#### Última alteração: 19/Março/2013 por Everton Alceu Carara

PROCESSADOR MULTI-CICLO - R8

# CARACTERÍSTICAS GERAIS

* Arquitetura load-store: as operações lógico/aritméticas são executadas entre registradores, e as operações de acesso à memória só executam ou uma leitura (*load*) ou uma escrita (*store*).
* Banco de registradores: devido à característica *load/store*, o processador deve ter um conjunto grande de registradores, para reduzir o número de acessos à memória (em processadores reais este acesso externo representa perda de desempenho). Esta característica difere da arquitetura baseada em acumulador, a qual mantém todos os dados em memória, realizando as operações aritméticas entre um conteúdo que está em memória e um ou poucos registrador(es) especial (ais), denominado(s) acumulador(es). Considere o exemplo: for(i=0; i<1000; i++). Neste exemplo, caso 'i' esteja armazenado em memória teremos 2000 acessos à memória, realizando leitura e escrita a cada iteração. Caso tenhamos o valor de 'i' armazenado em registrador, apenas operamos sobre o registrador, sem acessos à memória externa durante a maior parte do tempo!
* Formato regular para as instruções: todas as instruções possuem exatamente o mesmo tamanho, e ocupam 1 palavra de memória. A instrução contém o código da operação e o(s) operando(s), caso exista(m).
* Poucos modos de endereçamento.
* Bloco de controle *hardwired*, e não micro-programado.

Assim, este processador é praticamente uma máquina RISC, faltando contudo algumas características que existem em qualquer máquina RISC, tal como *pipelines*.

Características específicas deste processador multi-ciclo:

* dados e endereços são de 16 bits (processador de 16 bits).
* endereçamento de memória a palavra (cada endereço corresponde ao identificador de uma posição de memória onde residem 16 bits de conteúdo).
* banco de registradores com 16 registradores de uso geral.
* 4 *flags* de estado: negativo (n), zero (z), carry (c), overflow (v).
* execução das instruções em 3 ou 4 ciclos, ou seja, CPI (*Cycles Per Instruction*) entre 3 e 4.

# CONJUNTO DE INSTRUÇÕES

O conjunto de instruções do processador realiza as seguintes operações:

* Operações lógicas e aritméticas binárias (com 2 operandos): soma, subtração, AND, OR e XOR.
* Operações lógicas e aritméticas com constantes curtas (8 bits): soma, subtração.
* Operações unárias (com 1 operando): deslocamento para direita ou esquerda e inversão (NOT).
* Carga de metade de um registrador com uma constante curta (LDL e LDH).
* Inicialização do apontador de pilha (LDSP) e retorno de subrotina (RTS).
* NOP (*no operation*): operação vazia (útil para laços de espera e reserva de espaço).
* HALT: suspende a execução de instruções.
* *Load*: leitura de posição de memória para um registrador (LD).
* *Store*: armazenamento de dado de um registrador em uma posição de memória (ST).
* Saltos e chamada de subrotina com endereçamento *relativo* com deslocamento curto ou longo (contido em um registrador) e endereçamento *absoluto* (a registrador).
* Inserção e remoção de valores no/do topo da pilha (PUSH e POP).

**TABELA DE INSTRUÇÕES DO PROCESSADOR R8:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Instrução | **FORMATO DA INSTRUÇÃO** | | | | |  | |
| **15 – 12** | **11 - 8** | | **7 - 4** | **3 - 0** | | AÇÃO ; *flags* |
| ADD Rt, Rs1,Rs2 | **0** | R *target* | | R source1 | R source2 | | Rt  Rs1 + Rs2; *wnz*; *wcv* |
| SUB Rt, Rs1,Rs2 | **1** | R *target* | | R source1 | R source2 | | Rt  Rs1 - Rs2; *wnz*; *wcv* |
| AND Rt, Rs1,Rs2 | **2** | R *target* | | R source1 | R source2 | | Rt  Rs1 *and* Rs2; *wnz* |
| OR Rt, Rs1,Rs2 | **3** | R *target* | | R source1 | R source2 | | Rt  Rs1 *or* Rs2; *wnz* |
| XOR Rt, Rs1,Rs2 | **4** | R *target* | | R source1 | R source2 | | Rt  Rs1 *xor* Rs2; *wnz* |
|  |  | | | | |  | |
| ADDI Rt, *cte8* | **5** | R *target* | | Constante (*unsigned*) | | | Rt  Rt + ("00000000" & constante); *wnz*; *wcv* |
| SUBI Rt, *cte8* | **6** | R *target* | | Constante (*unsigned*) | | | Rt  Rt - ("00000000" & constante); *wnz*; *wcv* |
| LDL Rt, *cte8* | **7** | R *target* | | Constante | | | Rt  RtH & constante |
| LDH Rt, *cte8* | **8** | R *target* | | Constante | | | Rt  constante & RtL |
|  | | | | | | | |
| LD Rt, Rs1,Rs2 | **9** | R *target* | | R source1 | R source2 | | Rt  PMEM (Rs1+Rs2) |
| ST Rt, Rs1,Rs2 | **A** | R *target* | | R source1 | R source2 | | PMEM (Rs1+Rs2)  Rt |
|  | | | | | | | |
| SL0 Rt, Rs1 | **B** | R *target* | | R source1 | **0** | | Rt  Rs1[14:0] & 0 ; *wnz* |
| SL1 Rt, Rs1 | **B** | R *target* | | R source1 | **1** | | Rt  Rs1[14:0] & 1 ; *wnz* |
| SR0 Rt, Rs1 | **B** | R *target* | | R source1 | **2** | | Rt  0 & Rs1 [15:1]; *wnz* |
| SR1 Rt, Rs1 | **B** | R *target* | | R source1 | **3** | | Rt  1 & Rs1 [15:1]; *wnz* |
| NOT Rt, Rs1 | **B** | R *target* | | R source1 | **4** | | Rt  not (Rs1) ; *wnz* |
|  | | | | | | | |
| NOP | **B** | - | | - | **5** | | nenhuma ação |
| HALT | **B** | - | | - | **6** | | suspende seqüência de ciclos de busca e execução |
| LDSP Rs1 | **B** | **0** | | R source1 | **7** | | SP  Rs1 (inicializa o apontador de pilha) |
| LDISRA Rs1 | **B** | 1 | | R source1 | **7** | | regISR SP  Rs1 (inicializa o apontador de ISR) |
| LDTSRA Rs1 | **B** | 2 | | R source1 | **7** | | regTSR SP  Rs1 (inicializa o apontador de TSR) |
| RTS | **B** | - | | - | **8** | | PC PMEM(SP+1) ; SPSP+1 |
| RTI | **B** | - | | **0** | **B** | | PC PMEM(SP+1) ; SPSP+1; InterruptStatus 0 |
| POP Rt | **B** | R *target* | | - | **9** | | Rt PMEM(SP+1) ; SPSP+1 |
| POPF | **B** | - | | **2** | **B** | | regFlags  PMEM(SP+1) ; SPSP+1 |
| PUSH Rt | **B** | R *target* | | - | **A** | | PMEM(SP)Rt ;  SPSP-1 |
| PUSHF | **B** | - | | **1** | **B** | | PMEM(SP) x”000” & regFlags;  SPSP-1 |
| JUMP\_INTR | **B** | **0** | | **F** | **B** | | PMEM(SP)PC ; SPSP-1; PC regISR;  InterruptStatus 1 |
| MFH Rt | **B** | R *target* | | **3** | **B** | | *Rt regHIGH* |
| MFL Rt | **B** | R *target* | | **4** | **B** | | *Rt regLOW* |
| MFC Rt | **B** | R *target* | | **5** | **B** | | *Rt causeRegister* |
| SWI | **B** | **0** | | **E** | **B** | | PMEM(SP)PC ; SPSP-1; PC regTSR;  trapStatus 1  regCause 8 |
|  | | | | | | | |
| JMPR Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **0** | | PC  PC + Rs1 (não depende de flag de estado) |
| JMPNR Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **1** | | if (*n* =1) PC  PC + Rs1 |
| JMPZR Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **2** | | if (*z* =1) PC  PC + Rs1 |
| JMPCR Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **3** | | if (*c* =1) PC  PC + Rs1 |
| JMPVR Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **4** | | if (*v* =1) PC  PC + Rs1 |
| JMP Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **5** | | PC  Rs1 (não depende de flag de estado) |
| JMPN Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **6** | | if (*n* =1) PC  Rs1 |
| JMPZ Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **7** | | if (z =1) PC  Rs1 |
| JMPC Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **8** | | if (*c* =1) PC  Rs1 |
| JMPV Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **9** | | if (*v* =1) PC  Rs1 |
| JSRR Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **A** | | PMEM(SP)PC ; SPSP-1; PC PC+ Rs1 |
| JSR Rs1 | **C** | 0 | | R source1 | **B** | | PMEM(SP)PC ; SPSP-1; PC Rs1 |
| MUL Rt, Rs1 | **C** | *1* | | R source1 | **R source2** | | *RegHIGH (Rs1\* Rs2) [31:16]*  *RegLOW (Rs1 \* Rs2) [15:0]* |
| DIV Rt, Rs1 | **C** | *2* | | R source1 | **R source2** | | *RegHIGH (Rs1 % Rs2)*  *RegLOW (Rs1 / Rs2)* |
|  |  | | | | |  | |
| JMPD desloc | **D** | **-** | Deslocamento (10 bits) | | | | PC  PC + **ext\_sinal &** desloc |
| JMPND desloc | **E** | **0** | Deslocamento (10 bits) | | | | if (*n* =1) PC  PC + **ext\_sinal &** desloc |
| JMPZD desloc | **E** | **1** | Deslocamento (10 bits) | | | | if (z=1) PC  PC + **ext\_sinal &** desloc |
| JMPCD desloc | **E** | **2** | Deslocamento (10 bits) | | | | if (*c* =1) PC  PC + **ext\_sinal &** desloc |
| JMPVD desloc | **E** | **3** | Deslocamento (10 bits) | | | | if (*v* =1) PC  PC + **ext\_sinal &** desloc |
|  |  | | | | |  | |
| JSRD desloc | **F** | Deslocamento (12 bits) | | | | PMEM(SP)PC ; SPSP-1; PC PC + **ext\_sinal &** desloc | |

PS: A instrução JMP\_INTR não é montada e é apenas utilizada pelo processador para executar o pulo para o tratador de interrupção (INTERRUPT\_HANDLER\_ADDR). Forçar o processador a executar esta instrução executa um pseudo NOP.

* As seguintes convenções foram utilizadas na tabela:

**RtH: 8 bits mais significativos de Rt**

**RtL: 8 bits menos significativos de Rt**

**regHIGH: registrador de auxilio a operações de divisão e multiplicação**

**regLOW: registrador de auxilio a operações de divisão e multiplicação**

**&: concatenação de vetores de bits**

**: atribuição de valor a registrador ou posição de memória**

**PMEM(x): conteúdo de posição de memória cujo endereço é x**

**Rt : R*target* [destino]**

**Rs1 : Rsource1**

**Rs2 : Rsource2**

***wnz*: ativam o armazenamento dos *flags* de estado negativo e zero**

***wcv*: ativam o armazenamento dos *flags* de estado *carry* e *overflow***

**INTERRUPT\_HANDLER\_ADDR: endereço de memória contendo o tratador de interrupções**

**interruptStatus: registrador que indica o estado de tratamento de interrupção**

**regISRA: registrador que aponta para endereço do interruption handler**

# REGISTRADORES DO BLOCO DE DADOS

O processador conta com o seguinte conjunto de registradores de 16 bits:

* IR (*instruction register*): armazena o código de operação (*opcode*) da instrução atual e o(s) operando(s) desta.
* PC (*program counter*): é o contador de programa.
* SP (*stack pointer*): armazena o endereço do topo da pilha, controla a chamada e retorno de subrotinas. Deve ser inicializado a cada programa com a instrução LDSP (carrega endereço do topo da pilha).
* 16 registradores de propósito geral, R0 a R15. O banco de registradores tem uma porta de escrita e duas de leitura. Isto significa que é possível escrever em apenas um registrador por vez, porém é possível fazer duas leituras simultâneas, colocando o conteúdo de um registrador no barramento de saída *SOURCE1* (S1) e o conteúdo de outro registrador (ou o mesmo) no barramento de saída *SOURCE2* (S2).
* 4 *bits* (*flags*) de estado, denominados ***n*** (negativo)***, z*** (zero)***, c*** (carry) e ***v*** (overflow), utilizados para controle dos saltos e chamadas a subrotinas. O estado dos *flags*, 0 ou 1, é determinado durante as operações lógicas/aritméticas.

Há também registradores temporários, mostrados posteriormente, os quais são utilizados durante a execução das instruções. Os valores lidos do banco de registradores são armazenados nos registradores *RA* e *RB*. O valor obtido pela execução de uma dada operação lógico-aritmética é armazenado no registrador *RULA.* O programador não tem acesso a estes registradores.

# RELAÇÃO ENTRE O PROCESSADOR E A MEMÓRIA EXTERNA

A Figura 1a ilustra a relação entre o processador e a memória externa. O processador recebe do mundo externo dois sinais de controle: *clock*, que sincroniza os eventos internos ao processador; e *reset*, que inicializa o processador para iniciar a execução de instruções a partir do endereço zero da memória.

O bloco de controle (*control path*) gera a microinstrução (inst) para a execução das instruções. A microinstrução é responsável por comandar as ações que serão executadas no bloco de dados (*data path*), como seleção de registradores, operação que a ULA executará e acesso à memória externa.

O bloco de dados envia para o bloco de controle a instrução corrente (conteúdo do ***IR***) e os qualificadores de estado (***flags***). O bloco de dados também é responsável pela comunicação com a memória externa. Os sinais para a troca de informações com a memória são: *data\_in* (barramento de 16 bits para leitura de dados), *data\_out* (barramento de 16 bits para escrita de dados) e *address* (barramento de 16 bits para endereçar a memória).

O controle de acesso à memória é feito pelo bloco de controle, através dos sinais *ce* e *rw.* O sinal *ce* (*ce = 1*) indica se está em curso uma operação com a memória e o sinal *rw* indica se esta operação é de escrita (*rw = 0*) ou de leitura (*rw = 1*).

Os blocos de dados e controle operam em fase (mesma borda do sinal de clock). Em uma borda do clock (por exemplo, subida) o bloco de controle gera a micro-instrução, e na borda seguinte (subida) o bloco de dados modifica os registradores.

A Figura 1b representa o nível mais alto da hierarquia do processador, através da linguagem de descrição de hardware VHDL. Nesta figura os blocos estão conectados entre si por *sinais*, sendo instanciados pelo comando *port map*.



|  |  |
| --- | --- |
| (a) Diagrama de blocos processador-memória | (b) Descrição VHDL do nível mais alto da hierarquia da descrição do processador |

Figura 1 - Relação entre o processador e a memória externa.

# EXECUÇÃO DAS INSTRUÇÕES NO BLOCO DE DADOS

A execução das instruções neste processador requer 3 ou 4 ciclos de clock (a única exceção é a instrução *halt*, que é executada em dois ciclos).

Os ciclos são assim denominados:

* **Ciclo 1 : busca da instrução.** Comum a todas as instruções.
* **Ciclo 2 : decodificação da instrução/leitura de registradores.** Comum a todas as instruções, exceto o *halt*.
* **Ciclo 3 : operação com a ula.** Comum a todas as instruções, exceto o *halt*.
* **Ciclo 4 : execução.** Conforme o tipo de operação realizada.

## Ciclo de Busca da Instrução

* Busca a instrução endereçada pelo registrador *PC* na memória, grava a instrução no registrador *IR* e incrementa o *PC*:

**IR  PMEM(PC); PC++;**

* A Figura 2 ilustra os componentes de hardware necessários para a execução do ciclo de busca da instrução.



Figura 2 - Hardware para executar a busca.

## Ciclo de Decodificação da instrução/Leitura de Registradores

* No segundo ciclo é verificada a instrução buscada e são lidos os registradores que são operandos (fontes) para as instruções, **independentemente se a instrução usa ou não os dois registradores**, *source1* (S1) e *source2* (S2). Os registradores fonte são armazenados nos registradores *RA* e *RB*.
* O registrador *source1* é endereçado pelos bits 7 a 4 do registrador IR.
* O registrador *source2* pode ser endereçado ou pelos bits 3 a 0 ou pelos bits 11 a 8 do registrador IR. Quando a operação envolve o registrador destino (*target*) como fonte, endereça-se o *source2* pelos bits 11 a 8. Exemplo: ADDI, onde é somado a um dado registrador uma constante e armazena-se a soma neste mesmo registrador.
* A Figura 3 ilustra os componentes de hardware necessários para a leitura dos registradores fonte.



Figura 3 - Hardware para a leitura dos registradores fonte.

## Ciclo de Operação com a ULA

* O ciclo de operação com a ULA também é comum a todas as operações (exceto instrução *halt*). Dada a variedade de instruções, necessita-se inserir multiplexadores nas entradas da ULA a fim de selecionar corretamente os operandos.
* O resultado da operação com a ULA é armazenado no registrador *RULA*, e conforme a operação executada, armazena-se os *flags* de estado (n, z, c, v).
* A Figura 4 ilustra os componentes de hardware necessários para a operação com a ULA.



Figura 4 - Hardware para a operação com a ULA.

* A tabela abaixo define as entradas da ULA, *opA* e *opB*, conforme a instrução.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Instruções** | **opA** | **opB** |
| ADD, SUB, AND, OR, XOR, LD, ST, SHIFTS, NOT, LDSP | RA | RB |
| ADDI, SUBI, LDL, LDH | IR | RB |
| RTS, POP | - | SP |
| Saltos e chamadas de sub-rotinas relativos ao PC | RA | PC |
| Saltos e chamadas de sub-rotinas absolutos | RA | - |
| Saltos e chamadas de sub-rotinas com deslocamento curto | IR | PC |

## Ciclo de Execução da Instrução

### Execução das instruções lógico-aritméticas e endereçamento imediato.

* O quarto ciclo de clock das operações lógico-aritméticas grava o resultado do registrador *RULA* no banco de registradores, conforme o endereço do registrador destino. Este ciclo é chamado de *write-back*.
* A Figura 5 ilustra a execução do quarto ciclo de clock para as operações lógico-aritméticas.



Figura 5 - Fluxo de execução de instruções lógico-aritméticas.

* A operações com modo de endereçamento imediato implicam em um dado registrador destino (*target*) receber o resultado de uma dada operação entre o próprio registrador *target* e uma constante de 8 bits. As operações em modo de endereçamento imediato são:
* carga da parte alta de um registrador (LDH): *Rt  constante & RtL* (o registrador *target* recebe a constante na parte alta e mantém a parte baixa inalterada).
* carga da parte baixa de um registrador (LDL): *Rt  RtH & constante* (o registrador *target* recebe a constante na parte baixa e mantém a parte alta inalterada)*.*
* soma/subtração em modo imediato: soma/subtração do conteúdo de um dado registrador a uma constante de 8 bits: *Rt  Rt +/- constante*. **Importante**: a execução da instrução implica completar com zeros os 8 bits mais significativos da constante para gerar um valor de 16 bits **positivo**.

**Importante**: para inicializar um registrador com uma constante de 16 bits devemos utilizar 2 instruções, LDH e LDL. Para ler/escrever um dado contido em um endereço (16 bits) são necessárias 3 instruções em linguagem de montagem: as duas primeiras carregam em um registrador a parte alta e baixa de um endereço (LDH e LDL, respectivamente) e a terceira instrução realiza a leitura/escrita (LD ou ST).

* Exemplo:

XOR R0,R0,R0 ; zera o registrador R0  
LDH R1, #03H ; #: indica valor imediato. H: indica que o valor está em hexadecimal.  
LDL R1, #27H ; armazena no registrador R1 o valor 0327H  
LD R5, R1, R0 ; armazena em R5 o conteúdo do endereço armazenado em R1+R0

### Execução da instrução de leitura de dados da memória (LD)

* Registrador *target* recebe o conteúdo da posição de memória endereçada pela soma dos conteúdos de dois registradores fonte (*sources*): *Rt  PMEM(Rs1 + Rs2)*. Um dos registradores pode ser considerado como registrador base e o segundo como registrador contendo o deslocamento (*offset*).
* No quarto ciclo de clock o registrador *RULA* endereça a memória, e o dado lido é gravado no banco de registradores, no registrador destino endereçado por IR[11:8].
* Uma possível organização do bloco de dados para a execução da instrução de leitura na memória é apresentada na Figura 6.



Figura 6 - Fluxo de execução de instrução de leitura na memória.

### Execução da instrução de escrita em memória (ST)

* Posição de memória endereçada pela soma dos conteúdos de dois registradores fonte (*sources*) recebe o conteúdo do registrador destino (*target*): *PMEM(Rs1 + Rs2)  Rt*.
* No quarto ciclo de clock o registrador endereçado por IR[11:8] é lido, gravando-se o conteúdo deste no endereço definido por *RULA*.
* Endereça a memória, gravando-se o conteúdo do registrador *target* (S2) na memória.
* Uma possível organização do bloco de dados para a execução da instrução de escrita na memória é apresentada na Figura 7.



Figura 7 - Fluxo de execução de instrução de escrita na memória.

### Operações de saltos incondicionais e condicionais

* O endereço destino do salto foi calculado no terceiro ciclo de clock, estando este armazenado no registrador *RULA*.
* Caso seja um salto condicional e o respectivo *flag* for igual a zero, a instrução é finalizada no terceiro ciclo (PC não é alterado).
* Caso o salto deva ser executado, o PC deve receber o conteúdo de *RULA.*
* Uma possível organização do bloco de dados para a execução dos saltos é apresentada na Figura 8.



Figura 8 - Fluxo de execução de saltos incondicionais/condicionais.

### Operações de chamada a subrotina

As operações que manipulam o registrador SP (*Stack Pointer*) são: inserção/remoção de registrador na pilha (PUSH/POP), chamadas a subrotinas (JSR, JSRR, JSR), inicialização do registrador SP (LDSP) e retorno de subrotina (RTS). A

ilustra o funcionamento da pilha.



Figura 9 - Operação da pilha.

* O programa é armazenado do endereço *0* até um endereço *N*, logo, os endereços de programa crescem com os endereços da memória.
* A pilha cresce no sentido **inverso** da memória (*Patterson, ed. Bras. Página 71-72*). A razão para isto é não interferir com a área de dados e programa.
* O conteúdo do registrador SP **sempre aponta para a primeira posição livre da pilha**.

A execução da chamada a subrotina é feita da seguinte forma:

* O endereço destino do salto foi calculado no terceiro ciclo de clock, estando este armazenado no registrador *RULA*.
* Caso seja um salto condicional e o respectivo *flag* for igual a zero, a instrução é finalizada no terceiro ciclo (PC não é alterador).
* Caso o salto deva ser executado, o PC é armazenado no topo da pilha antes de receber o conteúdo de *RULA* e decrementa-se o SP:

**PMEM(SP)PC;  
SPSP-1;  
PC *resultado de RULA (PC+offset* ou *RS1* ou *PC+RS1*)**

* Uma possível organização do bloco de dados para a execução dos saltos é apresentada na Figura 10.



Figura 10 - Fluxo de execução para chamada a subrotina.

* A execução da instrução PUSH é semelhante à chamada de subrotina:

**PMEM(SP)Rt;** (armazenado em *RB*) **SPSP-1;**

### Operações de retorno de subrotina (RTS) e recuperação de registrador do topo da pilha (POP)

* O quarto ciclo das instruções RTS/POP implica endereçar a memória com o valor do registrador *RULA* (ciclo 3: RULA←SP+1), gravando o resultado da leitura ou no registrador PC (RTS) ou no registrador destino (POP). O registrador SP é atualizado com o valor do registrador *RULA* (SP+1).

# ORGANIZAÇÃO DO BLOCO DE DADOS

Unindo as diversas figuras anteriores, obtemos o diagrama da Figura 11. Alguns elementos adicionais foram inseridos para o controle de subrotinas, devido à necessidade de manipular o registrador SP (*Stack Pointer*). O Bloco de Dados envia ao Bloco de Controle o conteúdo do registrador IR e o conteúdo dos *flags* de estado.

O bloco de dados necessita ***18***sinais de controle, organizados em 4 classes:

* habilitação de escrita em registradores (8): ***wPC***, ***wSP***, ***wIR***, ***wAB***, ***wRula***, ***wRegs***, ***wnz***, ***wcv***.
* controle de leitura/escrita na memória externa (2): ***ce*** e ***rw***.
* controle de multiplexadores (7): ***mPC*** (origem dos dados para o PC), ***mSP*** (origem dos dados para o SP), ***mAddr*** (qual registrador endereça a memória), ***mRegs*** (origem dos dados para o banco de registradores), ***mS2*** (qual campo do IR seleciona o segundo operando), ***ma*** (origem dos dados para o primeiro operando da ULA), ***mb*** (origem dos dados para o segundo operando da ULA).
* a operação que a unidade lógica-aritmética executa (1): ***inst***.

Nesta figura estão representados todos os **18** sinais que o bloco de controle deve gerenciar (em verde, itálico). Os sinais de clock e reset não estão representados, porém são utilizados por todos os registradores.

Figura 11 - Bloco de dados completo (mais memória externa).

A Figura 12 ilustra a organização do banco de registradores, sob forma de um diagrama de blocos. Observar que o multiplexador de seleção do segundo registrador fonte (S2) está dentro do bloco "banco de registradores".



Figura 12 - Diagrama em blocos do banco de registradores de uso geral.

# BLOCO DE CONTROLE

Pra executar qualquer instrução neste processador, é necessário definir uma máquina de estados. A Figura 13 ilustra esta máquina de estados, onde o próximo estado é função do estado atual e da instrução armazenada no registrador IR. Também se indica nesta Figura quais registradores são alterados em cada estado, assim como quando há acesso à memória (*leRAM* e *wrtieRAM*).



* FI1 – Formato de Instrução tipo 1 – Registrador *target* **não** é fonte (Ex: ADD R1, R2, R3)
* FI2 - Formato de Instrução tipo 2 - Registrador *target* **também é**  fonte (Ex: ADDI R1, #2)
* *Salta*: avaliação das 15 instruções de salto
* *Subrotina*: JSR, JSRR, JSRD
* \* - a escrita nos *flags* no estado *Sula* depende do tipo de operação

Figura 13 - Máquina de estados de controle.

A função dos 13 diferentes estados é:

* Sfetch: primeiro ciclo de clock, busca a instrução;
* Srreg: segundo ciclo de clock, decodificação da instrução e leitura dos registradores fontes;
* Shalt: segundo ciclo de clock, finaliza a execução e aguarda reset;
* Sula: terceiro ciclo de clock, operação com a ULA;
* Swbk: quarto ciclo de clock, armazena resultado da operação da ULA no registrador destino;
* Sld: quarto ciclo de clock, busca dado da memória e armazena no registrador destino;
* Sst: quarto ciclo de clock, salva registrador destino na memória;
* Sjmp: quarto ciclo de clock, altera o PC em saltos incondicionais ou condicionais com *flag=1*;
* Ssbrt: quarto ciclo de clock, salta para subrotina;
* Spush: quarto ciclo de clock, coloca registrador no topo da pilha;
* Srts: quarto ciclo de clock, retorna de subrotina;
* Spop: quarto ciclo de clock, retira registrador do topo da pilha;
* Sldsp: quarto ciclo de clock, inicializa o registrador SP (topo da pilha);

## Decodificação das instruções / Definição da operação da ULA

A primeira ação a ser realizada no bloco de controle é a decodificação da instrução proveniente do bloco de dados.

* Como sugestão, pode-se definir no *package* da descrição do processador um tipo enumerado contendo todas as possíveis instruções do processador. Originalmente o processador contém **40** instruções, mas agrupando-se os saltos em grupos (saltoR, saltoA, saltoD), fica-se em **28** instruções.

type instrucao is

( add, sub, e, ou, oux, addi, subi, ldl, ldh, ld, st, sl0, sl1, sr0, sr1,

notA, nop, halt, ldsp, rts, pop, push, saltoR, salto, saltoD, jsrr, jsr, jsrd);

* Decodificação das instruções. Observar que para efeito de simplificação do programa os 5 saltos relativos foram agrupados em "saltaR", os 5 saltos absolutos em "saltoA" e os 5 saltos com deslocamento curto em "saltoD". Esta simplificação reduz o código VHDL que será escrito.

i <= add when ir(15 downto 12)=0 else

sub when ir(15 downto 12)=1 else

……

sr1 when ir(15 downto 12)=11 and ir(3 downto 0)=3 else

……

saltoR when ir(15 downto 12)=12 and ( ir(3 downto 0)=0 or

(ir(3 downto 0)=1 and fn='1') or (ir(3 downto 0)=2 and fz='1') or

(ir(3 downto 0)=3 and fc='1') or (ir(3 downto 0)=4 and fv='1') ) else

saltoA when ……

saltoD when …

…

jsr when ir(15 downto 12)=12 and ir(3 downto 0)=11 else

jsrd when ir(15 downto 12)=15;

uins.inst <= i; --- **\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* operacao que a ula ira' executar**

* Decodificação das instruções com formato tipo 1:

instructionFormat1 <= '1' when i=add or i=sub or i=e or i=ou or i=oux or i=notA or i=sl0 or

i=sr0 or i=sl1 or i=sr1 else

'0';

* Decodificação das instruções lógico-aritméticas do tipo 2 (Rt no lado direito da expressão):

instructionFormat2 <= '1' when i=addi or i=subi or i=ldl or i=ldh else

'0';

## Controle dos multiplexadores

Os sinais de controle dos multiplexadores (7) dependem do estado atual da máquina de controle (EA) e/ou da instrução corrente. Recomenda-se localizar os controles dos multiplexadores na Figura 11. Os sinais de controle são precedidos do sufixo "*uins.*", que designa a *record* microinstrução.

1. Controle da origem dos dados para o PC (depende do estado de controle):

uins.mPC <= "10" when EA=Sfetch else *-- na busca incrementa o PC*

"00" when EA=Srts else *-- em retorno de subrotina busca da memória*

"01"; *-- por default traz da ULA (retorno de subrotina)*

1. Controle da origem dos dados para o SP (depende apenas da instrução):

uins.mSP <= '1' when i=jsrr or i=jsr or i=jsrd or i=push else *-- pos-decremento*

'0';

1. Controle da origem dos dados para o endereçamento da memória (depende do estado de controle):

uins.mAddr <= "10" when EA=Spush or EA=Ssbrt else -- *em subrotina o SP endereça a memória*

"01" when EA=Sfetch else -- *na busca o PC endereça a memória*

"00"; -- *por default: LD/ST*

1. Controle da origem dos dados para o escrita nos registradores (depende apenas da instrução):

uins.mRegs <= '1' when i=ld or I=pop else '0'; *-- escreve nos registradores o conteúdo vindo*  
 *-- da memória*

1. Escolha do segundo operando (depende da instrução e do estado atual). O segundo fonte (*source2*) recebe o endereço do registrador destino quando for uma instrução com formato tipo 2 ou operação de escrita na memória .

uins.mS2 <= '1' when instructionFormat2='1' or i=push or EA=Sst else '0';

1. Controle da origem dos dados para a ULA (depende apenas da instrução):

*-- primeiro operando da ULA é o IR quando instrução com o formato do tipo 2 ou jump/jsr com   
-- deslocamento curto* uins.ma <= '1' when instructionFormat2='1' or i=saltoD or i=jsrd else '0';

*-- segundo multiplexador* uins.mb <= "01" when i=rts or i=pop else *-- para incrementar o SP*

"10" when i=saltoR or i=saltoA or i=saltoD or i=jsrr or i=jsr or i=jsrd else

"00" ;

**Resumindo, o bloco de controle é composto por três partes:**

1. Decodificação da instrução.
2. Controle dos multiplexadores.
3. Máquina de estados de controle, que gera os sinais de controle de escrita/leitura na memória e escrita nos diversos registradores da arquitetura.

# EXECUÇÃO DE UMA SEQÜÊNCIA DE OPERAÇÕES

A simulação da Figura 14 ilustrada a execução das 5 últimas instruções do trecho de código abaixo:

**end instrução**

**0128 7190**

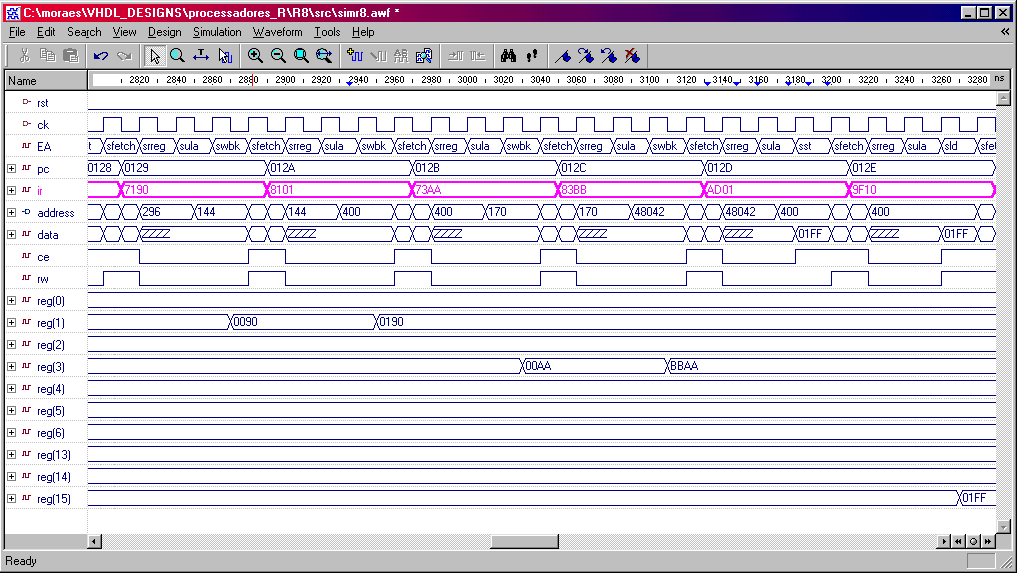
**0129 8101** ; R1  0190 (400 em decimal)

**012A 73AA**

**012B 83BB** ; R3  BBAA

**012C AD01** ; grava o conteúdo do registrador D no endereço contido no registrador 1 (190H ou 400)

**012D 9F10** ; lê o conteúdo do endereço contido no registrador 1, gravando no registrador 15



**LDL**

**LDH**

**ST**

**LD**

**GRAVA 01FF NO ENDEREÇO 400 (190H)**

**LÊ 01FF DO ENDEREÇO 400 E GRAVA EM R15**

**LDH**

**LDL**

Figura 14 - Simulação de 6 instruções.

# PROGRAMA EXEMPLO PARA TESTAR TODAS AS INSTRUÇÕES

O código objeto abaixo corresponde a um exemplo de arquivo texto que é lido pelo *test bench* durante a simulação do processador. Este arquivo contém *n* linhas, contendo cada uma 9 caracteres no formato “xxxx yyyy”, onde xxxx é o endereço com 16 bits (4 dígitos hexadecimais) e yyyy é a instrução com 16 bits (4 dígitos hexadecimais). O arquivo de teste é carregado na memória quando o reset é ativado, no início da simulação.



Recomenda-se **escrever os programas em linguagem de montagem** (*assembly*), gerando-se o código objeto automaticamente, a partir do montador/simulador.

A Figura 15 mostra a janela do simulador. A esquerda desta figura está apresentada a tabela de memória, contendo em cada linha a instrução em *assembly*, o endereço da posição da memória e o código objeto. Ao centro é inserida a tabela de símbolos, onde são apresentados o nome do símbolo, seu endereço de memória e o seu valor. A direita da figura estão localizados os registradores de uso geral e os registradores IR, PC e SP. Na parte inferior são ilustrados os botões de controle *Step*, *Run*, *Pause*, *Stop* e *Reset* e as opções de velocidade *Lento*, *Normal* e *Rápido*. Os qualificadores de estado encontram-se na parte inferior à direita.



Figura 15 - Simulador R8.

A ferramenta de montagem tem como entrada o nome do programa em linguagem descrito em linguagem *assembly* (<file>.asm) e o nome da arquitetura. São gerados três arquivos de saída:

* <file>.hex – para download na placa de prototipação;
* <file>.sym – para uso do simulador;
* <file>.txt – **para uso no test\_bench do simulador VHDL**.

A ferramenta de montagem é transparente para o usuário, pois a mesma está integrada ao simulador. Os três arquivos de saída são gerados no momento da chamada do simulador. Erros encontrados durante a execução de uma das fases do montador são salvos em um arquivo de mensagens. Este arquivo é lido pelo simulador após a execução do montador afim de que os erros sejam apresentados ao usuário e não se prossiga a simulação. Erros na execução do montador não possibilitam a simulação, porque os mesmos indicam que as instruções da aplicação *assembly* não condizem com as instruções existentes na arquitetura.