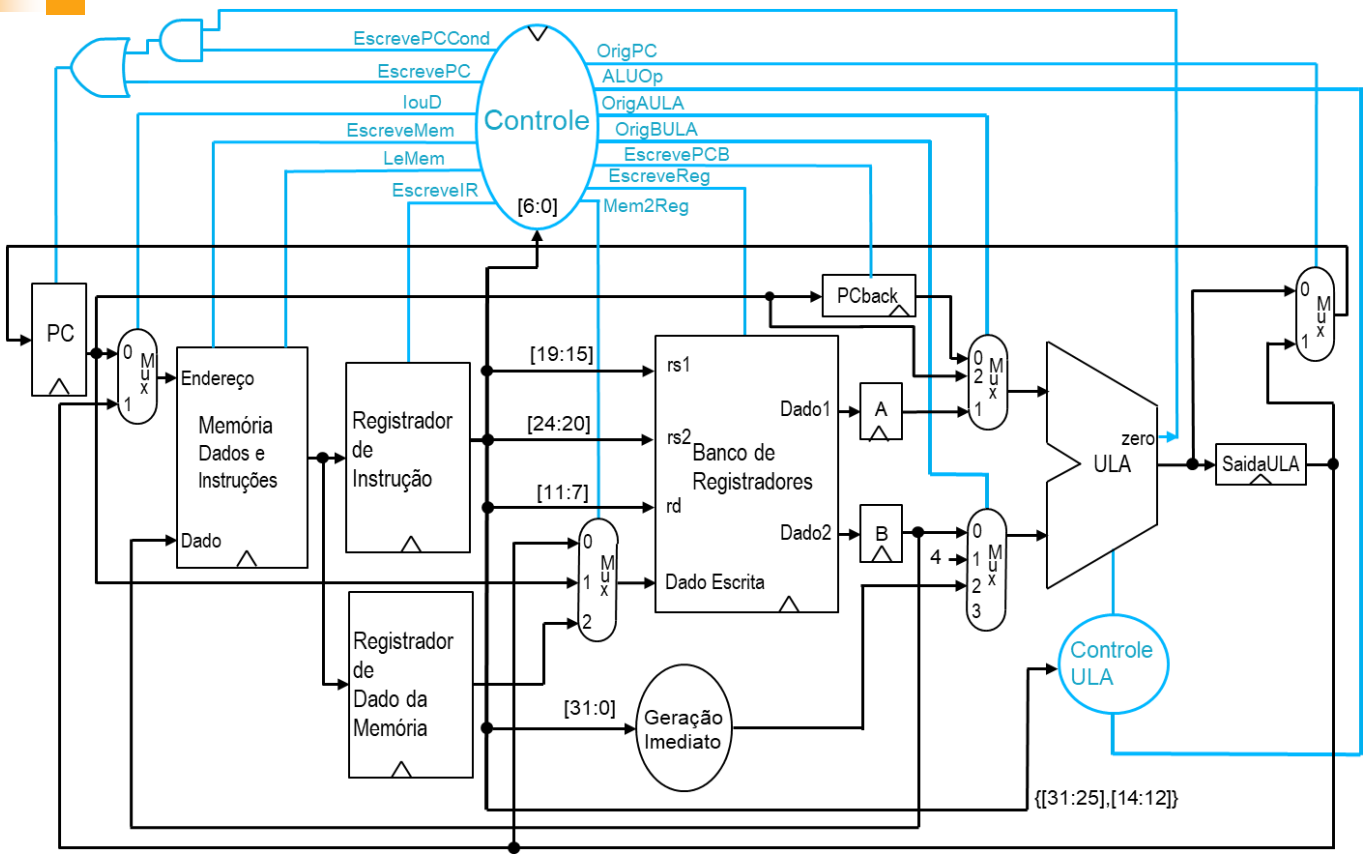
Análise do controle para toda a ISA implementada

5 etapas:

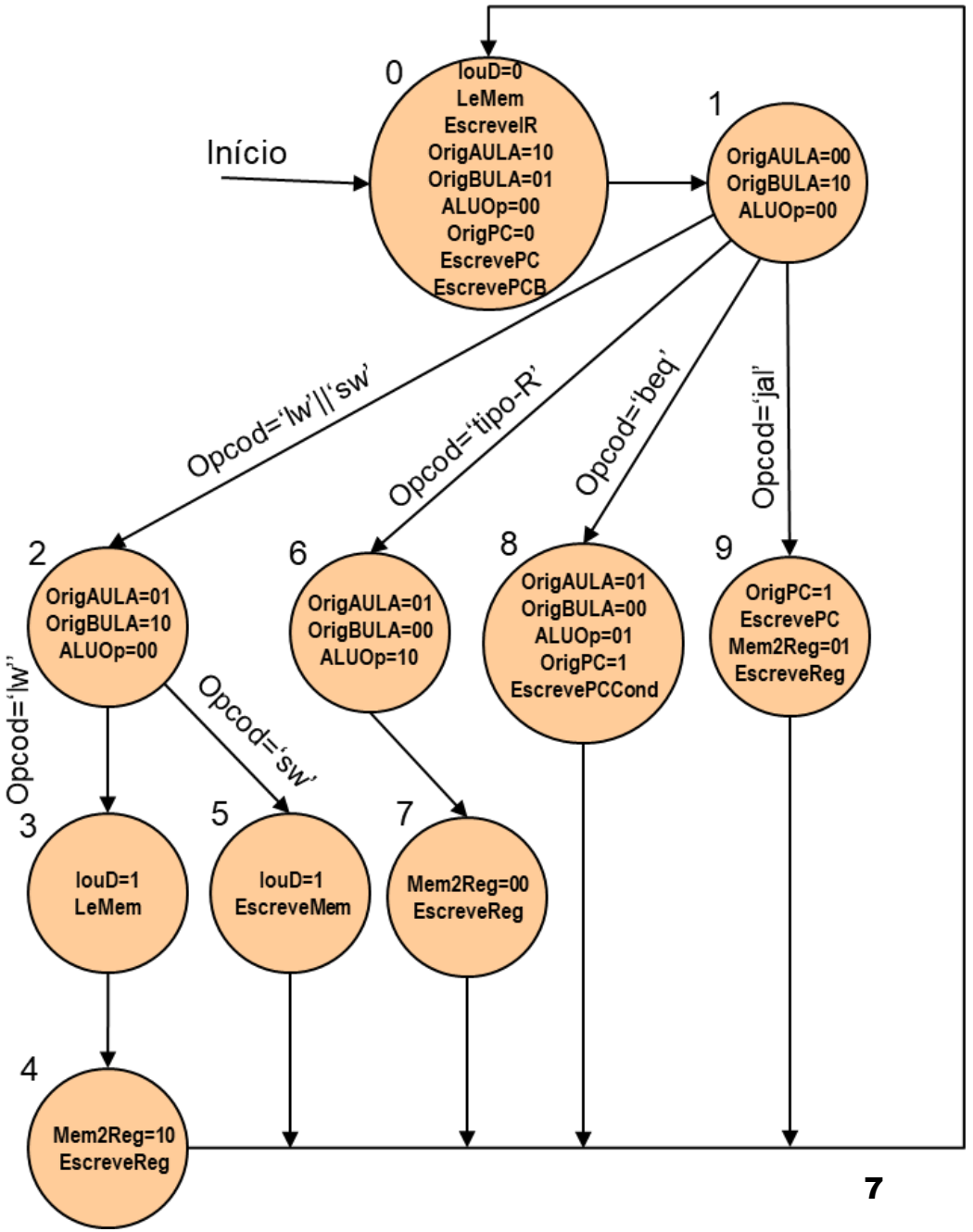
1) Busca da Instrução
2) Decodificação
3) Execução
4) Acesso à Memória e Conclusão Tipo-R
5) Conclusão LW





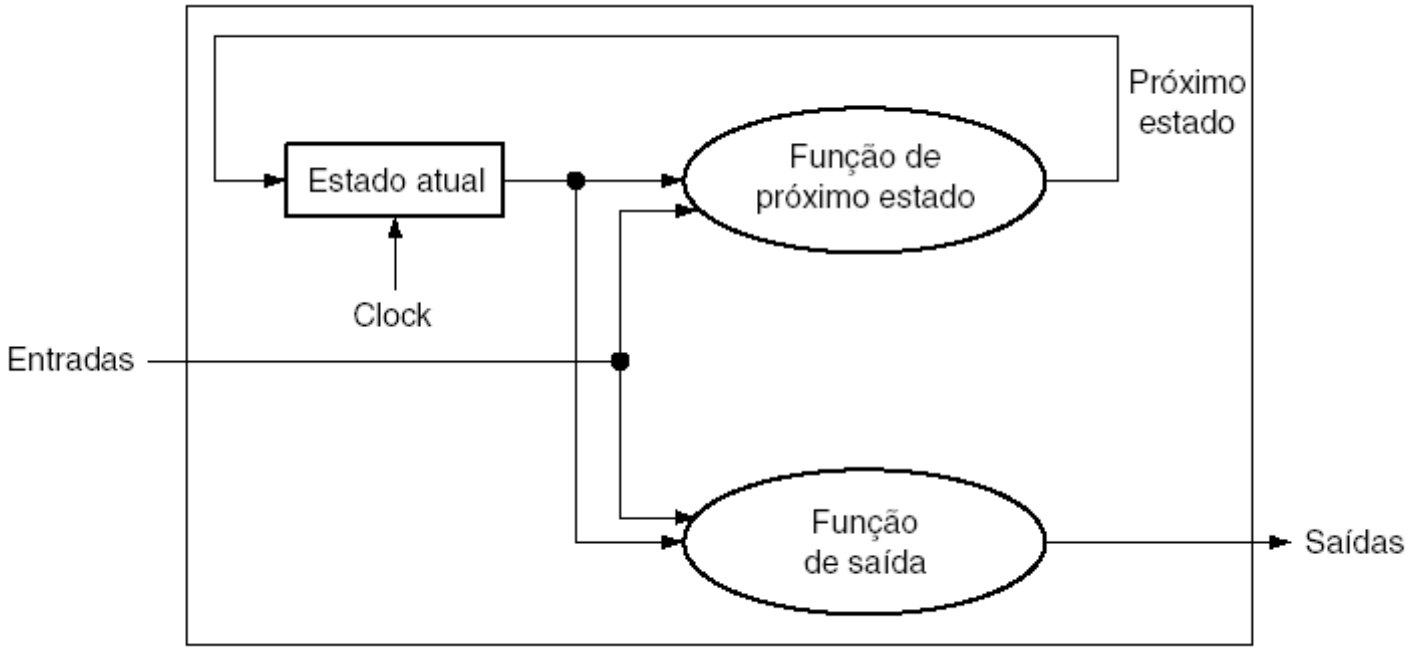


Etapa	Tipo-R	Acesso à Memória	Desvios Condicionais	Desvios Incondicionais
Busca da Instrução	IR<=Mem[PC] PCback<=PC PC<=PC+4			
Decodificação, Leitura dos registradores	A<=Reg[IR[19:15]] B<=Reg[IR[24:20]] SaidaULA<=PCBack+imm			
Execução, cálculo do endereço	SaidaULA<=A *op* B	SaidaULA<=A+imm	Se (A==B) PC<=SaidaULA	Reg[IR[11:7]]<=PC+4 PC<=SaidaULA
Acesso à memória, conclusão tipo-R	Reg[IR[11:7]]<=SaidaULA	Load: MDR<=Mem[SaidaULA] Store: Mem[SaidaULA]<=B		
Conclusão lw		Load: Reg[IR[11:7]]<=MDR		



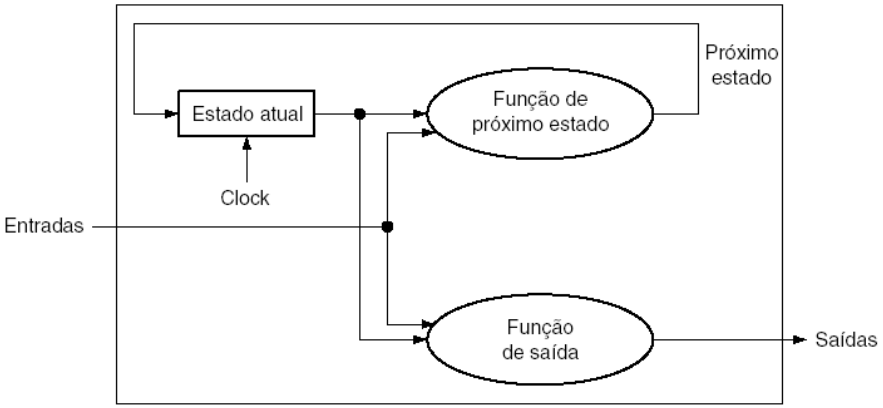
Máquinas de Estados Finitos - Implementação

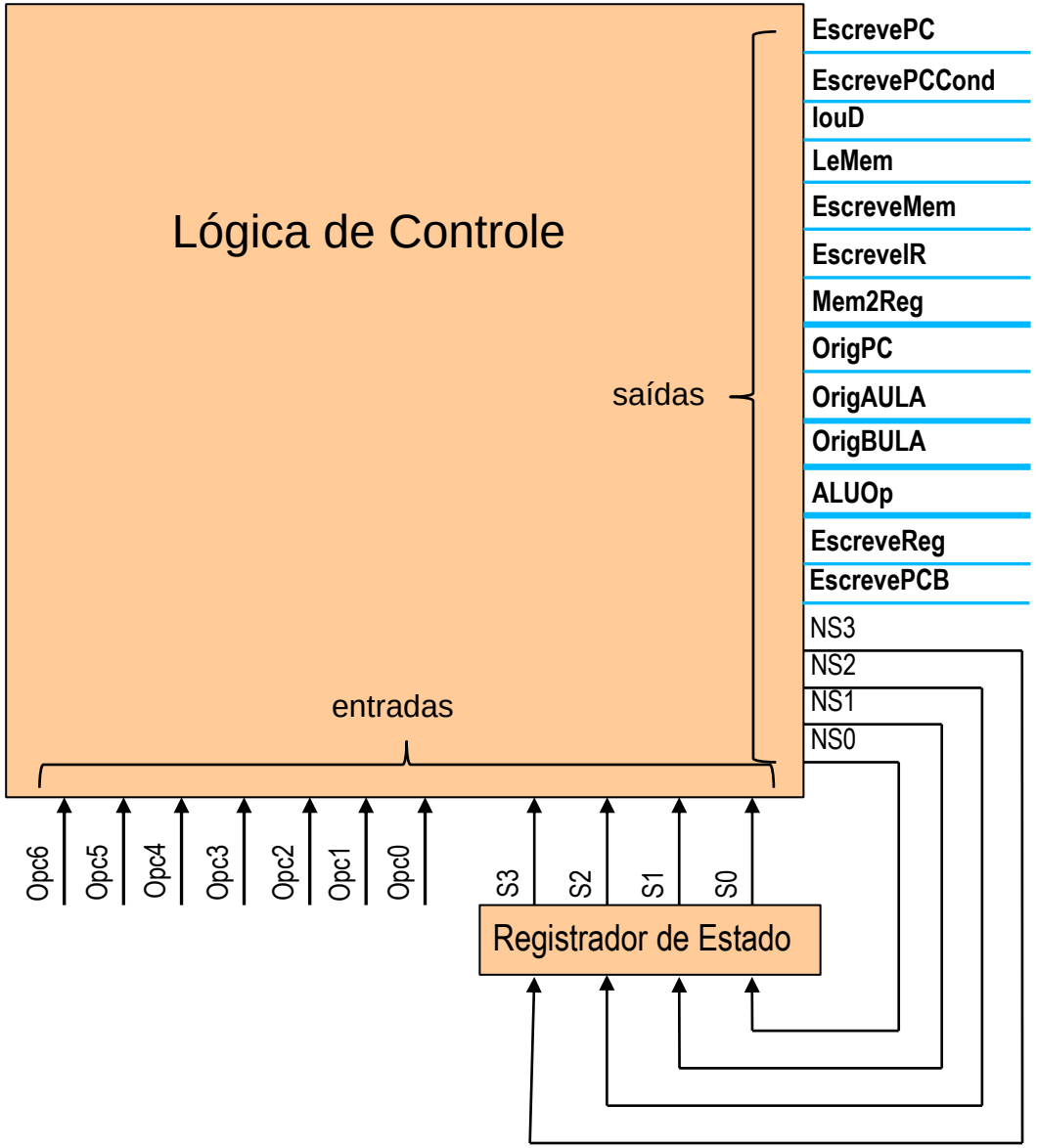
- Conjunto de estados
- Função de próximo estado: Determinada pelo estado atual e entrada
- Saída: Determinada pelo estado atual (Moore) e
  possivelmente pela entrada (Mealy)



Controle do RISC-V com MEF

- estrutura da máquina de estados:
  - lógica de saída
  - lógica de transição
  - registrador de estado
  - entradas externas (código da instrução)



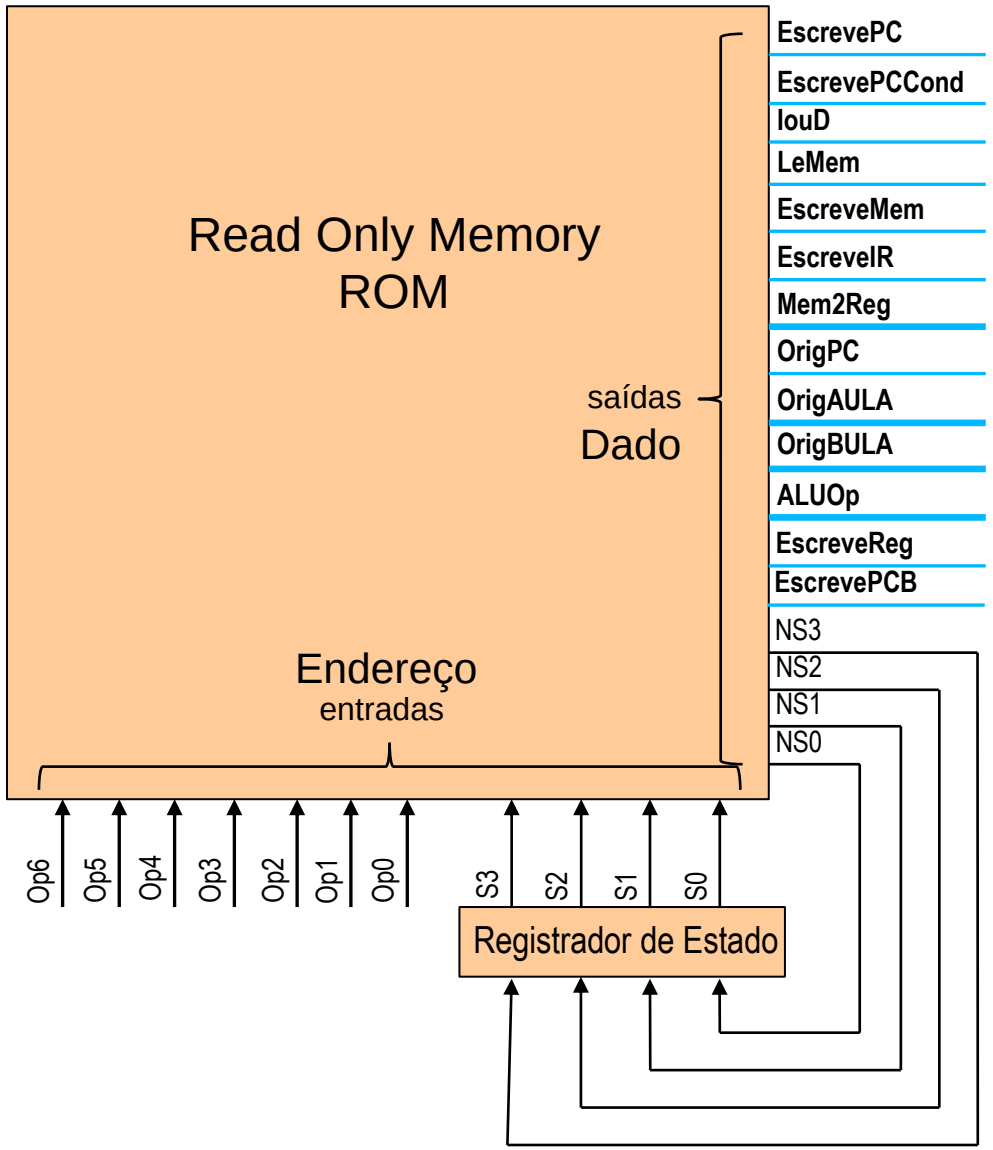


Controle com MEF

- Implementação com ROM
  (*Look Up Table*)
  - Simples!
- Tamanho da memória
  - 11 bits endereço:
    2048 posições de memória
  - 21 bits de dados

  Logo ROM de 42kibits

  Quantas posições de memória são realmente utilizadas?
- Porém, ineficiente



Exemplo do projeto lógico para cada saída na forma soma de produtos

- EscrevePC: Acionado nos estados 0 ou 9

S3	S2	S1	S0
0	0	0	0
1	0	0	1

$$\text{EscrevePC} = \overline{s_3}.\overline{s_2}.\overline{s_1}.\overline{s_0} + s_3.\overline{s_2}.\overline{s_1}.s_0$$

- NS_0: Acionado nos estados 0, 2, 6 ou 1(caso opcode=jal)

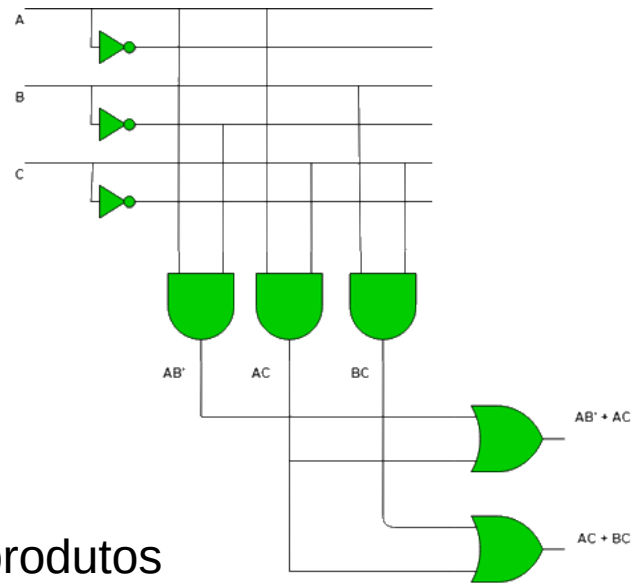
Op6	Op5	Op4	Op3	Op2	Op1	Op0	S3	S2	S1	S0
x	x	x	x	x	x	x	0	0	0	0
x	x	x	x	x	x	x	0	0	1	0
x	x	x	x	x	x	x	0	1	1	0
1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1

$$NS_0 = \overline{s_3}.\overline{s_2}.\overline{s_1}.\overline{s_0} + \overline{s_3}.\overline{s_2}.s_1\overline{s_0} + \overline{s_3}.s_2.s_1\overline{s_0} + Op_6.Op_5.\overline{Op_4}.Op_3.Op_2.Op_1.Op_0.\overline{s_3}.\overline{s_2}.\overline{s_1}.s_0$$

Controle com MEF

- Implementação com PLA

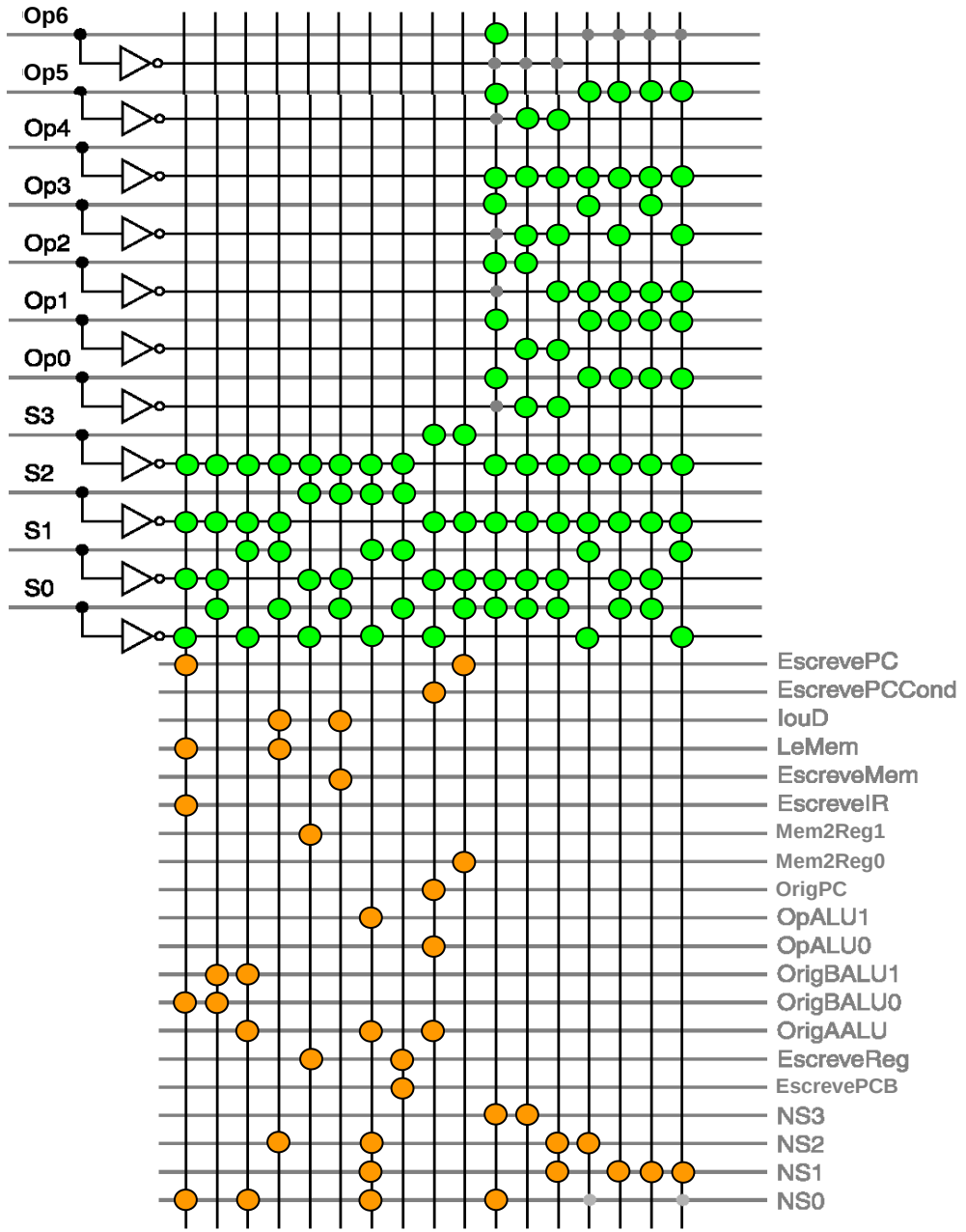
(Programmable Logic Array)



- Mais eficiente:
  - Pode compartilhar termos de produtos
  - Apenas entradas que possuem saídas ativas
  - Pode considerar *don't cares*

Tamanho=(Entradas×N.Prod.)+(Saidas×N.Prod)
Tamanho: (11×17)+(21×17)=544 células

Obs.: Precisa refazer a colocação das bolinhas!!!



Microprogramação

Problemas da MEF:

- O projeto da parte de controle através de diagramas de transição de estados pode rapidamente se tornar inviável se o número de estados for muito grande
- MEF's de processadores complexos (x86 e x64) podem ter milhares de estados

Uma alternativa para projeto é seguir um processo semelhante à programação

Microprogramação

- Uma microinstrução é definida pelos valores dos sinais de controle que atuam na unidade operativa durante um estado da MEF (ESTADO)

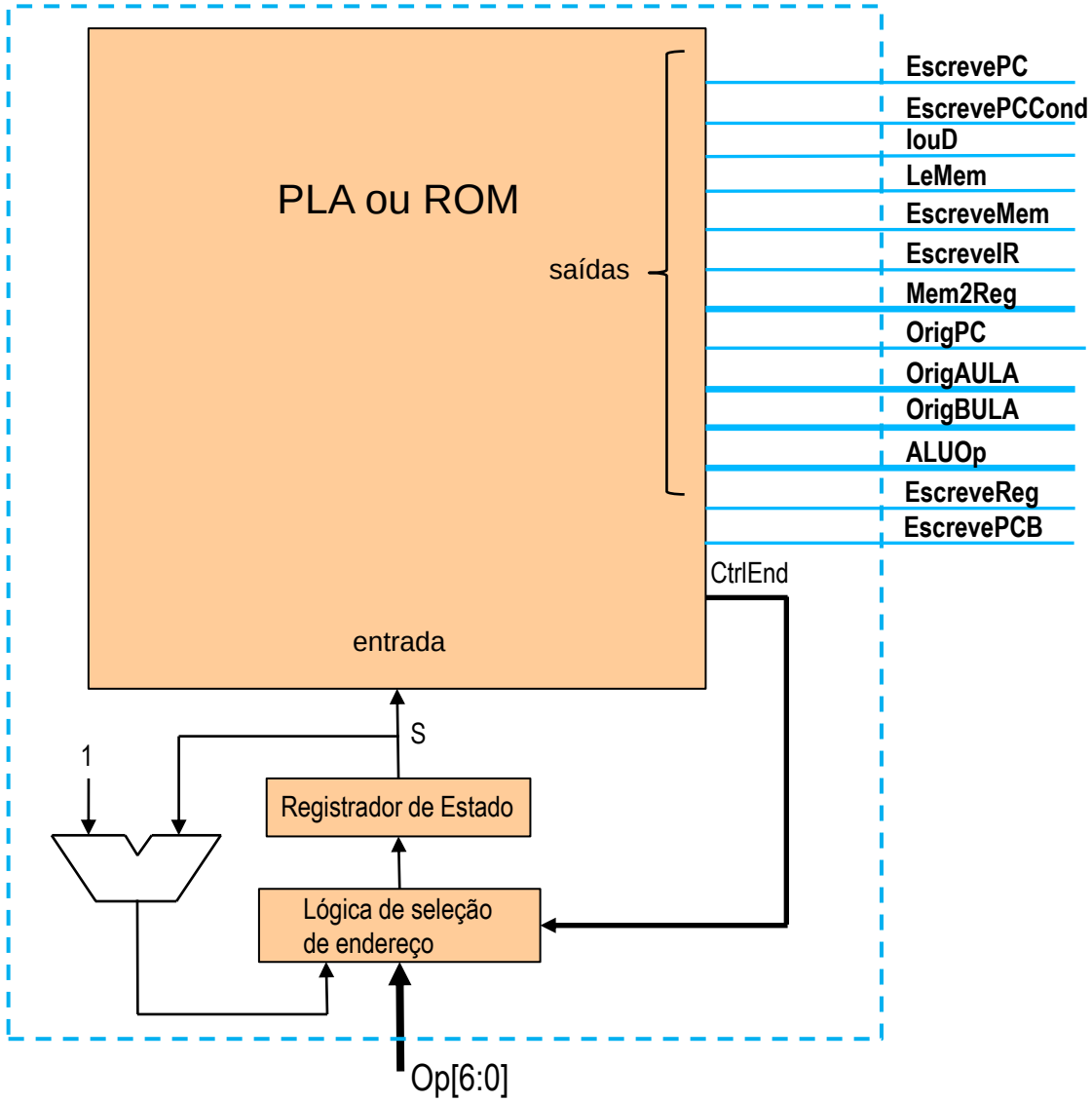
- A execução de uma instrução do processador pode então ser realizada através de uma sequência de microinstruções (TRANSIÇÕES)

- O conjunto de microinstruções que implementa o controle de um processador é chamado de microprograma

  (DIAGRAMA DE ESTADOS)

Estrutura do Sequenciador

Unidade de Controle



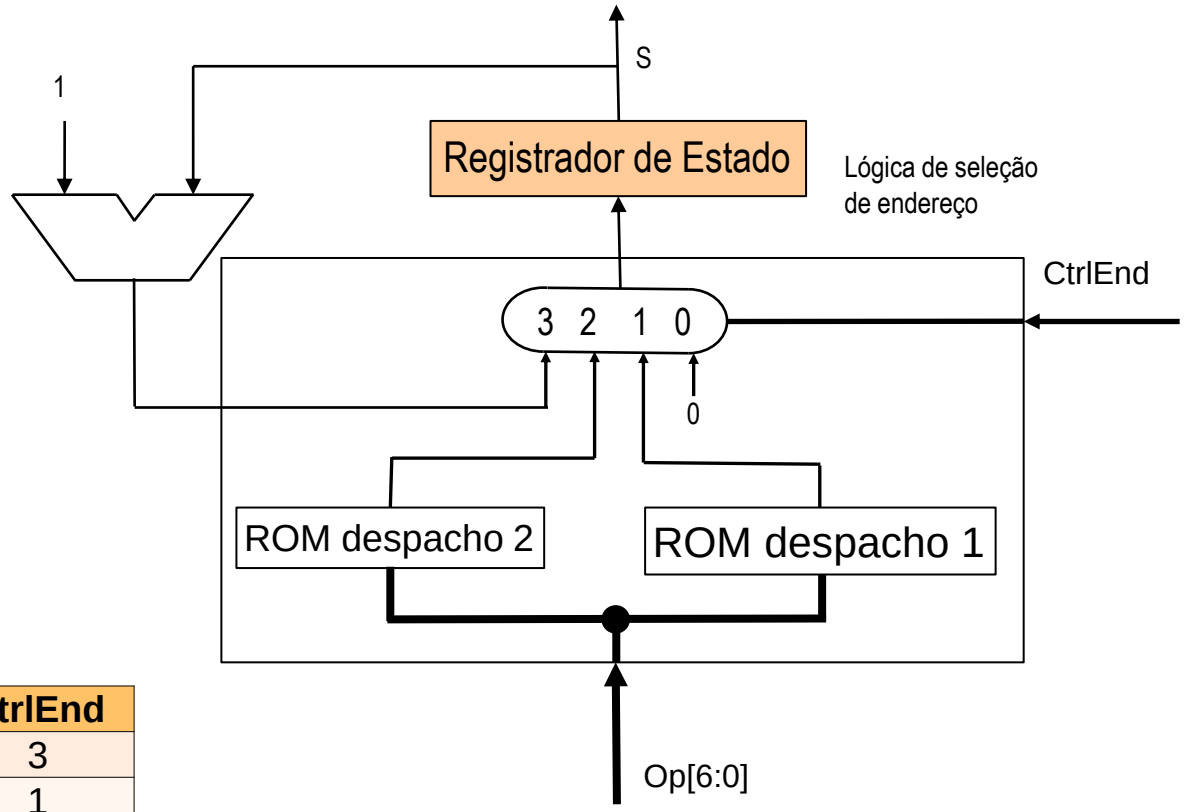
Microprograma

- O sequenciamento das microinstruções é realizado de forma similar a de um programa normal
  - microinstruções são usualmente executadas em sequência → correspondem aos caminhos no diagrama de estados.
  - em alguns casos, a sequência a ser seguida depende de informações externas (código da instrução, flags, exceções, interrupções). Nestes casos, são necessários mecanismos de desvio.

Sequenciamento para o subset do RISC-V

ROM de despacho 1		
Opcode	Instrução	Saída
0110011	Tipo-R	0110
1101111	jal	1001
1100011	beq	1000
0000011	lw	0010
0100011	sw	0010

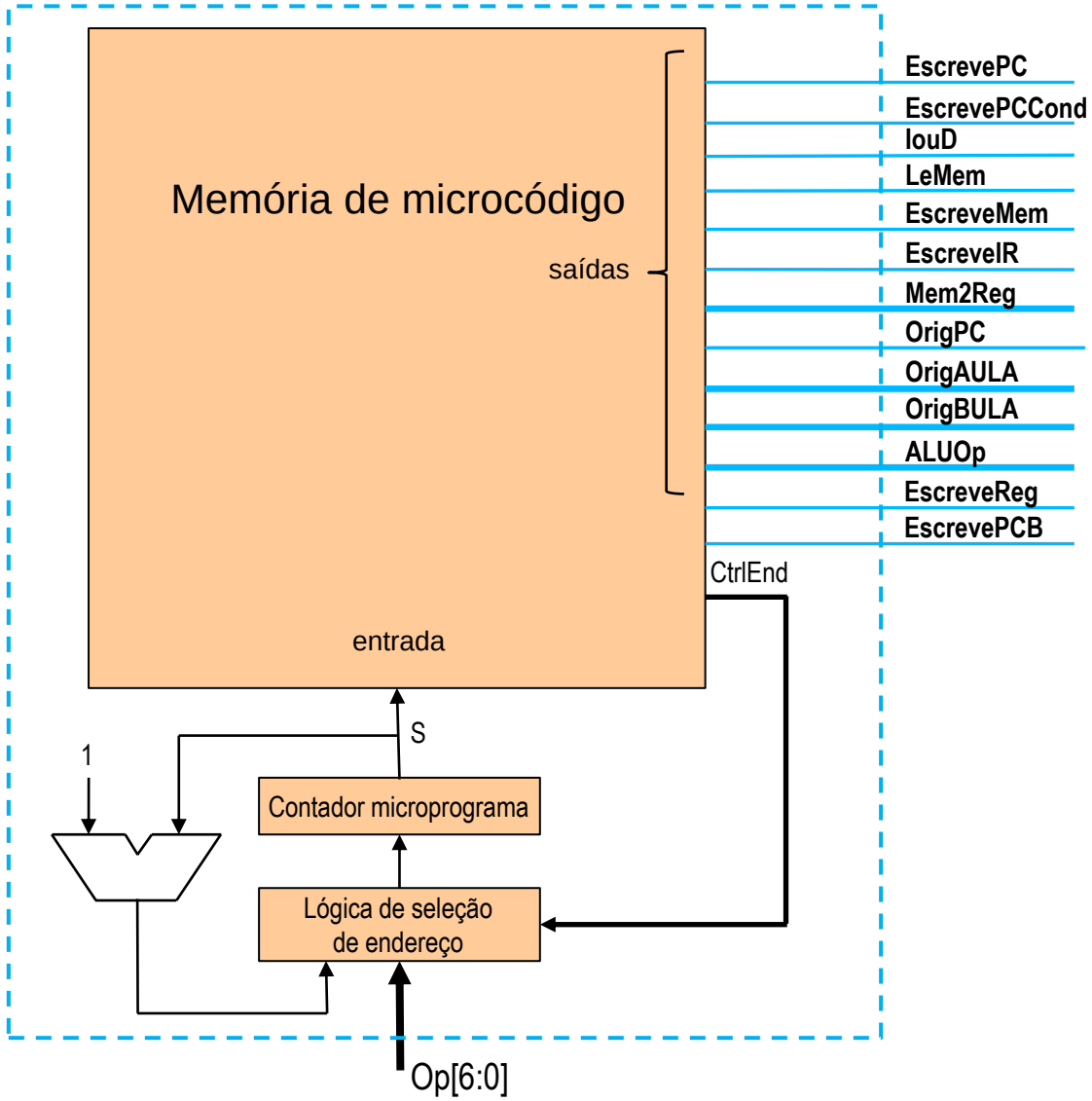
ROM de despacho 2		
Opcode	Instrução	Saída
0000011	lw	0011
0100011	sw	0101



Número do Estado	Ação	CtrlEnd
0	Incrementa	3
1	ROM de despacho 1	1
2	ROM de despacho 2	2
3	Incrementa	3
4	Volta ao início	0
5	Volta ao início	0
6	Incrementa	3
7	Volta ao início	0
8	Volta ao início	0
9	Volta ao início	0

Sequenciador Microcodificado

Unidade de Controle



Formato da Microinstrução

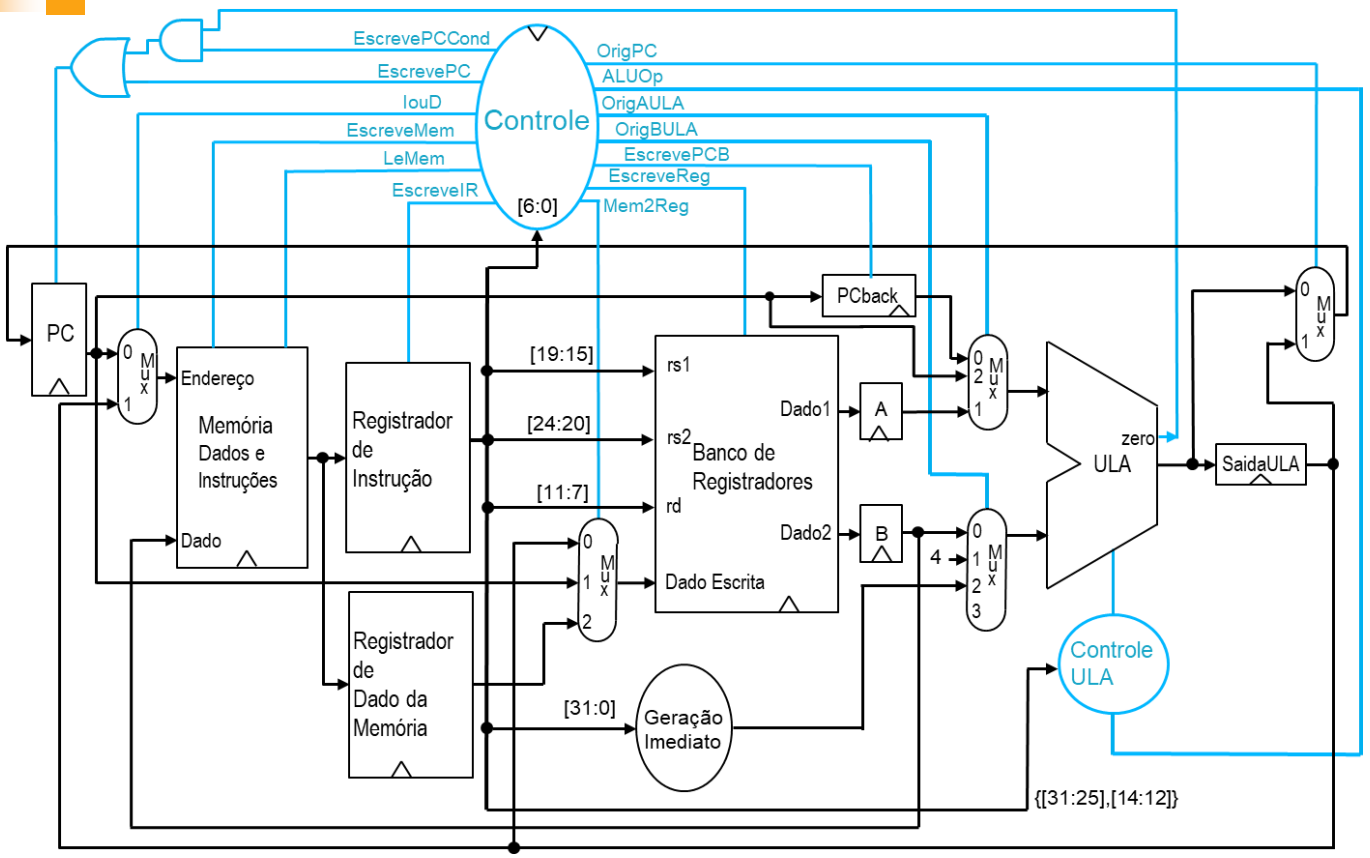
- A microinstrução é dividida em campos que atuam sobre conjuntos de elementos da unidade operativa

- Os campos são escolhidos de acordo com sua finalidade. O controle da ULA, por exemplo, é associado a um campo

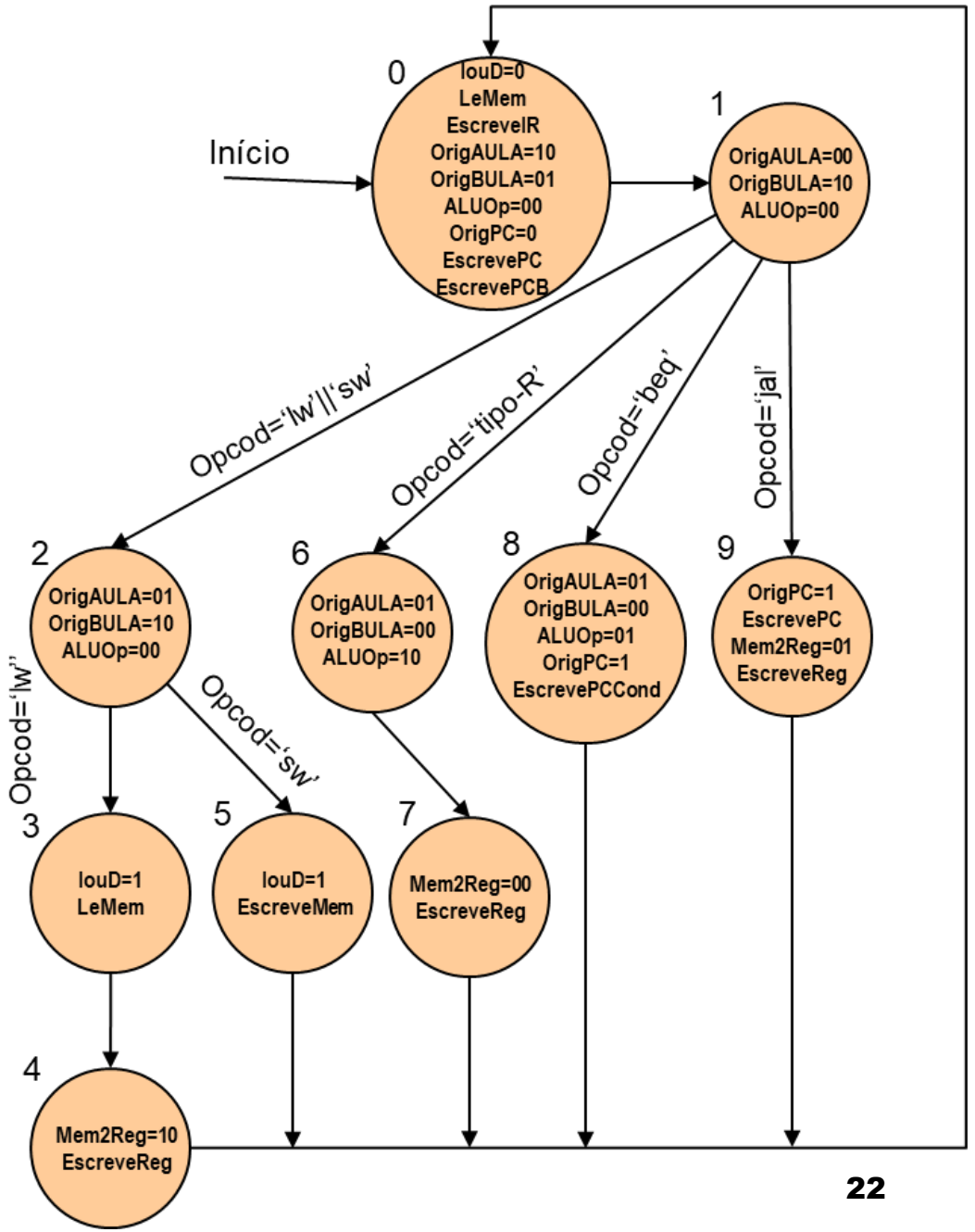
- O microprograma é usualmente implementado em ROM, PLA, EEPROM, FLASH, etc., onde cada microinstrução tem seu próprio endereço

Função dos campos das Microinstruções

Nome do Campo	Função do Campo
Ctrl da ULA	Especifica a operação da ULA no ciclo de *clock*. Resultado é sempre escrito no registrador SaidaULA
Origem A	Especifica o primeiro operando da ULA
Origem B	Especifica o segundo operando da ULA
Ctrl do Banco Regs	Especifica leitura ou escrita no Banco de Registradores, e a origem do valor de escrita
Ctrl da Memória	Especifica leitura ou escrita na Memória.
Ctrl do PC	Especifica a origem do PC
Sequenciação	Especifica com atingir a próxima microinstrução



Etapa	Tipo-R	Acesso à Memória	Desvios Condicionais	Desvios Incondicionais
Busca da Instrução	IR<=Mem[PC] PCback<=PC PC<=PC+4			
Decodificação, Leitura dos registradores	A<=Reg[IR[19:15]] B<=Reg[IR[24:20]] SaidaULA<=PCBack+imm			
Execução, cálculo do endereço	SaidaULA<=A *op* B	SaidaULA<=A+imm	Se (A==B) PC<=SaidaULA	Reg[IR[11:7]]<=PC+4 PC<=SaidaULA
Acesso à memória, conclusão tipo-R	Reg[IR[11:7]]<=SaidaULA	Load: MDR<=Mem[SaidaULA] Store: Mem[SaidaULA]<=B		
Conclusão lw		Load: Reg[IR[11:7]]<=MDR		



ALU Ctrl		ORIG A		ORIG B		BR Ctrl			MEM Ctrl				PC Ctrl				Seq	
OpALU 1	OPALU 0	OrigA 1	OrigA 0	OrigB 1	OrigB 0	Escrev Reg	Mem2 Reg 1	Mem2 Reg 0	EscIR	IouD	Le Mem	Esc Mem	Escrev PCB	Orig PC	Esc PC condic	Escrev PC	CtrlEnd 1	CtrlEnd 0

MicroISA

Nome do Campo	Valor	Sinais Ativos	Comentário
Ctrl ULA	Add	ALUOp=00	ULA faz uma soma
	Sub	ALUOp=01	ULA faz uma subtração
	Funct	ALUOp=10	O campo funct define a operação
OrigA	PC	OrigAULA=10	Primeiro operando é o registrador PC
	A	OrigAULA=01	Primeiro operando vem do Banco de Registradores
	PCBack	OrigAULA=00	Primeiro operando é o registrador PCBack
OrigB	B	OrigBULA=00	Segundo operando vem do Banco de Registradores
	4	OrigBULA=01	Segundo operando é o valor 4
	Imm	OrigBULA=10	Segundo operando vem da unidade Geração de Imediato
Ctrl BR	Read		Le os dois registradores definidos nos campos rs1 e rs2
	WriteULA	Mem2Reg=00 EscreveReg=1	Escreve em rd o valor calculado pela ULA
	WritePC4	Mem2Reg=01 EscreteReg=1	Escreve em rd o valor de PC+4
	WriteMem	Mem2Reg=10 EscreveReg=1	Escreve em rd o valor lido da Memória
Ctrl Mem	ReadInstr	IouD=0 LeMem=1 EscreveIR=1	Lê uma instrução da memória
	ReadData	IouD=1 LeMem=1	Lê um dado da memória
	WriteData	IouD=1 EscreveMem	Escreve um dado na memória
Ctrl PC	PC+4	OrigPC=0 EscrevePC=1 EscrevePCB=1	Escreve PC+4 no PC e salva PC em PCback
	BranchAddress	OrigPC=1 EscrevePCCond=1	Desvio condicional
	JumpAddress	OrigPC=1 EscrevePC=1	Desvio incondicional
Seq	Incr	CtrlEnd=11	Incrementa o estado atual
	Fetch	CtrEnd=00	Volta ao início
	Disp1	CtrlEnd=01	Usa a ROM de despacho1
	Disp2	CtrlEnd=10	Usa a ROM de despacho 2

Microprograma para a Unidade de Controle RISC-V

Endereço	Label	Ctrl ULA	OrigA	OrigB	Ctrl BR	Mem	Ctrl PC	Seq	microcódigo
0x00	Fetch:	Add	PC	4		ReadInstr	PC+4	Incr	0010010001010100111
0x01		Add	PCBack	Imm	Read			Disp1	...
0x02	Mem1:	Add	A	Imm				Disp2	....
0x03	Lw2:					ReadData		Incr	
0x04					WriteMem			Fetch	
0x05	Sw2:					WriteData		Fetch	
0x06	R-Type1:	Funct	A	B				Incr	
0x07					WriteALU			Fetch	
0x08	Beq1:	Sub	A	B			BranchAddress	Fetch	
0x09	Jal1:				WritePC4		JumpAddress	Fetch	

ROM de despacho 1	
Endereço	Conteúdo
0110011	0110
1101111	1001
1100011	1000
0000011	0010
0100011	0010

ROM de despacho 2	
Endereço	Conteúdo
0000011	0011
0100011	0101

Obs.: O microcódigo depende da posição dos sinais nos campos!

Exercício

- Considerando o workload do compilador gcc, qual a CPI média do RISC-V multiciclo implementado?
  - Load: 22% (5 ciclos)
  - Store: 11% (4 ciclos)
  - Operações logico-aritméticas: 49% (4 ciclos)
  - Desvios Condicionais: 16% (3 ciclos)
  - Desvios Incondicionais: 2% (3 ciclos)

$$CPI = 0.22 \times 5 + 0.11 \times 4 + 0.49 \times 4 + 0.16 \times 3 + 0.02 \times 3 = 4.04$$