

Programando o computador IAS

Prof. Edson Borin e Rafael Auler

29 de agosto de 2016

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 2 | O Surgimento do Computador do IAS | 2 |
| 2.1 | Exercícios | 3 |
| 3 | Organização do Computador do IAS | 4 |
| 3.1 | Memória Principal | 5 |
| 3.2 | Unidade de Controle | 5 |
| 3.3 | Unidade Lógica e Aritmética | 7 |
| 3.4 | Exercícios | 8 |
| 4 | Operação do Computador do IAS | 10 |
| 4.1 | Escrita e Leitura na Memória Principal | 10 |
| 4.2 | Execução de Instruções | 12 |
| 4.3 | Exercícios | 16 |
| 5 | Programando o Computador do IAS | 17 |
| 5.1 | Instruções de Transferência de Dados | 17 |
| 5.2 | Instruções Aritméticas | 19 |
| 5.3 | Instruções de Salto | 24 |
| 5.4 | Instruções de Modificação de Endereço | 27 |
| 5.5 | Exercícios | 30 |
| 6 | Linguagem de Montagem do IAS | 32 |
| 6.1 | A diretiva <code>.org</code> | 33 |
| 6.2 | A diretiva <code>.word</code> | 33 |
| 6.3 | Rótulos | 34 |
| 6.4 | A diretiva <code>.align</code> | 36 |
| 6.5 | A diretiva <code>.wfill</code> | 38 |
| 6.6 | A diretiva <code>.set</code> | 39 |
| 6.7 | Exercícios | 40 |
| A | Lista de instruções do IAS | 44 |

Capítulo 1

Introdução

O computador do IAS foi um dos primeiros computadores a implementar o “conceito do programa armazenado”. Neste paradigma, o programa é armazenado na memória do computador juntamente com os dados. Desta forma, a geração e a carga de programas pode ser feita de forma automatizada, pelo próprio computador. O computador do IAS foi desenvolvido no Instituto de Estudos Avançados de Princeton e sua construção foi liderada por John von Neumann, um matemático que contribuiu bastante para o campo da ciência da computação.

Esta parte do texto apresenta uma breve descrição histórica do surgimento do computador do IAS, a organização e o funcionamento do computador do IAS assim como suas instruções e uma breve introdução à sua programação.

O Capítulo 2 apresenta o cenário histórico na época do surgimento do computador do IAS e a motivação para construção do mesmo. O Capítulo 3 apresenta a organização geral e o Capítulo 4 descreve o funcionamento do computador do IAS. O Capítulo 5 descreve as instruções e apresenta uma breve introdução à programação do computador do IAS e o Capítulo 6 apresenta uma linguagem de montagem para o computador do IAS.

Capítulo 2

O Surgimento do Computador do IAS

Durante a segunda guerra mundial, o laboratório de pesquisa de balística do exército dos Estados Unidos da América financiou a construção do ENIAC, um computador eletrônico para auxiliar na computação de tabelas para o disparo de artilharia. Terminado em 1946, o ENIAC não ficou pronto a tempo de ser utilizado na guerra, mas por ser um computador programável, foi utilizado por muitos anos para outros propósitos, até sua desativação em 1955. O ENIAC é considerado por muitos¹ o primeiro computador eletrônico de propósito geral.

Durante o projeto do ENIAC, seus desenvolvedores observaram que diversos itens do projeto original poderiam ser melhorados. No entanto, para manter o cronograma do projeto, as novas ideias não foram incorporadas ao projeto do ENIAC. Com o intuito de desenvolver um computador melhor, que incorporasse as melhorias propostas pela equipe, os desenvolvedores do ENIAC começaram a discutir o projeto de um novo computador, o EDVAC.

A programação do ENIAC era feita através de cabos e interruptores, o que tornava a programação um processo lento e tedioso. Uma das melhoras que não puderam ser incorporadas ao projeto original do ENIAC foi o “conceito do programa armazenado”, em que o programa é armazenado na memória, junto com os dados. A invenção deste conceito, presente em todos os computadores de propósito geral atuais, foi creditada ao matemático John von Neumann, membro do Instituto de Estudos Avançados de Princeton, o IAS², que trabalhava como consultor no projeto do EDVAC. Durante este tempo, ele escreveu um rascunho com anotações das reuniões do projeto, que foi distribuído por um dos membros da equipe para diversas universidades e órgãos do governo. Como o manuscrito tinha apenas o nome de John von Neumann, ele foi creditado como sendo o inventor do conceito do programa armazenado.

Após a sua participação no projeto do EDVAC, von Neumann voltou para o

¹Não há um consenso sobre qual foi o primeiro computador eletrônico de propósito geral.

²do inglês: *Institute of Advanced Studies*

instituto de estudos avançados de Princeton e dirigiu o desenvolvimento de um computador que tinha como propósito servir de modelo para a construção de outros computadores no país. Este computador começou a ser desenvolvido em 1945 e ficou pronto em 1951.

De acordo com Willis Ware, em março de 1953, o computador do IAS já havia executado um grande número de programas para calcular conjuntos de equações diferenciais parciais não lineares para meteorologistas interessados em previsão do tempo. O computador do IAS também foi utilizado para resolver problemas relacionados a teoria dos números e astronomia.

Diversos computadores tiveram seus projetos derivados ou inspirados no projeto do computador do IAS. Dentre eles, o ILLIAC I, o JOHNIAC e o SILLIAC.

2.1 Exercícios

2.1: O que é e onde surgiu o “conceito do programa armazenado”?

2.2: Faça uma pesquisa sobre John von Neumann e discuta a importância do seu trabalho para a computação.

Capítulo 3

Organização do Computador do IAS

A estrutura do computador do IAS possui quatro módulos principais: A memória principal, a unidade de controle, a unidade lógica e aritmética e o módulo de entrada e saída. A Figura 3.1 ilustra a organização geral do computador do IAS.

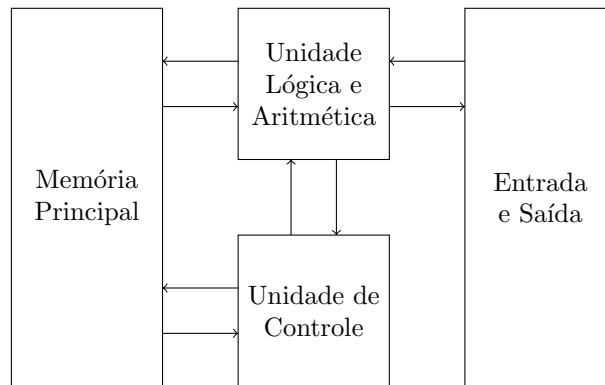


Figura 3.1: Estrutura geral do computador do IAS

A memória principal é utilizada para armazenar os dados e as instruções (“conceito do programa armazenado”). A unidade lógica e aritmética realiza operações com os dados, representados na base binária. A unidade de controle é responsável por coordenar a busca e execução das instruções armazenadas na memória principal e, por fim, o módulo de entrada e saída (E/S) permite a inserção e a recuperação de dados do computador.

3.1 Memória Principal

A memória principal do computador do IAS possui 1024 palavras de 40 *bits*. Cada palavra está associada a um endereço distinto, um número que varia de 0 até 1023. A Figura 3.2 ilustra a organização da memória do computador do IAS. Neste exemplo, a primeira palavra da memória, no endereço 0 (zero), contém o valor 01 06 90 50 67 (em hexadecimal) e a última palavra da memória, no endereço 1023, contém o valor 20 1A F9 10 AB.

| | 40 <i>bits</i> |
|------|----------------|
| 0 | 01 06 90 50 67 |
| 1 | 00 02 6A 01 25 |
| 2 | 01 36 AA 04 11 |
| ... | ... |
| 1022 | FF 0A FA 0A 1F |
| 1023 | 20 1A F9 10 AB |

Figura 3.2: Organização da memória do computador do IAS

A **memória principal** do computador do IAS realiza **duas operações básicas: escrita e leitura de valores nas palavras da memória**. Tanto a escrita quanto a leitura são controladas (iniciadas) pela unidade de controle (UC) do computador do IAS. A UC pode solicitar à memória principal a escrita de um valor em um determinado endereço da memória. Nesta operação, a memória recebe como entrada o endereço e o valor a ser escrito. A UC também pode solicitar à memória a leitura de um dado armazenado em uma palavra. Neste caso, a UC envia o endereço da palavra que contém o dado a ser lido e a memória retorna o valor lido.

Cada palavra da memória principal do computador do IAS pode armazenar um número de 40 *bits* ou duas instruções de 20 *bits*¹. Os números são representados em complemento de dois. As instruções, apresentadas em detalhe no Capítulo 5, possuem dois campos, o “código da operação”, de 8 *bits*, e o “endereço”, de 12 *bits*. A Figura 3.3 ilustra a representação de números e instruções em uma palavra de memória.

3.2 Unidade de Controle

A unidade de controle (UC) do computador do IAS é responsável por coordenar cada um dos módulos para que o computador execute as instruções armazenadas

¹Os números de 40 *bits* fazem parte do conjunto de dados do programa, em contraste às instruções, que compõem a lógica de um programa. O uso da memória para esses dois propósitos foi a novidade introduzida com o conceito do programa armazenado.

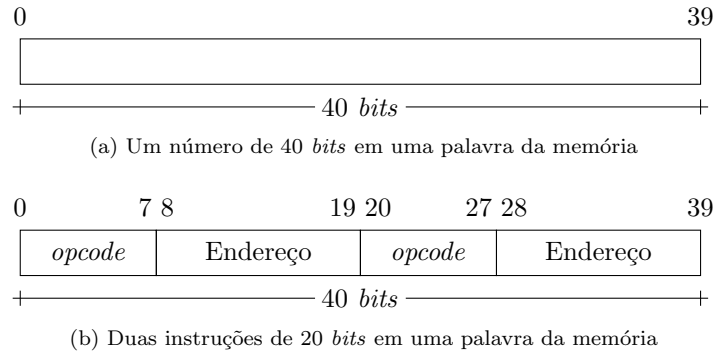


Figura 3.3: Representação de (a) números e (b) instruções em palavras da memória principal do computador do IAS

na memória. A unidade de controle dispõe de um circuito de controle e quatro “registradores” internos. Registradores são pequenas unidades de memória que se situam tipicamente próximas às unidades lógica e aritmética e de controle e são utilizadas para armazenar valores temporários. A operação de escrita ou leitura de dados em registradores é mais rápida do que a escrita ou leitura de dados na memória principal. Entretanto, registradores são fabricados com uma tecnologia que demanda mais área e de maior custo. Tipicamente, associamos palavras da memória a um endereço, entretanto registradores são frequentemente associados a nomes. A unidade de controle do computador do IAS possui os seguintes registradores:

- **PC:** o *Program Counter*, ou contador do programa, armazena um valor que representa o endereço da memória que possui o próximo par de instruções a serem executadas. No início, quando o computador é ligado, o conteúdo deste registrador é zerado para que a execução de instruções se inicie a partir do endereço zero da memória.
- **MAR:** o *Memory Address Register*, ou registrador de endereço da memória, armazena um valor que representa um endereço de uma palavra da memória. Este endereço será lido pela memória durante a operação de leitura ou escrita de dados.
- **IR:** o *Instruction Register*, ou registrador de instrução, armazena a instrução que está sendo executada no momento. O circuito de controle da unidade de controle lê e interpreta os *bits* deste registrador e envia sinais de controle para o resto do computador para coordenar a execução da instrução.
- **IBR:** o *Instruction Buffer Register* serve para armazenar temporariamente uma instrução. O computador do IAS busca instruções da memória em pares - lembre-se de que uma palavra da memória (de 40 *bits*) contém

duas instruções (de 20 *bits*). Dessa forma, quando o computador do IAS busca um par de instruções, a primeira instrução é armazenada diretamente em **IR** e a segunda em **IBR**. Ao término da execução da primeira instrução (em **IR**), o computador move a segunda instrução (armazenada em **IBR**) para **IR** e a executa.

A Figura 3.4 ilustra a organização interna da unidade de controle. As setas indicam caminhos onde os dados podem trafegar. Por exemplo, a seta entre o registrador **IBR** e o registrador **IR** indica que os *bits* armazenados no registrador **IBR** podem ser copiados para o registrador **IR**.

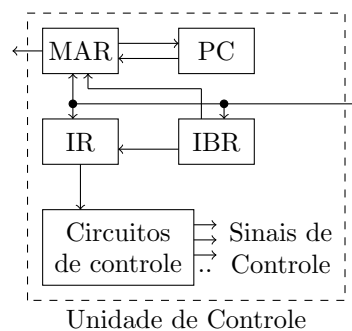


Figura 3.4: Organização da unidade de controle (UC) do computador do IAS

3.3 Unidade Lógica e Aritmética

A unidade lógica e aritmética do computador do IAS, ou ULA, é responsável por realizar operações aritméticas e lógicas nos dados armazenados no computador. No computador do IAS, a ULA é composta por circuitos lógicos e aritméticos e três registradores, descritos a seguir:

- **MBR**: o *Memory Buffer Register*, ou registrador temporário da memória, é um registrador utilizado para armazenar temporariamente os dados que foram lidos da memória ou dados que serão escritos na memória. Para escrever um dado na memória, o computador deve colocar o dado no registrador **MBR**, o endereço da palavra na qual o dado deve ser armazenado no registrador **MAR** e, por fim, enviar sinais de controle para a memória realizar a operação de escrita. Assim sendo, os registradores **MAR** e **MBR**, juntamente com os sinais de controle enviados pela unidade de controle, formam a interface da memória com o restante do computador.
- **AC** e **MQ**: O *Accumulator*, ou acumulador, e o *Multiplier Quotient*, ou quociente de multiplicação, são registradores temporários utilizados para armazenar operandos e resultados de operações lógicas e aritméticas. Por exemplo, a instrução que realiza a soma de dois números (**ADD**) soma o valor

armazenado no registrador **AC** com um valor armazenado na memória e grava o resultado da operação no registrador **AC**.

A Figura 3.5 mostra a organização detalhada da unidade lógica e aritmética e sua comunicação com o restante do computador.

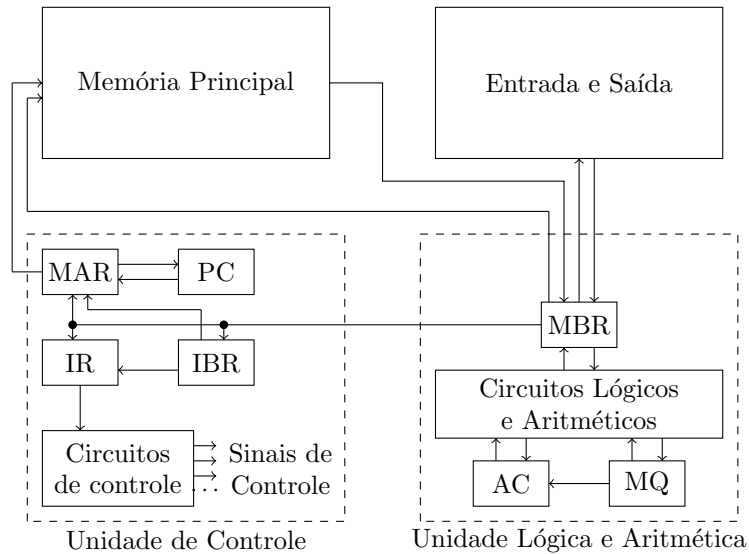


Figura 3.5: Organização detalhada da unidade lógica e aritmética e sua comunicação com o restante do computador

3.4 Exercícios

3.1: A estrutura do computador IAS é organizada em quatro módulos principais. Quais são estes módulos e qual o papel de cada um deles?

3.2: Como era organizada e quais eram as operações básicas da memória principal do computador do IAS?

3.3: O que são registradores? Quais são os registradores presentes no computador do IAS?

3.4: Onde ficam armazenados os dados e as instruções do computador IAS? Como o computador IAS difere dados de instruções durante a execução dos programas?

3.5: Qual é o formato das instruções do computador IAS? Qual o tamanho máximo, em número de instruções, de um programa no IAS?

3.6: O computador IAS tem capacidade para armazenar quantas palavras de memória? Quantos dígitos binários (*bits*) possui uma palavra de memória do computador IAS?

Capítulo 4

Operação do Computador do IAS

O computador do IAS executa programas armazenados na memória principal do computador. Os programas são implementados como uma sequência de instruções e o computador do IAS executa estas instruções uma a uma. A execução das instruções pode envolver o acesso à memória para leitura ou escrita de dados ou instruções¹. Desta forma, antes de discutirmos o processo de execução de instruções, vamos estudar em mais detalhes como o computador escreve e lê dados da memória principal.

4.1 Escrita e Leitura na Memória Principal

Para ler um dado armazenado em uma palavra da memória é necessário especificar o endereço da palavra na memória. No computador do IAS, este endereço deve ser gravado no registrador MAR (registrador de endereço da memória) antes de solicitar a leitura do dado à memória. Ao final da operação de leitura, a memória grava o valor lido no registrador MBR (registrador temporário da memória). Os seguintes passos são executados para se ler um dado da memória:

1. O endereço da palavra a ser lida é escrito no registrador MAR;
2. Os circuitos de controle da unidade de controle (UC) enviam um sinal de controle através de um canal de comunicação de controle² à memória principal, solicitando a leitura do dado;
3. A memória principal lê o endereço do registrador MAR através do canal de comunicação de endereços e, de posse do endereço, lê o valor armazenado da palavra de memória associada a este endereço;

¹Note que instruções também podem ser escritas na memória

²O canal de comunicação é implementados geralmente por meio de fios e os sinais ou dados trafegam em forma de pulsos elétricos.

4. Por fim, a memória principal grava o valor lido no registrador MBR através do canal de comunicação de dados.

A operação de escrita é parecida mas, neste caso, além do endereço em MAR, devemos colocar o valor a ser armazenado em MBR. Os seguintes passos são executados para se escrever um dado da memória.

1. O endereço da palavra que armazenará o dado é escrito no registrador MAR;
2. O dado a ser armazenado é gravado no registrador MBR;
3. Os circuitos de controle da unidade de controle (UC) enviam um sinal de controle à memória principal, solicitando a escrita do dado;
4. A memória principal lê o endereço do registrador MAR através de canal de comunicação de controle, lê o dado do registrador MBR através do canal de comunicação de dados e armazena este valor na palavra de memória associada ao endereço lido de MAR;

A Figura 4.1 ilustra os canais de comunicação de dados (azul), endereços (vermelho) e sinais de controle (verde) utilizados na comunicação com a memória.

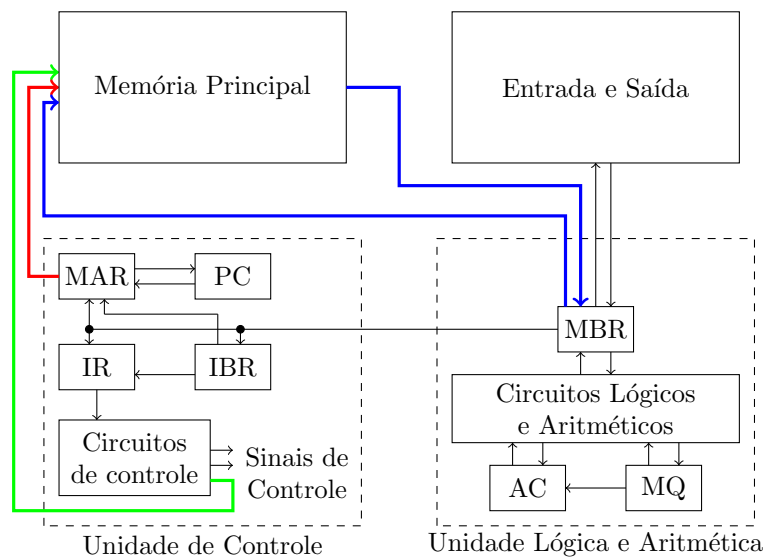


Figura 4.1: Canais de comunicação de dados (azul), endereços (vermelho) e sinais de controle (verde) na comunicação com a memória.

A próxima seção descreve o processo de execução de instruções no computador do IAS.

4.2 Execução de Instruções

As instruções do computador do IAS são executadas uma a uma através de uma sequência de operações orquestradas pela unidade de controle. Inicialmente, quando ligado, o computador executa a instrução à esquerda da primeira palavra da memória (endereço 0) e depois a instrução à direita da primeira palavra da memória. Em seguida, o computador prossegue executando a instrução à esquerda da segunda palavra da memória (endereço 1) e assim por diante, uma após a outra.

É válido lembrar que algumas instruções do computador podem “desviar o fluxo de execução” das instruções, fazendo com que a próxima instrução a ser executada não seja a instrução subsequente na memória. Mas antes de discutirmos instruções que podem desviar o fluxo de execução, vamos supor que as instruções são executadas em sequência, na ordem em que aparecem na memória.

A execução de uma instrução é realizada em dois ciclos: o “ciclo de busca” e o “ciclo de execução”. O ciclo de busca consiste em buscar a instrução da memória (ou do registrador IBR) e armazenar no IR. O ciclo de execução, por sua vez, consiste em interpretar a instrução armazenada no registrador IR e realizar as operações necessárias para execução da mesma.

Ciclo de Busca No ciclo de busca, a instrução a ser executada é buscada e armazenada no registrador de instrução, ou IR. O registrador PC contém o endereço da próxima instrução que deve ser executada. Quando o computador é ligado, o registrador PC é iniciado com o valor zero, indicando que a execução deve ser iniciada a partir da instrução armazenada na primeira palavra da memória. Assim sendo, no início da execução, o computador utiliza o endereço armazenado em PC (zero neste caso) para buscar a instrução a ser executada na memória. Como a memória do computador do IAS armazena palavras de 40 *bits*, a leitura do endereço zero da memória retornará duas instruções (cada instrução tem 20 *bits*). A fim de preservar a segunda instrução, o computador armazena a instrução à direita no registrador IBR, enquanto que a instrução à esquerda é transferida para o IR. Ao executar a próxima instrução, o computador transferirá o conteúdo do registrador IBR para o registrador IR e não precisará fazer a busca da instrução na memória. Dessa forma, o ciclo de busca pode ser dividido em duas partes: ciclo de busca de instruções à esquerda e ciclo de busca de instruções à direita. O ciclo de busca de instruções à esquerda consiste basicamente nos seguintes passos:

1. A UC move o endereço em PC para MAR;
2. A UC envia um sinal de controle para a memória fazer uma operação de leitura;
3. A memória lê a palavra de memória e transfere o conteúdo para o registrador MBR;

4. A UC copia a segunda metade (*bits* 20 a 39) do registrador **MBR** e salva no registrador **IBR**. Estes *bits* correspondem à instrução à direita da palavra de memória.
5. A UC copia os 8 *bits* à esquerda do registrador **MBR** para o registrador **IR**. Estes *bits* correspondem ao campo de operação da instrução à esquerda da palavra de memória.
6. A UC copia os 12 *bits* subsequentes ao campo de operação (*bits* 8 a 19) e os transfere para o registrador **MAR**. Estes *bits* correspondem ao campo endereço da instrução e devem estar no registrador **MAR** caso a instrução precise acessar a memória durante o ciclo de execução.

A leitura da memória pode não ser necessária no ciclo de busca de instruções à direita, pois a instrução pode estar armazenada no registrador **IBR** caso a última instrução executada tenha sido a instrução à esquerda na mesma palavra de memória. Note, no entanto, que instruções que desviam o fluxo de controle podem fazer com que uma instrução à direita seja executada sem que a instrução à esquerda da mesma palavra de memória seja executada. Neste caso, o computador do IAS precisa buscar a instrução da memória, visto que a instrução presente no registrador **IBR** não corresponde à instrução a ser executada. Os seguintes passos descrevem o ciclo de busca de instruções à direita:

1. Se não houve desvio no fluxo de controle, ou seja, se a última instrução executada foi a instrução à esquerda da palavra de memória indicada pelo PC atual, então:
 - (a) A UC copia os 8 *bits* à esquerda do registrador **IBR** para o registrador **IR**. Estes *bits* correspondem ao campo de operação da instrução armazenada em **IBR**.
 - (b) A UC copia os 12 *bits* subsequentes ao campo de operação (*bits* 8 a 19) e os transfere para o registrador **MAR**. Estes *bits* correspondem ao campo endereço da instrução e devem estar no registrador **MAR** caso a instrução precise acessar a memória durante o ciclo de execução.
 - (c) A UC incrementa o valor no registrador **PC**, indicando que o próximo par de instruções a ser lido da memória deve ser lido do endereço $PC + 1$.
2. Senão:
 - (a) A UC move o endereço em **PC** para **MAR**;
 - (b) A UC envia um sinal de controle para a memória fazer uma operação de leitura;
 - (c) A memória lê a palavra de memória e transfere o conteúdo para o registrador **MBR**;
 - (d) A UC copia os *bits* 20 a 27 do registrador **MBR** para o registrador **IR**. Estes *bits* correspondem ao campo de operação da instrução à direita da palavra de memória lida.

- (e) A UC copia os 12 *bits* subsequentes ao campo de operação (*bits* 28 a 39) e os transfere para o registrador MAR. Estes *bits* correspondem ao campo endereço da instrução à direita da palavra de memória.
- (f) A UC incrementa o valor no registrador PC, indicando que o próximo par de instruções a ser lido da memória deve ser lido do endereço $PC + 1$.

Ciclo de Execução Cada instrução executa passos distintos durante sua execução, caso contrário, elas teriam a mesma funcionalidade. Cabe aos circuitos de controle identificar a instrução armazenada no registrador IR e orquestrar a execução dos passos apropriados para a execução da instrução. Os seguintes passos mostram o ciclo de execução de uma instrução:

1. Interpretação dos *bits* do campo operação da instrução, armazenados em IR. Esta operação é também chamada de decodificação, pois a operação a ser realizada se encontra codificada, em forma de números, dentro do campo operação.
2. Após a identificação da instrução, a UC verifica se a instrução requer a busca de operandos da memória. Se a busca for necessária, então:
 - (a) A UC envia um sinal para a memória realizar uma operação de leitura. Note que o endereço do operando já foi transferido para o registrador MAR durante o ciclo de busca.
 - (b) A memória lê a palavra de memória e transfere o conteúdo para o registrador MBR;
3. Se a instrução envolve a realização de uma operação lógica ou aritmética:
 - (a) A UC envia sinais de controle para a unidade lógica aritmética realizar a operação associada com a instrução. Note que neste ponto todos os operandos da operação já se encontram em registradores na unidade lógica e aritmética. Por exemplo, os operandos da operação de soma se encontram nos registradores AC e MBR.
 - (b) A ULA realiza a operação lógica ou aritmética de acordo com os sinais enviados pela UC. Estas operações incluem transferência de dados entre registradores da ULA, soma, subtração, multiplicação, divisão e outras.
 - (c) A ULA grava o resultado da operação em seus registradores: AC, MQ ou MBR.
4. Se a instrução envolve a gravação do resultado na memória:
 - (a) A UC envia um sinal para a memória realizar uma operação de escrita. Note que o endereço do operando já foi transferido para o registrador MAR durante o ciclo de busca e o dado já foi transferido de AC para MBR no passo anterior.

- (b) A memória lê o dado de **MBR** e o grava na palavra de memória associada ao endereço lido de **MAR**.
5. Se a execução da instrução implica no desvio do fluxo de controle, ou seja, se a instrução “salta” para uma outra instrução:
- (a) A UC move o conteúdo do registrador **MAR** para **PC**. Note que o registrador **MAR** contém o valor do campo endereço da instrução sendo executada. No caso de “instruções de salto”, este campo contém o endereço da instrução para o qual o fluxo de execução deve ser desviado.
 - (b) Caso a execução corresponda a um salto para a instrução à esquerda da palavra de memória selecionada, dá-se início ao ciclo de busca de instrução à esquerda. Caso o salto seja para a instrução à direita, o ciclo de busca de instrução à direita com desvio de fluxo é iniciado.

Como veremos no Capítulo 5, a instrução “**ADD M(X)**” é uma instrução que soma o conteúdo do registrador **AC** ao conteúdo da palavra de memória armazenada no endereço **X** e grava o resultado no registrador **AC**. A título de exemplo, os seguintes passos mostram o ciclo de execução desta instrução:

1. A UC interpreta os *bits* armazenados em **IR** (0000 0101 no caso da instrução **ADD M(X)**) e identifica a instrução como sendo uma soma.
2. Após a identificação da instrução, o UC sabe que a instrução requer a busca de operandos da memória. Dessa forma:
 - (a) A UC envia um sinal para a memória realizar uma operação de leitura. Relembrando que o endereço do operando já foi transferido para o registrador **MAR** durante o ciclo de busca.
 - (b) A memória lê a palavra de memória e transfere o conteúdo para o registrador **MBR**;
3. A UC sabe que a instrução **ADD** envolve a realização de uma operação de soma na **ULA**, então:
 - (a) A UC envia sinais para a unidade lógica e aritmética (**ULA**) solicitando a realização da soma dos valores armazenados em **AC** e **MBR**. Note que neste ponto todos os operandos da operação já se encontram em **AC** e **MBR**.
 - (b) A **ULA** realiza a operação de soma.
 - (c) A **ULA** grava o resultado da soma no registrador **AC**.

Note que os passos 4 (armazenamento do resultado na memória) e 5 (desvio do fluxo de controle) não são necessários nesta instrução.

4.3 Exercícios

4.1: Quais são os passos realizados pelo computador do IAS para escrever um dado na memória?

4.2: O que acontece no ciclo de busca de instruções no computador IAS? Como é dividida a palavra lida da memória entre os registradores MAR, IR e IBR?

4.3: A execução de instruções no computador do IAS ocorre uma a uma. Além disso, o processo de execução de uma instrução é dividido em dois ciclos: “ciclo de busca” e “ciclo de execução”. Descreva os passos do “ciclo de busca” e do “ciclo de execução” das seguintes instruções:

- a) **STOR M(X)**: Transfere o conteúdo do registrador **AC** para a palavra de memória associada ao endereço **X**.
- b) **LSH**: Multiplica o conteúdo do registrador **AC** por 2. O processo consiste em deslocar os *bits* uma posição para a esquerda.

4.4: Um projetista de *hardware* decidiu adicionar a instrução **INC M(X)** ao computador do IAS. Esta instrução carrega o valor da palavra de memória associada ao endereço **X** no registrador **AC**, adiciona 1 (um) ao valor carregado, e armazena o resultado novamente na palavra de memória associada ao endereço **X**. Descreva os passos do **ciclo de execução** para se executar esta instrução.

Capítulo 5

Programando o Computador do IAS

O conjunto de instruções do computador do IAS possui 20 instruções. As instruções podem ser classificadas em 4 tipos distintos:

- Transferência de dados: instruções para mover dados entre a memória e os registradores;
- Salto: instruções para desviar o fluxo da execução das instruções.
- Aritmética: instruções para realização de operações aritméticas.
- Modificação de endereço: instruções para alterar o campo endereço de outras instruções.

Todas as instruções do computador do IAS possuem 20 *bits*. Além disso, todas as instruções são organizadas em um único formato, com dois campos: código da operação e endereço. O campo código da operação, ou *opcode*, possui 8 *bits*, enquanto que o campo endereço possui 12 *bits*. A Figura 3.3b ilustra o formato das instruções do computador do IAS.

5.1 Instruções de Transferência de Dados

As instruções de transferência de dados são utilizadas para mover dados entre os registradores e a memória. Por exemplo, a instrução “LOAD M(X)” é uma instrução de transferência de dados que transfere o dado armazenado na palavra da memória associada ao endereço X para o registrador AC. A instrução “LOAD MQ”, no entanto, é uma instrução de transferência de dados que transfere o dado armazenado no registrador MQ para o registrador AC.

Como veremos mais adiante, a unidade lógica e aritmética realiza operações com valores armazenados na memória e nos registradores AC e MQ. Para inicializar os valores de AC e MQ antes de executar uma instrução aritmética ou

lógica, podemos executar uma instrução de transferência de dados para transferir um dado da memória para AC ou MQ. Para transferir um dado armazenado na memória para o registrador AC, podemos utilizar a instrução `LOAD M(X)` descrita na Figura 5.1.

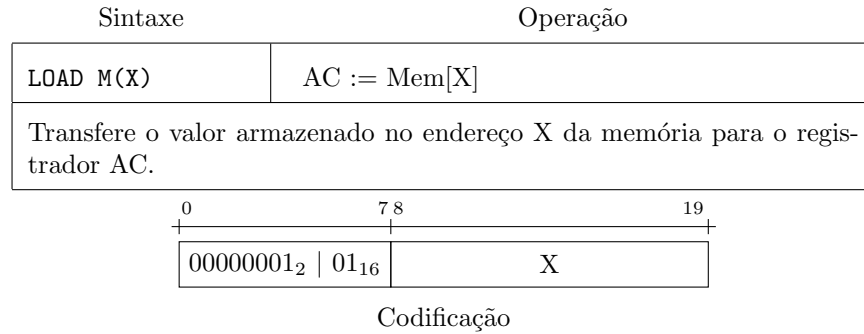


Figura 5.1: Instrução `LOAD M(X)`

Podemos utilizar a instrução `LOAD MQ,M(X)`, descrita na Figura 5.2, para transferir um dado armazenado na memória para o registrador MQ.

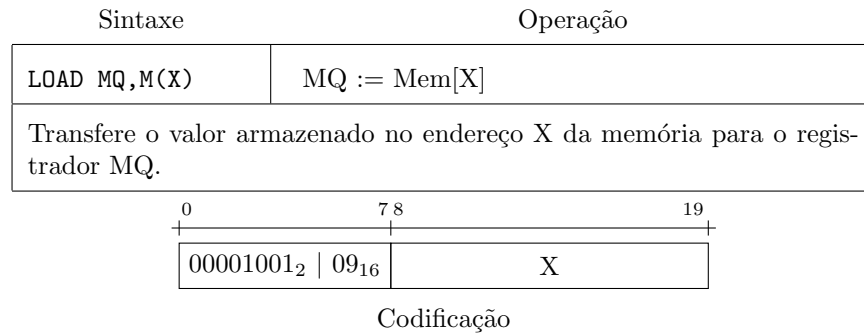


Figura 5.2: Instrução `LOAD MQ,M(X)`

Os resultados de operações lógicas e aritméticas no computador do IAS são armazenados nos registradores AC e MQ. Após a execução de uma operação lógica ou aritmética, pode ser interessante armazenar o resultado da operação na memória. Para transferir um dado armazenado no registrador AC para a memória podemos utilizar a instrução apresentada na Figura 5.3: `STOR M(X)`.

O computador do IAS não possui uma instrução capaz de transferir diretamente um dado armazenado no registrador MQ para a memória. No entanto, a instrução “`LOAD MQ`”, descrita na Figura 5.4, pode ser utilizada para transferir o dado armazenado em MQ para o registrador AC. Assim sendo, basta executarmos a instrução `LOAD MQ` e a instrução `STOR M(X)` na sequência para armazenarmos

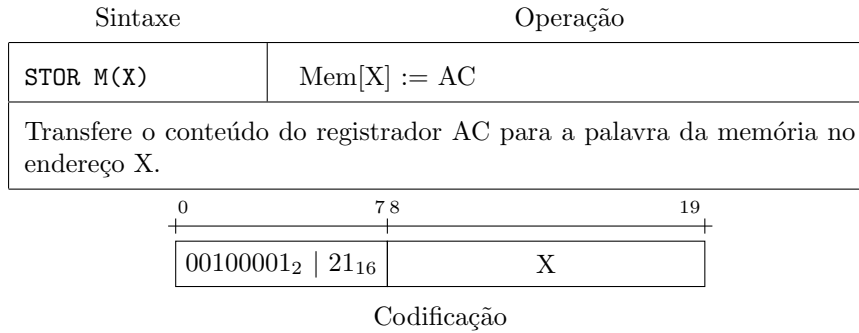


Figura 5.3: Instrução STOR M(X)

o dado do registrador MQ na memória.

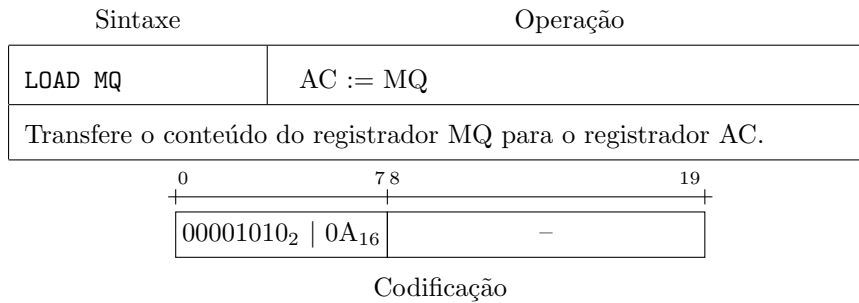


Figura 5.4: Instrução LOAD MQ

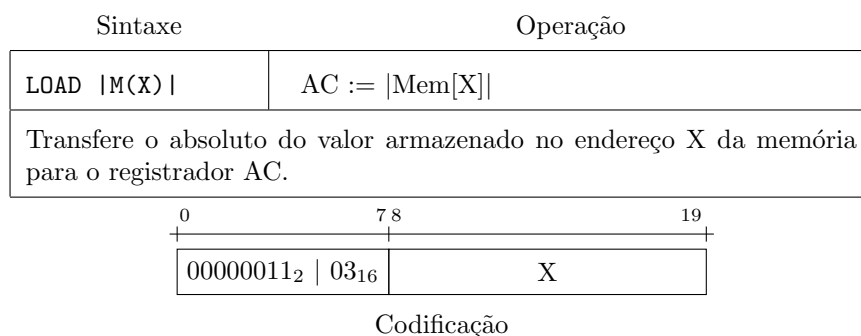
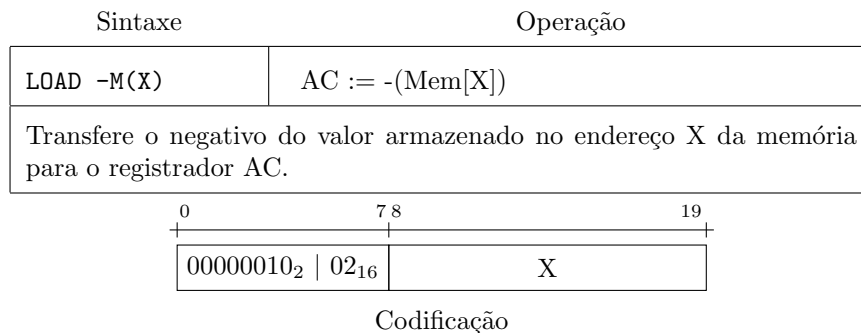
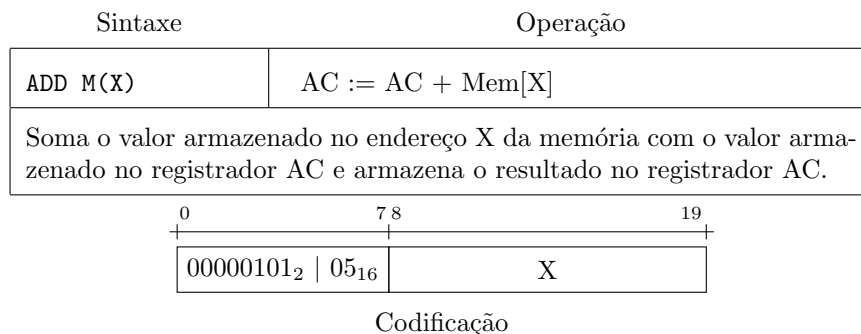
O computador do IAS possui ainda duas instruções especiais para transferir dados da memória para o registrador AC: “LOAD |M(X)|” e “LOAD -M(X)”. A instrução LOAD |M(X)| (Figura 5.5) carrega o valor absoluto do número armazenado no endereço X da memória, enquanto que a instrução LOAD -M(X) (Figura 5.6) carrega o negativo do número armazenado no endereço X da memória.

5.2 Instruções Aritméticas

O computador do IAS possui 8 instruções para realização de operações lógicas e aritméticas. Estas instruções são descritas a seguir.

A instrução ADD M(X), descrita na Figura 5.7, soma dois números e armazena o resultado no registrador AC.

As instruções aritméticas que precisam de 2 operandos, como a soma, buscam um dos operandos da memória e o outro do registrador AC ou MQ, internos à unidade lógica aritmética. No caso da soma, se quisermos adicionar dois números armazenados na memória, é necessário executar uma instrução de transferência

Figura 5.5: Instrução **LOAD** $|M(X)|$ Figura 5.6: Instrução **LOAD** $-M(X)$ Figura 5.7: Instrução **ADD** $M(X)$

de dados para transferir um dos operandos da memória para o registrador **AC**. O exemplo abaixo ilustra um programa em linguagem de montagem onde os valores armazenados nos endereços 100 e 101 são somados e o resultado é ar-

mazenado no endereço 102 da memória.

```

1  LOAD M(100)  # AC := Mem[100]
2  ADD  M(101)  # AC := AC + Mem[101]
3  STOR M(102)  # Mem[102] := AC

```

A instrução “ADD |M(X)|”, descrita na Figura 5.8, é uma variação da instrução soma onde o valor do registrador AC é somado com o valor “absoluto” do operando carregado da memória.

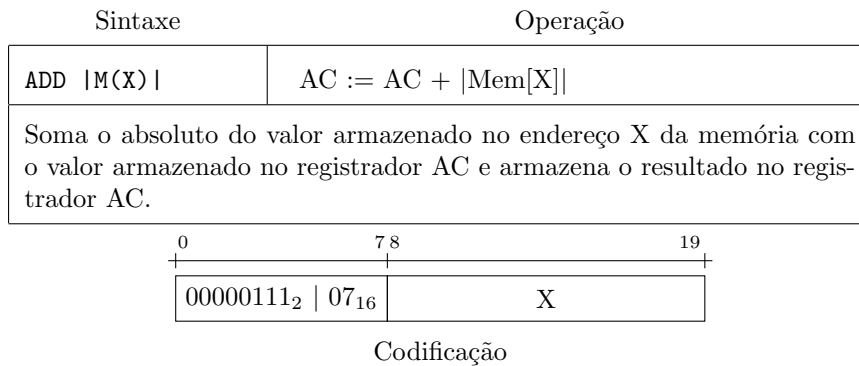


Figura 5.8: Instrução ADD |M(X)|

O computador do IAS também possui duas instruções para realizar a subtração de números: “SUB M(X)” e “SUB |M(X)|”, descritas nas Figuras 5.9 e 5.10, respectivamente.

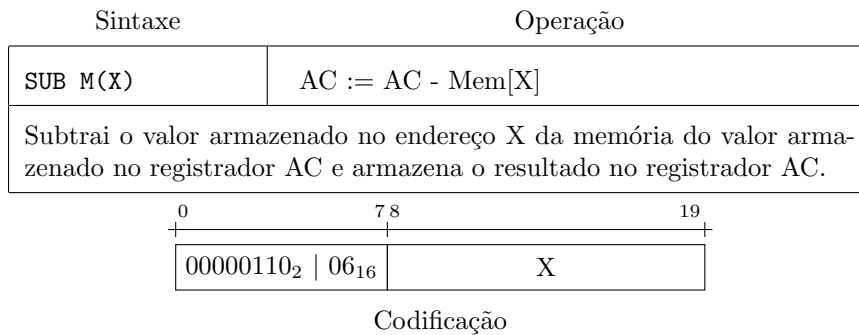


Figura 5.9: Instrução SUB M(X)

A instrução “MUL M(X)” (Figura 5.11) é utilizada para realizar a multiplicação de dois números. Os operandos da multiplicação devem estar armazenados no registrador MQ e no endereço X da memória. A multiplicação de

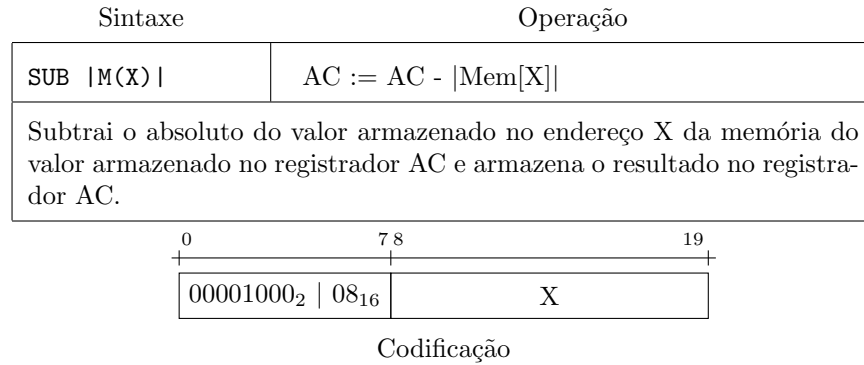


Figura 5.10: Instrução SUB |M(X)|

dois números de 40 *bits* pode resultar em um número de até 80 *bits*. Como o computador do IAS não possui registradores de 80 *bits* para armazenar o resultado, o mesmo é armazenado em dois registradores: AC e MQ. A parte baixa do resultado, ou seja, os *bits* menos significativos, é armazenada no registrador MQ, enquanto que a parte alta é armazenada no registrador AC.

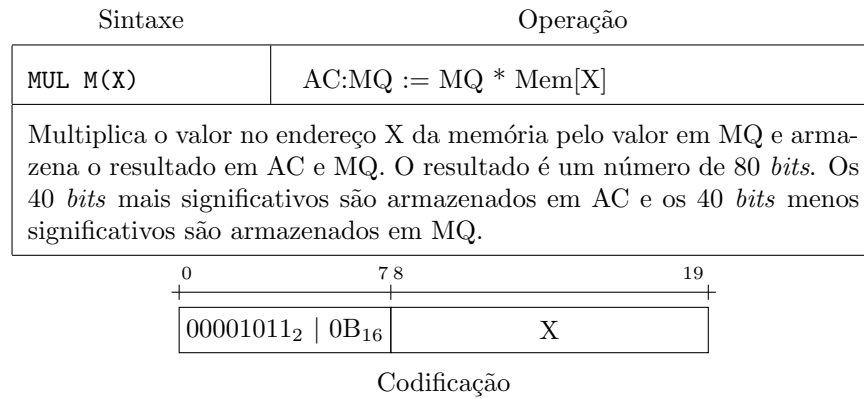


Figura 5.11: Instrução MUL M(X)

A operação de divisão no computador do IAS é realizada pela instrução “DIV M(X)” (Figura 5.12). O dividendo deve estar armazenado no registrador AC e o divisor no endereço X da memória principal. Como resultado, a divisão produz dois números, o quociente e o resto. O quociente é armazenado no registrador MQ e o resto no registrador AC.

Além das operações aritméticas, o computador do IAS possui duas operações lógicas: “RSH” e “LSH”. A instrução RSH desloca todos os *bits* do registrador AC para a direita. Ou seja, o *bit* 39 recebe o valor do *bit* 38, o *bit* 38 recebe o valor

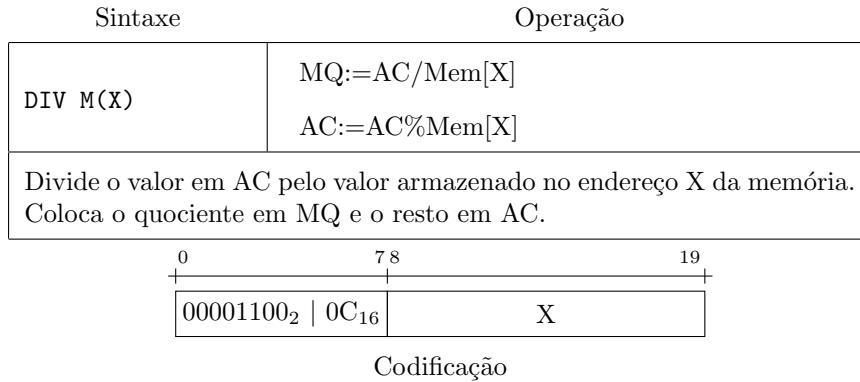


Figura 5.12: Instrução DIV M(X)

do *bit* 37 e assim por diante. Por fim, o *bit* 0 recebe o valor 0.

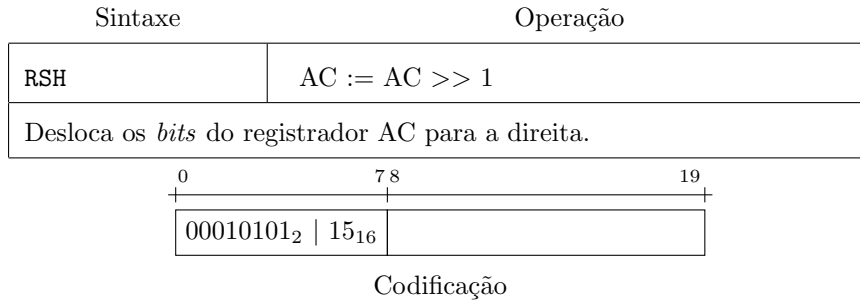


Figura 5.13: Instrução RSH

Além de ser uma operação lógica (deslocamento de *bits*), a instrução RSH pode ser utilizada para realizar a divisão de um número por 2. Note que, quando deslocamos os dígitos binários de um número na representação binária para a direita, eliminando o último dígito, o resultado é a metade do número. Como podemos ver no exemplo abaixo, se deslocarmos¹ os dígitos binários do número 5 (0000101₂) para a direita, o resultado é o número 2. Note que o resultado final corresponde ao quociente da divisão. Como podemos ver no mesmo exemplo, o mesmo acontece para o número 8.

$$\begin{aligned}
 0000\ 0101_2(5_{10}) >> 1 &= 0000\ 0010_2(2_{10}) \\
 0000\ 1000_2(8_{10}) >> 1 &= 0000\ 0100_2(4_{10})
 \end{aligned}$$

¹O operador $>>$ é utilizado para representar o deslocamento de *bits* em algumas linguagens de programação de alto nível, como em C.

A instrução “LSH” (Figura 5.14) realiza a operação inversa à instrução RSH, ou seja, ela desloca os *bits* do valor no registrador AC para a esquerda. Análogamente, o resultado aritmético é a multiplicação do número por 2.

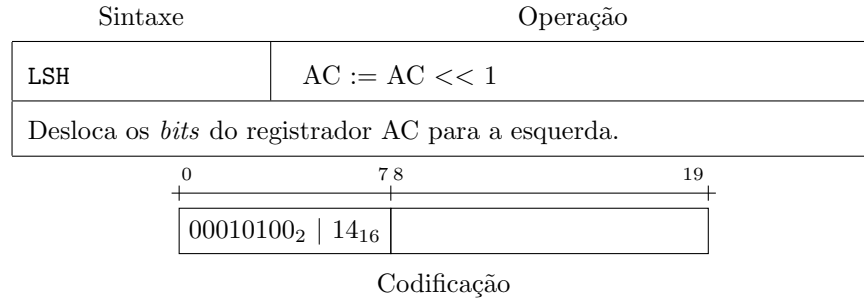


Figura 5.14: Instrução LSH

5.3 Instruções de Salto

Uma das principais funcionalidades de um computador é a capacidade de executar trechos de código de um programa repetidas vezes ou sob determinadas condições. Esta funcionalidade permite ao programador expressar comandos condicionais como **if-then-else** ou comandos de repetição como **for** e **while**.

A implementação destes comandos é feita através de saltos no código da aplicação. No caso do computador do IAS, a instrução “JUMP M(X)” (Figuras 5.15 e 5.16) pode ser utilizada para desviar o fluxo de execução, ou saltar, para a instrução no endereço X da memória. O programa em linguagem de montagem a seguir mostra como esta instrução pode ser utilizada para se implementar um laço que adiciona o valor armazenado no endereço 101 da memória ao valor armazenado no endereço 100 da memória.

| | Endereço | Instruções |
|---|----------|------------------------------------|
| 1 | | |
| 2 | 000 | LOAD M(100); ADD M(101) |
| 3 | 001 | STOR M(100); JUMP M(000,0:19) |

Neste exemplo, as instruções **LOAD**, **ADD** e **STOR** são executadas na sequência para somar os valores armazenados nos endereços 100 e 101 e armazenar o resultado no endereço 100. Em seguida, a instrução **JUMP** desvia o fluxo de execução, informando à unidade de controle que a próxima instrução a ser executada deve ser buscada do endereço 000 da memória. Dessa forma, as instruções **LOAD**, **ADD**, **STOR** e **JUMP** serão executadas repetidamente.

Note que o computador do IAS armazena duas instruções em uma mesma palavra da memória: uma à esquerda e outra à direita da palavra. Assim sendo, o computador do IAS possui duas instruções **JUMP**, uma que salta para a

instrução à esquerda da palavra no endereço $M(X)$ (Figura 5.15), e outra que salta para a instrução à direita da palavra no endereço $M(X)$ (Figura 5.16).

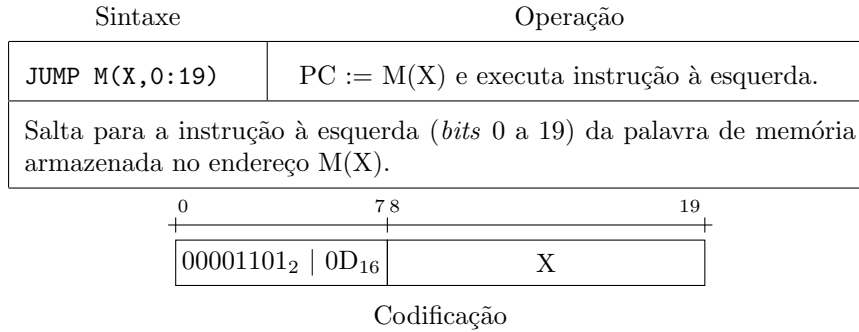


Figura 5.15: Instrução JUMP $M(X, 0:19)$

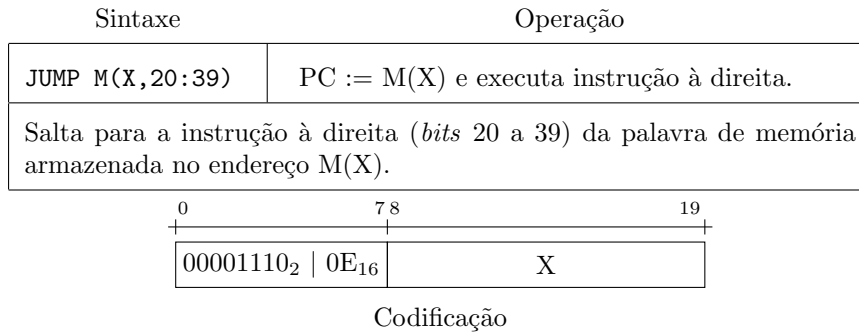


Figura 5.16: Instrução JUMP $M(X, 20:39)$

No exemplo anterior, as instruções LOAD, ADD, STOR e JUMP são executadas repetidamente em um ciclo que não tem fim, a não ser que o computador seja desligado. Este ciclo sem fim, ou “laço infinito”, ocorre porque não há uma condição de parada para o laço. Para criarmos uma condição de parada no laço devemos utilizar uma instrução que desvia o fluxo de execução “condicionalmente”, ou seja, uma instrução de salto condicional. No caso do computador do IAS, esta instrução é a JUMP+ $M(X)$ (Figuras 5.17 e 5.18).

A instrução JUMP+ $M(X)$ salta para a instrução no endereço X da memória somente se o valor armazenado no registrador AC for maior ou igual a 0, ou seja, se AC for não negativo. Caso contrário (o valor em AC for negativo), o fluxo de execução segue normalmente, executando-se a instrução subsequente à instrução JUMP+. O exemplo a seguir mostra um programa que executa o mesmo trecho de código do exemplo anterior por 10 vezes, ou seja, um laço com 10 iterações.

| Endereço | Instruções / Dados |
|----------|--------------------------------|
| 000 | LOAD M(102); SUB M(103) |
| 001 | STOR M(102); JUMP+ M(000,0:19) |
| 002 | ... |
| 102 | 00 00 00 00 09 # Contador |
| 103 | 00 00 00 00 01 # Constante 1 |

Neste exemplo, o contador armazenado no endereço 102 (inicializado com o valor 9) é decrementado repetidamente até que o seu valor seja menor do que 0, ou seja, até que o valor seja negativo. Neste caso, a instrução JUMP+ não desvia o fluxo de execução para a instrução no endereço 000 da memória, fazendo com que a execução saia do laço.

| Sintaxe | Operação | | | | | | |
|--|---|----|-----|----|--|--|--|
| JUMP+ M(X,0:19) | Se $AC \geq 0$ então $PC := M(X)$ e executa instrução à esquerda, senão, executa a próxima instrução. | | | | | | |
| Salta para a instrução à esquerda (<i>bits</i> 0 a 19) da palavra de memória se o valor armazenado em AC for maior ou igual à zero. | | | | | | | |
| <div style="text-align: center;"><table><tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">7 8</td><td style="text-align: center;">19</td></tr><tr><td colspan="3"><div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"><div style="border-right: 1px solid black; padding-right: 10px;">00001111₂ 0F₁₆</div><div style="padding-left: 10px;">X</div></div></td></tr></table></div> | | 0 | 7 8 | 19 | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"><div style="border-right: 1px solid black; padding-right: 10px;">00001111₂ 0F₁₆</div><div style="padding-left: 10px;">X</div></div> | | |
| 0 | 7 8 | 19 | | | | | |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"><div style="border-right: 1px solid black; padding-right: 10px;">00001111₂ 0F₁₆</div><div style="padding-left: 10px;">X</div></div> | | | | | | | |
| Codificação | | | | | | | |

Figura 5.17: Instrução JUMP+ M(X,0:19)

Instruções de salto condicional também podem ser utilizadas para implementar construções *if-then-else*. O exemplo a seguir ilustra como estas instruções podem ser utilizadas em conjunto com instruções de salto incondicional (JUMP) para implementar construções *if-then-else*:

| Endereço | Instruções / Dados |
|----------|--|
| 000 | LOAD M(100); SUB M(101) # Se Y > X |
| 001 | JUMP+ M(003,0:19); LOAD M(101) # Z = Y |
| 002 | STOR M(102); JUMP M(004,0:19) # senão |
| 003 | LOAD M(100); STOR M(102) # Z = X |
| 004 | ... |
| 100 | 00 00 00 00 01 # Variável X |

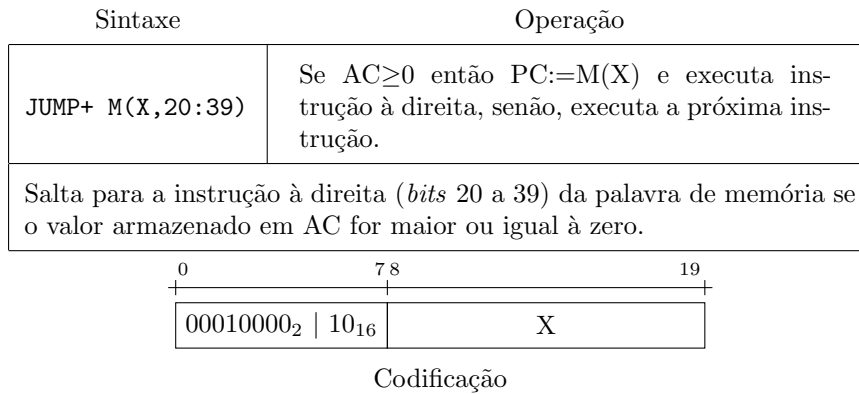


Figura 5.18: Instrução JUMP+ M(X,20:39)

| | | | |
|----|-----|----------------|--------------|
| 10 | 101 | 00 00 00 00 02 | # Variável Y |
| 11 | 102 | 00 00 00 00 00 | # Variável Z |

No exemplo anterior, as instruções `LOAD M(100)`, `SUB M(101)` e `JUMP+ M(003,0:19)` são utilizadas para comparar se $Y > X$. Note que AC recebe o resultado da subtração $X - Y$. Se Y for maior que X, então o resultado em AC será um número negativo, e o salto condicional (`JUMP+`) não será tomado. Do contrário ($X \geq Y$), o resultado em AC será maior ou igual à zero, e o salto condicional será tomado. Caso o salto não seja tomado ($Y > X$), as instruções `LOAD M(101)`, `STOR M(102)` e `JUMP M(004,0:19)` serão executadas, movendo o conteúdo de Y para Z e desviando o fluxo de execução para a instrução no endereço 004, após o `if-then-else`. Caso o salto condicional seja tomado ($X \geq Y$), as instruções `LOAD M(100)` e `STOR M(102)` serão executadas, movendo o valor de X para Z. Note que, neste caso, não há a necessidade de inserir uma instrução para saltar para o endereço da instrução após o `if-then-else`, pois a instrução subsequente ao `STOR` (no endereço 004) já é a instrução que deve ser executada.

5.4 Instruções de Modificação de Endereço

As instruções de transferência de dados e aritméticas que acessam dados da memória são anotadas com o endereço do dado na memória no campo “endereço” da instrução. Note que este endereço é fixo e não permite que uma mesma instrução seja usada para acessar dados em endereços distintos da memória. Esta deficiência fica clara quando trabalhamos com vetores. Vetores (*arrays*) são conjuntos ordenados de dados armazenados de forma consecutiva na memória. Tipicamente, programas que processam dados em vetores utilizam laços que iteram múltiplas vezes acessando um elemento distinto do vetor em cada iteração. Por exemplo, código da função `soma_elementos`, a seguir, soma todos os elementos do vetor A.

```

1 int A[1024];
2
3 int soma_elementos()
4 {
5     int i;
6     int soma=0;
7     for (i=0; i<1024; i++)
8         soma = soma + A[i];
9     return soma;
10 }

```

Já sabemos como implementar laços com o conjunto de instruções do computador do IAS, entretanto, precisamos fazer com que uma mesma instrução acesse dados em endereços diferentes da memória à medida em que as iterações do laço são executadas. Para isso, o computador do IAS dispõe de duas instruções que permitem a modificação do campo endereço de outra instrução: “STOR M(X,8:19)” (Figura 5.19) e “STOR M(X,28:39)” (Figura 5.20).

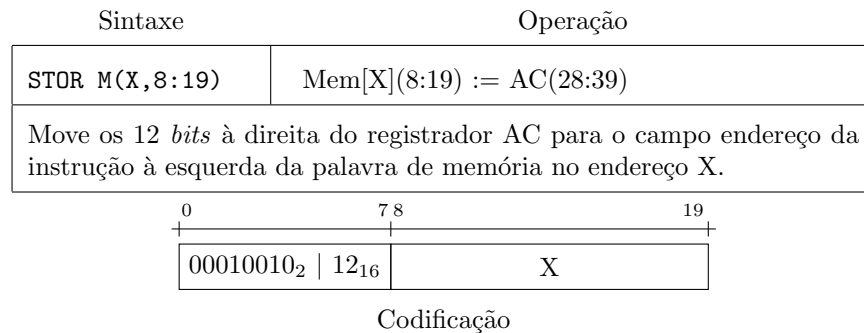


Figura 5.19: Instrução STOR M(X,8:19)

A instrução STOR M(X,8:19) modifica o campo endereço da instrução à esquerda da palavra no endereço X da memória, enquanto que a instrução STOR M(X,28:39) modifica o campo endereço da instrução à direita da palavra no endereço X da memória. Ambas transferem os 12 *bits* à direita do registrador AC (*bits* 28 a 39) para o campo endereço da instrução alvo. O programa a seguir exemplifica o uso destas instruções. O programa soma os elementos de um vetor de 20 números armazenados a partir do endereço 100.

```

1 End. Instruções / Dados
2
3 # Modifica o endereço da instrução ADD e atualiza o apontador.
4 000 LOAD M(0F2); STOR M(002,28:39)
5 001 ADD M(0F1); STOR M(0F2)

```

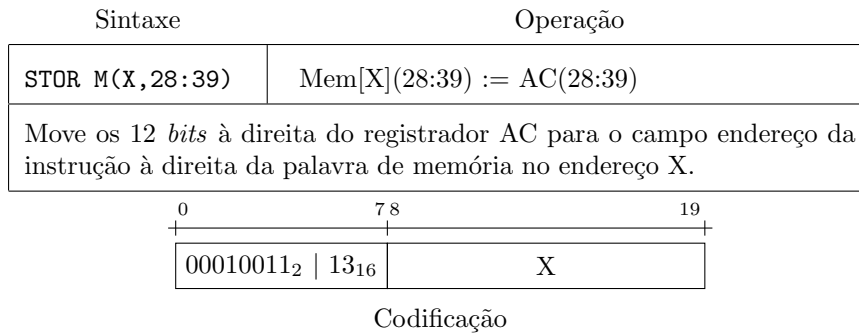


Figura 5.20: Instrução STOR M(X,28:39)

```

6 # Carrega a variável e soma com o conteúdo do vetor apontado pelo apontador.
7 002 LOAD M(0F3); ADD M(000)
8 # Salva o resultado da soma e carrega o contador de it.
9 003 STOR M(0F3); LOAD M(0F0)
10 # Atualiza o contador de iterações.
11 004 SUB M(0F1); STOR M(0F0)
12 005 JUMP+ M(000,0:19); ...
13
14 0F0 00 00 00 00 13 # Contador de iterações (19)
15 0F1 00 00 00 00 01 # Constante 1
16 0F2 00 00 00 01 00 # Apontador
17 0F3 00 00 00 00 00 # variável soma
18
19 100 00 00 00 00 00 # Primeiro elemento do vetor
20 ... ..

```

O programa armazena um apontador para o início do vetor no endereço 0F2 e a variável soma no endereço 0F3. O primeiro passo é carregar o apontador no registrador AC e gravar o endereço no campo endereço da instrução que realiza a soma, ou seja, a instrução ADD do endereço 002. Note que, inicialmente, o campo endereço desta instrução possui o endereço 000. No entanto, antes mesmo desta instrução ser executada, o seu campo endereço será modificado pela instrução STOR M(002,28:39). Após modificar a instrução, o apontador é incrementado e o novo valor (o endereço do próximo elemento no vetor) é armazenado na memória. Após este passo, o programa carrega o conteúdo da variável soma no registrador AC e utiliza a instrução ADD (com o endereço previamente modificado) para somar um elemento do vetor. O valor resultante da soma é armazenado na memória (no endereço da variável soma) e o programa segue com o decremento e teste do contador de iterações, iterando o laço.

5.5 Exercícios

5.1: Quantas instruções possui o computador IAS e quais os tipos de instruções presentes nessa arquitetura?

5.2: O que o(a) programador(a) deve fazer para transferir um dado do registrador **MQ** para a memória no computador do IAS?

5.3: Qual o resultado da operação **ADD** $|M(X)|$, quando **AC** = 2 e **M(X)** = -2?

5.4: Por que apenas as operações aritméticas multiplicação e divisão no computador IAS utilizam dois registradores (**AC** e **MQ**) para armazenar o resultado da operação? Como o resultado é armazenado nestes dois registradores?

5.5: O que acontece com o *bit* menos significativo de **AC** (**AC**[39]) quando executamos a operação **LSH**?

5.6: O que acontece com o *bit* mais significativo (**AC**[0]), quando executamos a operação **RSH**?

5.7: Por que o computador do IAS possui duas instruções para cada instrução de salto?

5.8: O que é escrito no registrador **PC** quando uma instrução de salto incondicional (**JUMP**) é executada? De onde vem esse dado?

5.9: Cite três utilidades para instruções de salto.

5.10: Escreva um programa para o computador IAS que incrementa em uma unidade o campo endereço de uma instrução, sem utilizar as instruções especializadas **STOR** **M(X,8:19)** ou **STOR** **M(X,28:39)**.

5.11: Considere o seguinte mapa de memória, que descreve um programa do computador do IAS em linguagem de máquina:

```

1 000 01 10 00 51 01
2 001 05 10 20 51 03
3 002 15 12 31 51 23
4 003 21 10 40 E0 03
5 100 00 00 00 00 0A
6 101 00 00 00 00 0B
7 102 00 00 00 00 0C

```



```
s 103 00 00 00 00 0D
9 104 00 00 00 00 00
```

- a) O que este programa faz?
- b) Qual o valor contido nos registradores AC, MBR, IBR, IR, MAR e PC ao término do **ciclo de busca** da instrução à esquerda da palavra de memória no endereço 0x001?

Capítulo 6

Linguagem de Montagem do IAS

Um montador é uma ferramenta que converte código em linguagem de montagem para código em linguagem de máquina. A Figura 6.1 mostra um trecho de programa representado na linguagem de montagem (a) e na linguagem de máquina (b) do computador do IAS.

| | | |
|---|---------------|----------------|
| 1 | LOAD M(0x102) | 01 10 20 B1 03 |
| 2 | MUL M(0x103) | 0A 00 02 11 02 |
| 3 | LOAD MQ | |
| 4 | STOR M(0x102) | |
| 5 | (a) | (b) |

Figura 6.1: Trecho de programa em linguagem de montagem (a) e em linguagem de máquina (b) do computador do IAS.

O trecho de código da Figura 6.1 carrega o valor armazenado no endereço 0x102 da memória no registrador AC, multiplica pelo valor armazenado no endereço 0x103 da memória e armazena a parte baixa do resultado no endereço 0x102 da memória. Para converter o código em linguagem de montagem acima para o código em linguagem de máquina, o montador pode ler as linhas do programa em linguagem de montagem uma a uma e para cada linha:

- mapear o mnemônico da instrução (ex: LOAD M(0x102)) para o código da operação correspondente (ex: 01);
- ler o parâmetro da instrução (ex: 0x102).
- compor a instrução de 20 *bits* (ex: 0A 10 2), sendo os 8 primeiros *bits* da instrução o código da operação e os 12 últimos *bits* da instrução o parâmetro lido.

- adicionar a instrução ao final do arquivo de saída.

6.1 A diretiva .org

No exemplo da Figura 6.1 não fica claro onde cada instrução montada será armazenada na memória. Por exemplo, onde deve ser colocada a instrução `LOAD M(0x102)`? Essa informação pode ser fornecida pelo programador (ou compilador) no programa em linguagem de montagem através da diretiva `.org`. Esta diretiva informa ao montador o endereço de memória onde o montador deve iniciar (ou continuar) a geração do código. O trecho de código a seguir mostra um exemplo de uso da diretiva `.org`. Neste trecho, o código após a diretiva `.org 0x000` será despejado na memória a partir do endereço `0x000`, enquanto que o código listado após a diretiva `.org 0x020` será despejado na memória a partir do endereço `0x020`. Observe que o mapa de memória¹ possui palavras nos endereços `0x000` e `0x001` e uma palavra no endereço `0x020`.

| | | | | | | | |
|----|---------------------------------|-----------------|----|----|----|----|----|
| 1 | <code>.org 0x000</code> | 000 | 01 | 10 | 20 | B1 | 03 |
| 2 | <code>LOAD M(0x102)</code> | 001 | 0A | 00 | 00 | D0 | 20 |
| 3 | <code>MUL M(0x103)</code> | | | | | | |
| 4 | <code>LOAD MQ</code> | 020 | 21 | 10 | 20 | 00 | 00 |
| 5 | <code>JUMP M(0x020,0:19)</code> | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | <code>.org 0x020</code> | | | | | | |
| 8 | <code>STOR M(0x102)</code> | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| 10 | Ling. de Montagem | Mapa de memória | | | | | |

6.2 A diretiva .word

O código da Figura 6.1 carrega e multiplica os valores armazenados nas palavras de memória associadas aos endereços `0x102` e `0x103`. O resultado da multiplicação é armazenado no endereço `0x102` da memória. Note que o programa da Figura 6.1 não especifica o valor inicial dessas posições de memória. A diretiva `.word` é uma diretiva que auxilia o programador a adicionar dados à memória. Para adicionar um dado, basta inserir a diretiva `.word` e um valor de 40 *bits* no programa. O trecho de código a seguir mostra como esta diretiva pode ser utilizada para adicionar dados à memória.

| | | | | | | | |
|---|-------------------------|-----|----|----|----|----|----|
| 1 | <code>.org 0x102</code> | 000 | 01 | 10 | 20 | B1 | 03 |
| 2 | <code>.word 0x1</code> | 001 | 0A | 00 | 00 | D0 | 00 |
| 3 | <code>.word 10</code> | | | | | | |

¹Mapa de memória é uma lista de pares <endereço,valor> que especifica o valor a ser atribuído a cada palavra da memória na inicialização do simulador. Note que os valores podem representar instruções ou dados.

| | | | |
|----|--------------------|-----------------|----------------|
| 4 | | 102 | 00 00 00 00 01 |
| 5 | .org 0x000 | 103 | 00 00 00 00 0A |
| 6 | LOAD M(0x102) | | |
| 7 | MUL M(0x103) | | |
| 8 | LOAD MQ | | |
| 9 | JUMP M(0x000,0:19) | | |
| 10 | | | |
| 11 | Ling. de Montagem | Mapa de memória | |

Como vimos antes, a diretiva `.org 0x102` é utilizada para informar ao montador que as instruções e dados provenientes de comandos subsequentes a esta diretiva devem ser despejados na memória a partir do endereço `0x102`. No caso do exemplo anterior, a diretiva `.word 0x1` é o próximo comando, portanto, o montador adicionará o dado `00 00 00 00 01` no endereço `0x102` da memória. A diretiva `.word` subsequente toma como argumento um número na representação decimal (note a ausência do “0x”). Nesse caso, o montador converte este valor para representação hexadecimal (`00 00 00 00 0A`) e adiciona o dado ao mapa de memória. Note que esta palavra é adicionada na próxima palavra da memória, ou seja, no endereço `0x103`.

6.3 Rótulos

Rótulos são anotações no código que serão convertidas em endereços pelo montador. A sintaxe de um rótulo é uma palavra terminada com o caractere “:” (dois pontos). As seguintes linhas de código mostram exemplos de rótulos:

```

1 laco:
2 var_x:

```

Rótulos podem ser utilizados para especificar um local no código para onde uma instrução de desvio deve saltar. O código abaixo utiliza um rótulo (`laco:`) para representar o alvo de uma instrução de salto.

```

1 laco:
2   LOAD M(0x100)
3   SUB  M(0x200)
4   JUMP M(laco)

```

Durante a montagem do programa, o montador associará o rótulo `laco:` a um endereço de memória e o campo endereço da instrução `JUMP` será preenchido com este endereço.

Rótulos também podem ser utilizados para especificar um local na memória que contenha um dado. Por exemplo, podemos associar os endereços `0x100` e

0x200 aos rótulos `var_x` e `var_y` e referenciar os rótulos em vez dos endereços nas instruções do programa. O exemplo a seguir mostra um trecho de código onde o rótulo `var_x` é associado ao endereço 0x100 e o rótulo `var_y` é associado ao endereço 0x200.

```

1 .org 0x000
2 laco:
3   LOAD M(var_x)
4   SUB  M(var_y)
5   JUMP M(laco)
6 .org 0x100
7 var_x:
8 .org 0x200
9 var_y:

```

Observe que os rótulos podem ser utilizados em conjunto com a diretiva `.word` para declarar variáveis ou constantes. Em vez de associar um rótulo a um endereço fixo de memória, podemos declarar um rótulo e logo em seguida adicionar um dado neste endereço de memória com a diretiva `.word`, e o próximo rótulo, se usado, conterà o endereço da próxima palavra da memória. O trecho de código a seguir mostra exemplos de declaração de variáveis e constantes. Neste caso, o rótulo `var_x` será associado ao endereço de memória 0x100 e o rótulo `const1` será associado ao endereço de memória 0x101.

| | | | |
|----|-----------------------|-----|-----------------|
| 1 | .org 0x000 | 000 | 01 10 00 61 01 |
| 2 | laco: | 001 | 0D 00 00 00 00 |
| 3 | LOAD M(var_x) | | |
| 4 | SUB M(const1) | 100 | 00 00 00 00 09 |
| 5 | JUMP M(laco) | 101 | 00 00 00 00 01 |
| 6 | | | |
| 7 | .org 0x100 | | |
| 8 | var_x: | | |
| 9 | .word 00 00 00 00 09 | | |
| 10 | const1: | | |
| 11 | .word 00 00 00 00 01 | | |
| 12 | | | |
| 13 | Linguagem de Montagem | | Mapa de memória |

Como mencionamos antes, rótulos são convertidos para endereços. Como endereços são números naturais, eles também podem ser utilizados em conjunto com a diretiva `.word` para inicializar posições de memória. O trecho de código a seguir mostra um exemplo onde o rótulo `vetor` é utilizado em conjunto com a diretiva `.word` para adicionar o endereço base do vetor à palavra da memória associada com o endereço do rótulo `base`. Em outras palavras, declaramos a

variável `base` e a inicializamos com o valor `0x100`, ou seja, o endereço inicial do vetor.

| | | | |
|----|-----------------------------------|-----------------|----------------|
| 1 | <code>.org 0x100</code> | 100 | 00 00 00 01 01 |
| 2 | <code>base:</code> | 101 | 00 00 00 00 00 |
| 3 | <code>.word vetor</code> | 102 | 00 00 00 00 01 |
| 4 | <code>vetor:</code> | 103 | 00 00 00 00 02 |
| 5 | <code>.word 00 00 00 00 00</code> | | |
| 6 | <code>.word 00 00 00 00 01</code> | | |
| 7 | <code>.word 00 00 00 00 02</code> | | |
| 8 | <code>fim_vetor:</code> | | |
| 9 | | | |
| 10 | Linguagem de Montagem | Mapa de memória | |

Rótulos e o processamento da entrada em linguagem de montagem em dois passos

No exemplo anterior, nós utilizamos o rótulo `vetor` na linha 3 no programa antes mesmo de ele ser declarado (na linha 4). Durante a montagem, os comandos de montagem são lidos um a um. Ao processar a diretiva `.word vetor` o montador teria que adicionar uma entrada ao mapa de memória com o valor do endereço associado ao rótulo `vetor`. Entretanto, como o montador pode inferir o valor do rótulo `vetor` se ele ainda não foi declarado no programa? A resposta é: ele não pode! Para resolver este problema, os montadores realizam o processo de montagem em dois passos:

1. No primeiro passo, o montador realiza uma montagem parcial, onde os campos endereços e os dados das diretivas `.word` são ignorados, iniciando o mapa de memória com zero. Note que, durante a montagem, o montador não precisa colocar os valores corretos no mapa de memória. Basta saber o tamanho do dado ou da instrução na memória de forma que os rótulos sejam associados aos endereços corretos.
2. No segundo passo, o montador gera um novo mapa de memória, realizando a montagem completa, com os dados corretos. Neste caso, o montador já possui uma tabela informando para cada rótulo qual o endereço da memória.

6.4 A diretiva `.align`

As instruções do computador do IAS possuem 20 *bits*, entretanto, as palavras de memória principal possuem 40 *bits*. Durante a montagem, o montador adiciona instruções uma a uma preenchendo as palavras com duas instruções cada. Todavia, a diretiva `.word` solicita ao montador para adicionar um dado de 40

bits a uma palavra da memória. O que o montador faria ao tentar montar o seguinte programa?

```

1 .org 0x000
2 laco:
3   LOAD M(var_x)
4   SUB  M(var_y)
5   JUMP M(laco)
6 var_x: .word 0x1
7 var_y: .word 0x2

```

Como vimos antes, o montador colocaria as instruções `LOAD` e `SUB` na primeira palavra da memória, no endereço `0x000` e colocaria a instrução `JUMP` (de 20 *bits*) à esquerda da segunda palavra de memória. Logo em seguida, o montador tentaria adicionar o dado `00 00 00 00 01` à memória. Mas onde este dado seria colocado? Uma opção é adicionar a primeira metade do dado (20 *bits*) à direita da instrução `JUMP` e o restante na parte esquerda da próxima palavra. Além de ser confusa, esta abordagem divide o dado em duas palavras de memória, tornando impossível a leitura do dado pelas instruções do programa.

A outra opção seria escrever zero na parte direita da palavra que já possui a instrução `JUMP` e adicionar o dado de 40 *bits* na próxima palavra da memória. Neste caso, o mapa de memória ficaria como a seguir:

```

1   000 01 00 20 60 03
2   001 0D 00 00 00 00
3   002 00 00 00 00 01
4   003 00 00 00 00 02

```

Note que a segunda palavra da memória (endereço `0x001`) possui a instrução `JUMP` (operação `0D`) à esquerda e o valor zero à direita. Enquanto que os dados `00 00 00 00 01` e `00 00 00 00 02` foram adicionados nas palavras seguintes da memória. Esta abordagem funcionaria.

Uma terceira abordagem seria não fazer a montagem, ou seja, ao encontrar uma situação dessas, o montador emitiria um mensagem de erro informando que a diretiva `.word` está tentando emitir um dado em uma posição de memória “não alinhada” a uma palavra da memória. Esta é a abordagem que o montador do computador do IAS deve tomar. Mas como fazemos para montar o programa do exemplo anterior? A resposta está na diretiva `.align N`. Esta diretiva informa ao montador para continuar a montagem a partir da próxima palavra com endereço múltiplo de `N`. O trecho de código a seguir mostra como a diretiva `.align` pode ser utilizada no programa anterior.

```

1 .org 0x000
2 laco:

```

```
3   LOAD M(var_x)
4   SUB  M(var_y)
5   JUMP M(laco)
6   .align 1
7   var_x: .word 0x1
8   var_y: .word 0x2
```

É importante notar que, se a posição atual de montagem já estiver alinhada à esquerda de um endereço que é múltiplo de N , então a diretiva `.align N` não causa nenhum efeito na montagem. O trecho de código a seguir ilustra esta situação. Neste exemplo, as duas primeiras instruções serão montadas no endereço `0x000`, as duas seguintes no endereço `0x001`. A segunda diretiva `.align 2` solicita ao montador alinhar o ponto de montagem em um endereço múltiplo de 2, entretanto, como o ponto de montagem já está alinhado à esquerda de um endereço múltiplo de 2 (`0.002`), esta diretiva também não causa nenhum efeito na montagem.

```
1   .org 0x000
2   laco:
3       LOAD M(var_x)
4       SUB  M(var_y)
5   .align 1
6       STOR M(var_x)
7       JUMP M(laco)
8   .align 2
9   var_x: .word 0x1
10  var_y: .word 0x2
```

6.5 A diretiva `.wfill`

Um vetor pode ser declarado e inicializado utilizando-se um rótulo e a diretiva `.word` para adicionar diversos valores em posições consecutivas da memória. O exemplo a seguir mostra como um vetor de 3 posições com os valores 4, 0 e 4 pode ser adicionado a um programa em linguagem de montagem:

```
1   .org 0x000
2   laco:
3       JUMP M(laco)
4   .align 1
5   vetor:
6       .word 0x4
7       .word 0x0
8       .word 0x4
```

Note que os valores foram adicionados à memória a partir do endereço 0x001, pois o endereço 0x000 contém a instrução JUMP. Apesar da diretiva `.word` nos permitir inicializar o vetor, esta tarefa se torna muito tediosa quando o tamanho do vetor é grande (por exemplo, 1000 elementos). Neste caso, para facilitar a adição de dados à memória, podemos utilizar a diretiva `.wfill N,D`. Esta diretiva preenche N palavras da memória com o dado D. O trecho de código a seguir mostra como podemos declarar um vetor com 1000 palavras inicializadas com o valor 00 00 00 00 05.

```

1 .org 0x000
2 laco:
3     JUMP M(laco)
4 .align 1
5 vetor:
6     .wfill 1000, 0x5

```

6.6 A diretiva .set

Para tornar o código mais claro e mais portátil, muitas linguagens de programação dispõem de diretivas que permitem ao programador associar valores a símbolos. Por exemplo, na linguagem C, a diretiva `#define NOME VALOR` pode ser utilizada para associar um valor a um determinado nome. O código a seguir mostra um exemplo deste uso:

```

1 #define TEMP_MAX 60
2 #define TEMP_MIN 0
3 ...
4 if (temperatura < TEMP_MIN)
5     error("Temperatura muito baixa\n");
6 else if (temperatura > TEMP_MAX)
7     error("Temperatura muito alta\n");
8 ...

```

Neste exemplo, o valor 60 foi associado ao símbolo `TEMP_MAX` e o valor 0 foi associado ao símbolo `TEMP_MIN`. Caso o valor de `TEMP_MAX` ou `TEMP_MIN` seja diferente em um sistema mais novo, o programador não precisa inspecionar todo o código modificando os valores, pois basta modificar o valor na diretiva que associa o valor ao símbolo.

A diretiva `.set NOME VALOR` é a diretiva utilizada na linguagem de montagem do computador do IAS para associar valores a nomes. O trecho de código a seguir mostra um exemplo de uso desta diretiva.

```

1 .set CODIGO 0x000          000 0D 00 00 00 00
2 .set DADOS 0x100          100 00 00 00 00 05

```

| | | |
|----|---------------------|--------------------|
| 3 | .set TAMANHO 200 | 101 00 00 00 00 05 |
| 4 | | ... |
| 5 | .org CODIGO | 1C6 00 00 00 00 05 |
| 6 | laco: | 1C7 00 00 00 00 05 |
| 7 | JUMP M(laco) | |
| 8 | | |
| 9 | .org DADOS | |
| 10 | vetor: | |
| 11 | .wfill TAMANHO, 0x5 | |
| 12 | | |
| 13 | Ling. de Montagem | Mapa de memória |

Note que esta diretiva não emite dados ou instruções ao programa gerado, ela apenas associa valores a símbolos. De fato, este programa é equivalente ao programa:

| | | |
|---|-------------------|--------------------|
| 1 | .org 0x000 | 000 0D 00 00 00 00 |
| 2 | laco: | 100 00 00 00 00 05 |
| 3 | JUMP M(laco) | 101 00 00 00 00 05 |
| 4 | | ... |
| 5 | .org 0x100 | 1C6 00 00 00 00 05 |
| 6 | vetor: | 1C7 00 00 00 00 05 |
| 7 | .wfill 200, 0x5 | |
| 8 | | |
| 9 | Ling. de Montagem | Mapa de memória |

6.7 Exercícios

6.1: Para que serve um montador?

6.2: Qual o papel da diretiva `.org`?

6.3: Por que o salto (`JUMP`) no código abaixo sempre vai para a esquerda?

| | |
|---|--------------------|
| 1 | ADD M(0x000) |
| 2 | .set INICIO, 0x000 |
| 3 | .org INICIO |
| 4 | JUMP M(INICIO) |

6.4: Diferencie as diretivas `.word` e `.wfill`.

6.5: Para que serve a diretiva de alinhamento (`.align`) no computador do IAS?

6.6: Por que não é interessante usar a diretiva `.align` no meio da área de código? (veja o exemplo abaixo)

```
1 .org 0x000
2     LOAD M(X)
3 .align 1
4     ADD M(vetor)
5     ...
```

6.7: O que é adicionado ao mapa de memória pela diretiva `.set` no código abaixo?

```
1 .org 0x000
2 .set TAMANHO, 0xC8
3     LOAD M(X)
4     ADD M(vetor)
5     STOR M(vetor)
6 .align 1
7 vetor:
8     .wfill 0xC8, 0000000001
9 X:
10    .word 0000000002
```

6.8: Qual o endereço do rótulo `x` no programa abaixo:

```
1 .org 0x000
2     LOAD M(X)
3     ADD M(vetor)
4     STOR M(vetor)
5 .align 1
6 vetor:
7     .wfill 0xC8, 0000000001
8 X:
9     .word 0000000002
```

6.9: Qual a diferença entre os seguintes trechos de código?

| | | |
|---|------------|-------------------|
| 1 | .org 0x100 | .org 0x100 |
| 2 | var_x: | var_x: |
| 3 | .org 0x200 | var_y: .org 0x200 |
| 4 | var_y: | .org 0x000 |
| 5 | .org 0x000 | laco: |
| 6 | laco: | INSTR1 |
| 7 | INSTR1 | INSTR2 |
| 8 | INSTR2 | |

6.10: Qual a diferença entre os programas em linguagem de máquina gerados a partir dos seguintes programas em linguagem de montagem?

| | | |
|---|--------------|--------------------|
| 1 | .org 0x100 | meurotulo: |
| 2 | r1: | .word 0x0110005101 |
| 3 | LOAD (0x100) | JUMP M(0x100) |
| 4 | ADD (0x101) | JUMP M(0x200) |
| 5 | JUMP (r1) | |
| 6 | JUMP (0x200) | |

6.11: Cite duas utilidades para rótulos em linguagem de montagem.

6.12: Monte o programa abaixo e produza o mapa de memória do programa em linguagem de máquina.

```

1 .set INICIO 0x000
2 .org INICIO
3 laco:
4   LOAD M(x1)
5 laco2:
6   ADD  M(x2)
7   JUMP M(cont)
8 .align 1
9 cont:
10  RSH
11  STOR M(av)
12  JUMP+ M(laco2)
13 .align 1
14 x1: .word 0000000000
15 x2: .word 0000000002
16 av: .word 0000000000
17 vm: .word x1

```

6.13: Monte o programa abaixo produza o mapa de memória do programa em linguagem de máquina.

```
1 .set INICIO 0x100
2 .org INICIO
3   LOAD M(x2)
4 laco:
5   LOAD M(x1)
6   ADD  M(x2)
7   JUMP M(cont)
8   SUB  M(av)
9 .align 1
10 cont:
11   LSH
12   STOR M(av)
13   JUMP+ M(laco)
14 .align 1
15 x1: .word x2
16 x2: .word x1
17 av: .word AABBCDDEE
18 vm: .word av
```

Apêndice A

Lista de instruções do IAS

| Tipo da Instrução | Código da operação | Representação Simbólica | Descrição |
|-------------------------|--------------------|-------------------------|--|
| Transferência de Dados | 00001010 | LOAD MQ | AC := MQ |
| | 00001001 | LOAD MQ,M(X) | MQ := Mem[X] |
| | 00100001 | STOR M(X) | Mem[X] := AC |
| | 00000001 | LOAD M(X) | AC := Mem[X] |
| | 00000010 | LOAD -M(X) | AC := -(Mem[X]) |
| | 00000011 | LOAD M(X) | AC := Mem[X] |
| Salto incondicional | 00001101 | JUMP M(X,0:19) | Salta para a instrução à esquerda da palavra contida no endereço X da memória |
| | 00001110 | JUMP M(X,20:39) | Salta para a instrução à direita da palavra contida no endereço X da memória |
| Salto condicional | 00001111 | JUMP+M(X,0:19) | Se $AC \geq 0$ então salta para a instrução à esquerda em X |
| | 00010000 | JUMP+M(X,20:39) | Se $AC \geq 0$ então salta para a instrução à direita em X |
| Aritmética | 00000101 | ADD M(X) | AC := AC + Mem[X] |
| | 00000111 | ADD M(X) | AC := AC + Mem[X] |
| | 00000110 | SUB M(X) | AC := AC - Mem[X] |
| | 00001000 | SUB M(X) | AC := AC - Mem[X] |
| | 00001011 | MUL M(X) | AC:MQ := MQ \times Mem[X] |
| | 00001100 | DIV M(X) | MQ := AC / Mem[X] |
| | | | AC := AC % Mem[X] |
| | 00010100 | LSH | AC := AC << 1 |
| | 00010101 | RSH | AC := AC >> 1 |
| Modificação de endereço | 00010010 | STOR M(X,8:19) | Move os 12 <i>bits</i> à direita de AC para o campo endereço da instrução à esquerda da palavra X na memória |
| | 00010011 | STOR M(X,28:39) | Move os 12 <i>bits</i> à direita de AC para o campo endereço da instrução à direita da palavra X na memória |