

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

DCC819 - Arquitetura de Computadores

Relatório V - Pipeline

Iuri Silva Castro
João Mateus de Freitas Veneroso
Ricardo Pagoto Marinho

BELO HORIZONTE - MG
5 DE DEZEMBRO DE 2017

1 Introdução

Este documento descreve a implementação do trabalho prático V da disciplina Organização de Computadores II. O trabalho visou incorporar uma *Pipeline* de três estágios sobre o caminho de dados implementado nos trabalhos anteriores. O processador de 16-bits finalizado faz encaminhamento de dados e gera um ciclo de *stall* ao executar uma instrução de *branch*.

2 Descrição

O *pipeline* é uma técnica de *hardware* para promover paralelismo à nível de instrução dentro de um único processador. O objetivo da técnica é manter todas os módulos do processador ocupados com alguma instrução pelo máximo de tempo possível. Esse objetivo é realizado por meio da divisão das instruções em múltiplas etapas sequenciais, de forma que diferentes etapas de diferentes instruções possam ser executadas em paralelo como em uma linha de montagem. Essa técnica permite aumentar consideravelmente a velocidade do processador em comparação à execução puramente sequencial, pois várias tarefas podem ser executadas em um mesmo ciclo de *clock*.

No entanto, a técnica de *Pipelining* complexifica o controle do processador, uma vez que a execução paralela introduz *Hazards* no caminho de dados que não existiriam no caso da execução sequencial:

- *Hazards Estruturais* impõem restrições no número de instruções que podem utilizar um módulo do processador ao mesmo tempo. No caso do nosso processador, o caminho de dados possui uma única via, portanto existe apenas um módulo para executar cada etapa da *pipeline*, com exceção da etapa de execução que possui uma Unidade Lógica Aritmética e uma Unidade Multiplicadora.
- *Hazards de Dados* forçam que uma instrução dependente de dados de instruções anteriores espere até que os resultados estejam disponíveis antes de ser executada. Caso não haja encaminhamento de dados, o processador é forçado a paralisar a execução de novas instruções por meio de *stalls* até que o dado esteja disponível. Nosso processador implementa o encaminhamento de dados da saída da unidade multiplicadora e da Unidade Lógica Aritmética para evitar o *stall*.
- *Hazards de Controle* acontecem quando existe um desvio de fluxo que altera o *Program Counter* e torna a próxima execução indefinida até que o processador avalie o novo valor do *Program Counter*. Nosso processador introduz um *stall* nos *branches* com o intuito de terminar a avaliação do *Program Counter* antes de prosseguir com a execução da próxima instrução.

O processador desenvolvido até o trabalho prático IV executava instruções de maneira sequencial. Com a introdução do *Pipeline* neste trabalho, obtivemos ganhos significativos na velocidade de execução como será mostrado na seção de experimentos.

3 Implementação

O processador finalizado conta com quatro módulos principais, além de uma série de módulos de controle secundários e multiplexadores. Os módulos principais são:

- *Decoder*: recebe a instrução de 16 bits e decodifica o *Opcode*, identificando os operandos e preparando os registradores que sinalizam se a instrução é uma multiplicação, se é um *Jump*, se haverá *Stall*, se haverá *Write Back*, qual registrador da multiplicação será armazenado se for o caso e se o segundo operando é um imediato.

- *Register Bank*: o banco de registradores conta com 16 registradores de 16 bits, duas portas de leituras para os operandos A e B e uma porta de escrita.
- *Unidade Lógica Aritmética*: a unidade lógica aritmética executa as instruções: ADD, SUB, SLT, AND, OR, XOR e BEZ.
- *Unidade multiplicadora*: a unidade multiplicadora recebe dois operandos de 16-bits e executa uma multiplicação produzindo um resultado de 32-bits que é armazenado em dois registradores: HI, que armazena os 16-bits mais significativos e LO, que armazena os 16-bits menos significativos. O resultado da operação armazenado nos registradores pode ser acessado por meio das instruções GHI e GLO, que escrevem o conteúdo dos registradores HI e LO, respectivamente, em um registrador do banco de registradores.

Instrução	Opcode	Bits 11-8	Bits 7-4	Bits 3-0	Descrição
ADD	0000	C	B	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) + \text{Reg}(B)$
SUB	0001	C	B	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) - \text{Reg}(B)$
SLTI	0010	C	Imm	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) > \text{Imm}$
AND	0011	C	B	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) \text{ AND } \text{Reg}(B)$
OR	0100	C	B	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) \text{ OR } \text{Reg}(B)$
XOR	0101	C	B	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) \text{ XOR } \text{Reg}(B)$
ANDI	0110	C	Imm	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) \text{ AND } \text{Imm}$
ORI	0111	C	Imm	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) \text{ OR } \text{Imm}$
XORI	1000	C	Imm	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) \text{ XOR } \text{Imm}$
ADDI	1001	C	Imm	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) + \text{Imm}$
SUBI	1010	C	Imm	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) - \text{Imm}$
J	1011	Imm			$\text{PC} = \text{Imm}$
BEZ	1100	0000	B	A	If $(\text{Reg}(A) = 0)$ $\text{PC} = \text{Reg}(B)$
MUL	1101	C	B	A	$\text{Reg}(C) = \text{Reg}(A) * \text{Reg}(B)$
GHI	1110	C	0000	0000	$\text{Reg}(C) = \text{HI}$
GLO	1111	C	0000	0000	$\text{Reg}(C) = \text{LO}$

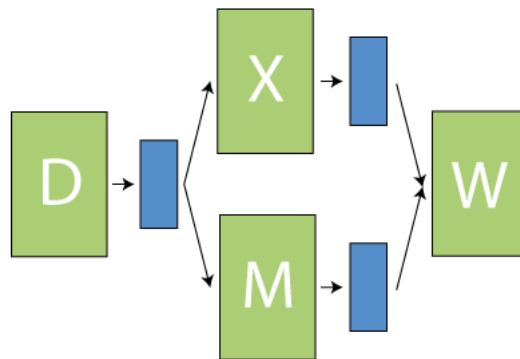
Tabela 1: Instruções

O conjunto de instruções final do processador está descrito na tabela 1. Todas as instruções aritméticas e lógicas recebem o operando A do banco de registradores e o operando B pode ser um imediato de 4-bits ou um registrador dependendo da instrução. A instrução BEZ não utiliza os bits 11-8 e as instruções GHI e GLO não utilizam os bits de 7-0. A instrução J altera o PC para um valor imediato de 12-bits que comporta qualquer endereço da memória de 4096 posições.

4 Integração

A pipeline implementada possui três estágios: Decodificação, Execução e *Write Back*. O estágio de execução é dividido entre dois módulos independentes: o módulo de multiplicação e a Unidade Lógica Aritmética. O diagrama na figura 1 descreve a *pipeline*.

Cada um dos estágios da *pipeline* tem uma máquina de estados associada que executa as operações necessárias em múltiplos ciclos de *clock*. Ao fim de cada estágio, cada módulo define os valores de um conjunto de registradores que passa os dados para o próximo estágio por meio de um *buffer*. Na nossa implementação existem dois *buffers*: Decode/Execute e Execute/Write Back.

Figura 1. Diagrama da *pipeline*

O estágio *Decoder* (D) recebe a próxima instrução da memória de instruções e define os valores dos registradores a seguir com base no *Opcode* da instrução, atualizando o *buffer* Decode/Execute:

- OpULA: o opcode da instrução para a ULA com 4-bits que indica a operação aritmética a ser realizada. Por exemplo: ADDI e ADD tem o mesmo OpULA.
- OpA, OpB, OpC: os operandos A, B e C.
- IsImm: indica se o segundo operando da instrução é um imediato.
- IsJump: indica se a instrução é um *Jump* (J).
- HasWB: indica se a instrução faz *Write Back*.
- HasStall: indica se a instrução gera *Stall*.
- IsMult: indica se a instrução vai utilizar a unidade multiplicadora.
- HiLo: indica qual registrador da multiplicação vai ser armazenado.
- StoreHiLo: indica que vai armazenar um registrador da unidade multiplicadora.
- AddrImm: endereço de memória de 12-bits para o *Jump*.

O estágio *Execução* (X e M) pode ocorrer em dois módulos separados: a ULA e a unidade multiplicadora. As entradas dos módulos são os registradores de saída da etapa anterior descritos acima. O resultado da ULA é armazenado no registrador Res e as flags da operação são armazenadas no registrador FlagReg. Já a unidade de multiplicação produz um resultado que é armazenado nos registradores Hi e Lo de 16-bits. O *buffer* Execute/Write Back conta com os seguintes registradores:

- Res: indica o resultado da operação na ULA ou os registradores Hi ou Lo da unidade multiplicadora.
- FlagReg: indica as flags da ULA.
- RegDest: indica o registrador de destino da operação de *Write Back*.
- HasWB: indica se o *Write Back* vai ser executado.

- AddrImm: indica o endereço do imediato da operação *Jump* (J).
- HasJumped: indica se um *Jump* foi executado.
- HasStall: indica se houve *Stall*.

Um multiplexador redireciona a saída da ULA e da unidade multiplexadora para o estágio de *WriteBack*. Perceba que a operação de multiplicação não passa efetivamente pelo estágio de *WriteBack* uma vez que o resultado da operação fica armazenado apenas nos registradores Hi e Lo, que podem ser escritos no banco de registradores por meio da execução de mais duas instruções: GHI e GLO.

5 Simulação e Testes

Os testes realizados procuraram medir a melhora de desempenho após a implementação da *pipeline*. Para isso, um programa de teste foi executado no processador antigo sem *pipeline* e no processador novo com a *pipeline* de três estágios. Perceba que a ordem dos operandos está invertida no *Assembly*. Isso ocorre porque no nosso processador o operando 2, que pode ser um imediato, é o operando referente aos bits 7-4 da instrução e não 3-0. Portanto, o código foi alterado para refletir a característica das instruções armazenadas na memória.

ADDI R1, 8, R0	R1 = 8
ADDI R2, 8, R0	R2 = 8
MUL -, R2, R1	$R1 * R2 = 64$
GLO R1, -, -	R1 = 64.
ADDI R2, 15, R0	R2 = 15.
ADDI R2, 1, R2	$R2 = 15 + 1.$
MUL -, R1, R2	$R1 * R2 = 1024.$
GLO R1, -, -	R1 = 1024.
ADDI R2, 10, R0	R2 = 10.
MUL -, R2, R2	$R2 * R2 = 100.$
GLO R2, -, -	R2 = 100.
ADDI R3, 0, R1	$R3 = R1 = 1024.$
ADDI R4, 0, R0	R4 = 0.
ADDI R6, 15, R0	R6 = 15.
ADDI R6, 8, R6	R6 = 23.
ADDI R4, 1, R4	$R4 = R4 + 1$
SUB R3, R2, R3	$R3 = R3 - R2.$
SLTI R5, 9, R4	$R5 = R4 > 9$
BEZ -, R6, R5	If (R5 == 0) jump to #R6

Tabela 2. Programa de teste

O programa de teste realiza a divisão de 1024 por 100, calculando o resto por meio de um loop e armazenando o resultado no registrador R3. O programa está descrito na tabela 2.

A figura XXX mostra o resultado da simulação no processador antigo e a figura YYY mostra o resultado da simulação no processador novo. Como percebemos pelos resultados, o processador novo executou o programa em Y *clocks* e o processador antigo executou o programa em X *clocks*. Portanto, a *pipeline* obteve uma melhora de 99% nesse caso específico.

Além deste, fizemos um programa para ordenar um vetor de 5 valores. O código do programa está descrito a seguir. Para melhor visualização e entendimento do código, ele foi dividido em blocos de 12 instruções. Os blocos são equivalentes, o que muda são os valores dos registradores.

O vetor está armazenado nos registradores R11 a R15. A cada bloco, o valor de um registrador é trocado com outro caso o seguinte seja menor do que ele. As trocas começam no registrador R11 (R11) e vão até o R14 (R14). No R11, primeiro verificamos se o valor de R12 é menor do que o dele, caso seja, troca os valores. Então o mesmo processo é feito com o R13, R14 e R15. Depois de finalizada as comparações do R11, olhamos para o R12 e fazemos o mesmo processo, *i.e.*, comparamos primeiro com o R13, depois com o R14 e por último com o R15. Este processo se repete até fazermos a última comparação de R14 e R15. Após isso, o vetor está ordenado.

Devido ao limitado número de instruções disponíveis, algumas adaptações precisaram ser feitas. A primeira é que não existe comparação de valores de registradores, logo para fazer isso, os valores a serem comparados são armazenados nos registradores R1 e R2. Para saber se devemos trocar, fazemos a subtração desses valores e armazenamos em R3. A partir daí, devemos saber se o número é positivo ou negativo. Caso seja positivo, $R2 > R1$ e a troca não deve acontecer. Caso negativo, $R2 < R1$ e a troca deve ocorrer. Porém, a instrução de comparação SLTI não funciona com valores negativos, logo não podemos simplesmente comparar o valor de R3 com 0. Para isso, utilizamos o registrador R9 que em seu bit mais significativo possui o valor 1 e nos demais o valor 0. Com este registrador, fazemos um AND entre R9 e R3, dessa forma, sabemos o sinal de R3. Agora podemos comparar R3 com 0 e descobrir se o resultado é positivo ou negativo. Repare que caso $R3 = 1$, a subtração foi negativa, logo a troca deve ocorrer. A decisão de se devemos ou não trocar os valores é armazenada em R4 que é utilizado em um *branch*. Se $R4 = 0$, então $R3 = 0$ e a troca não deve ocorrer, logo o *branch* deve ser tomado.

Para realizar a troca, utilizamos o próprio R3 como registrador auxiliar. Se o *branch* precisar ser tomado, o programa pula para o valor armazenado em R8. Para encontrar o valor de R8, utilizamos 3 registradores: R5, R6 e R7. R5 armazena em qual bloco de 13 instruções estamos: no primeiro ele recebe o valor 1 e é incrementado em 1 a cada início de bloco. R6 armazena a multiplicação de R5 e R7, cujo valor é 13 (tamanho do bloco de instruções). Por fim, R8 pega os bits menos significativos da multiplicação e descobre para qual endereço deve pular caso necessário.

```

1 ADDI R5,1,R0
2 ADDI R7,13,R0
3 MULL R6,R5,R7
4 GLO R8,-,-
5 ADD R1,R11,R0
6 ADD R2,R12,R0
7 SUB R3,R1,R2
8 AND R3,R9,R3
9 SLTI R4,0,R3
10 BEZ -,R8,R4
11 ADD R3,R11,R0
12 ADD R11,R12,R0
13 ADD R12,R3,R0
14 # 2
15 ADDI R5,1,R5
16 ADDI R7,13,R0
17 MULL R6,R5,R7
18 GLO R8,-,-
19 ADD R1,R11,R0
20 ADD R2,R13,R0
21 SUB R3,R1,R2
22 AND R3,R9,R3
23 SLTI R4,0,R3
24 BEZ -,R8,R4
25 ADD R3,R11,R0
26 ADD R11,R13,R0
27 ADD R13,R3,R0

```

```
28 # 3
29 ADDI R5,1,R5
30 ADDI R7,13,R0
31 MULL R6,R5,R7
32 GLO R8,-,-
33 ADD R1,R11,R0
34 ADD R2,R14,R0
35 SUB R3,R1,R2
36 AND R3,R9,R3
37 SLTI R4,0,R3
38 BEZ -,R8,R4
39 ADD R3,R11,R0
40 ADD R11,R14,R0
41 ADD R14,R3,R0
42 # 4
43 ADDI R5,1,R5
44 ADDI R7,13,R0
45 MULL R6,R5,R7
46 GLO R8,-,-
47 ADD R1,R11,R0
48 ADD R2,R15,R0
49 SUB R3,R1,R2
50 AND R3,R9,R3
51 SLTI R4,0,R3
52 BEZ -,R8,R4
53 ADD R3,R11,R0
54 ADD R11,R15,R0
55 ADD R15,R3,R0
56 ##### 5
57 ADDI R5,1,R5
58 ADDI R7,13,R0
59 MULL R6,R5,R7
60 GLO R8,-,-
61 ADD R1,R12,R0
62 ADD R2,R13,R0
63 SUB R3,R1,R2
64 AND R3,R9,R3
65 SLTI R4,0,R3
66 BEZ -,R8,R4
67 ADD R3,R12,R0
68 ADD R12,R13,R0
69 ADD R13,R3,R0
70 # 6
71 ADDI R5,1,R5
72 ADDI R7,13,R0
73 MULL R6,R5,R7
74 GLO R8,-,-
75 ADD R1,R12,R0
76 ADD R2,R14,R0
77 SUB R3,R1,R2
78 AND R3,R9,R3
79 SLTI R4,0,R3
80 BEZ -,R8,R4
81 ADD R3,R12,R0
82 ADD R12,R14,R0
83 ADD R14,R3,R0
84 # 7
85 ADDI R5,1,R5
86 ADDI R7,13,R0
87 MULL R6,R5,R7
88 GLO R8,-,-
89 ADD R1,R12,R0
90 ADD R2,R15,R0
```

```

91 SUB R3,R1,R2
92 AND R3,R9,R3
93 SLTI R4,0,R3
94 BEZ -,R8,R4
95 ADD R3,R12,R0
96 ADD R12,R15,R0
97 ADD R15,R3,R0
98 ##### 8
99 ADDI R5,1,R5
100 ADDI R7,13,R0
101 MULL R6,R5,R7
102 GLO R8,-,-
103 ADD R1,R13,R0
104 ADD R2,R14,R0
105 SUB R3,R1,R2
106 AND R3,R9,R3
107 SLTI R4,0,R3
108 BEZ -,R8,R4
109 ADD R3,R13,R0
110 ADD R13,R14,R0
111 ADD R14,R3,R0
112 # 9
113 ADDI R5,1,R5
114 ADDI R7,13,R0
115 MULL R6,R5,R7
116 GLO R8,-,-
117 ADD R1,R13,R0
118 ADD R2,R15,R0
119 SUB R3,R1,R2
120 AND R3,R9,R3
121 SLTI R4,0,R3
122 BEZ -,R8,R4
123 ADD R3,R13,R0
124 ADD R13,R15,R0
125 ADD R15,R3,R0
126 ##### 10
127 ADDI R5,1,R5
128 ADDI R7,13,R0
129 MULL R6,R5,R7
130 GLO R8,-,-
131 ADD R1,R14,R0
132 ADD R2,R15,R0
133 SUB R3,R1,R2
134 AND R3,R9,R3
135 SLTI R4,0,R3
136 BEZ -,R8,R4
137 ADD R3,R14,R0
138 ADD R14,R15,R0
139 ADD R15,R3,R0

```

A Figura 2 mostra como o vetor está distribuído nos registradores:

- R11 = 4
- R12 = 3
- R13 = 2
- R14 = 5
- R15 = 1

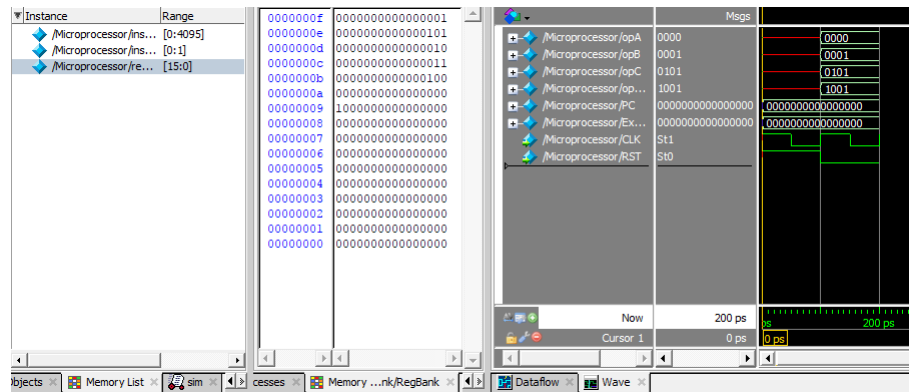


Figura 2. Início da ordenação

Repare que R9 possui o bit mais significativo com valor 1 e os outros bits 0, como dito anteriormente. A Figura 3 mostra o fim da simulação. Note que o vetor está ordenado e que a simulação terminou com 28300 ps.

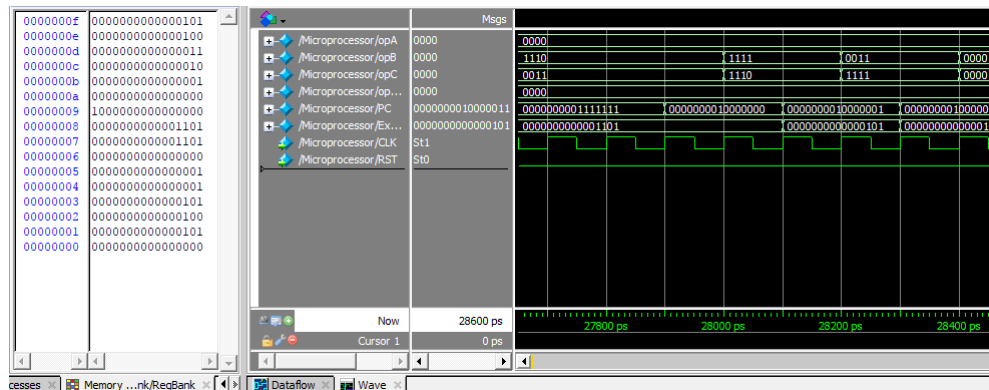


Figura 3. Fim da ordenação

6 Conclusão

A incorporação da *pipeline* de três estágios exigiu a introdução de *buffers* e unidades de controle adicionais no processador, complexificando consideravelmente o projeto. Os *branches* exigiram a introdução de um ciclo de *stall* para esperar pelo novo *Program Counter*, o que limitou os ganhos de velocidade de execução. A lógica de encaminhamento foi implementada para evitar *stalls* devido à *Hazards de dados*. Ao final, o ganho de desempenho obtido foi de cerca de 99% no cenário de teste, o que mostra claramente a importância dos *pipelines* em processadores de alto desempenho.