Arquitetura de Sistemas Embarcados

Edna Barros *(ensb@cin.ufpe.br)*

Centro de Informática – UFPE

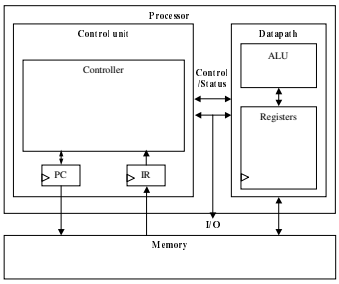
Capítulo 3 Processadores de Propósito Geral: Software

Introdução

- Processadores de Propósito Geral
  - Processador projetado para uma variedade de tarefas computacionais
  - Baixo custo unitário (Custo NRE para grande volume)
    - Motorola vendeu meio bilhão de microcontroladores 68HC05 em 1996
  - Cuidadosamente projetado
    - Otimiza desempenho, tamanho e potência
  - Reduzido time-to-market (protótipo), grande flexibilidade
    - Usuário apenas descreve o software
  - "microprocessor" – "micro" usado devido a ser implementado com poucos circuitos

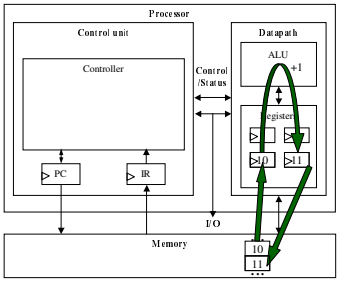
Arquitetura Básica

- Unidade de Controle e de Processamento
- Diferenças
  - Unidade de Processamento é genérica
  - Unidade de controle não armazena algoritmo (memória)



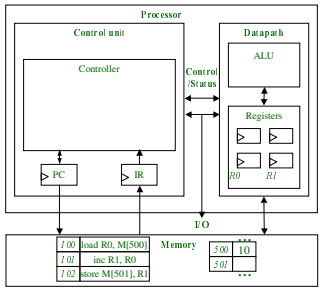
Operações de Processamento

- Load
  - Cópia de memória em registrador
- Operação na ALU
  - Valores em Registradores são processados pela ALU e armazenados em registrador
- Store
  - Cópia de registrador em memória



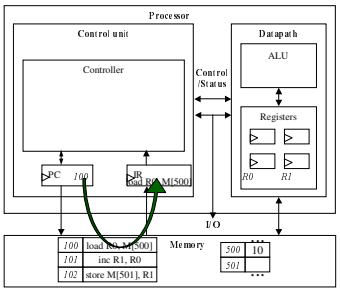
Unidade de Controle

- Unidade de Controle: configura operações do datapath
  - Sequência de operações (instruções) desejadas armazenadas na memória (programa)
- Ciclo de Instrução – várias sub-operações (cada uma em um ciclo de relógio)
  - Busca: armazena instrução em IR, atualiza PC
  - Decodificação: determina o que a instrução significa
  - Busca de Operandos: cópia de dados da memória para registradores na unid. Processamento
  - Execução: Processa dados na ALU
  - Armazena resultados: escreve resultados de registrador na memória



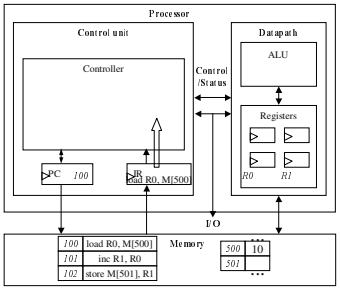
Sub-operações da Unidade de Controle

- Busca
  - Cópia da instrução em IR
  - PC: Contador de programa aponta para próxima instrução
  - IR: armazena instrução que foi buscada



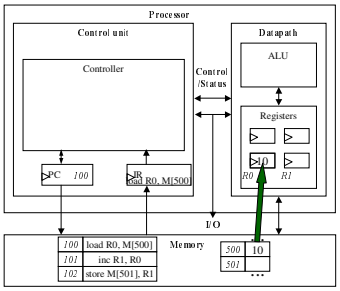
Sub-operações da Unidade de Controle

- Decodificação
  - Determina significado da instrução



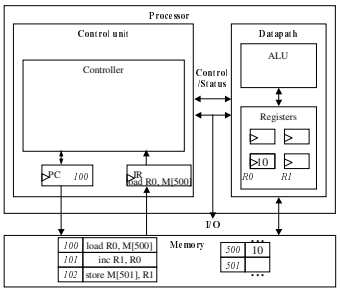
Sub-operações da Unidade de Controle

- Busca de Operandos
  - Cópia de dados da memória para registradores no datapath



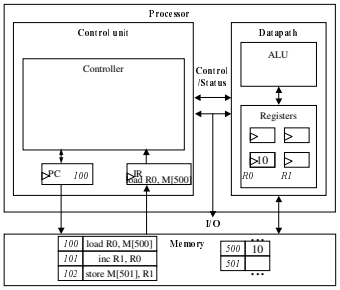
Sub-operações da Unidade de Controle

- Execução
  - Processa dados na ALU
  - (Para esta instrução em particular nada acontece durante esta sub-operação)

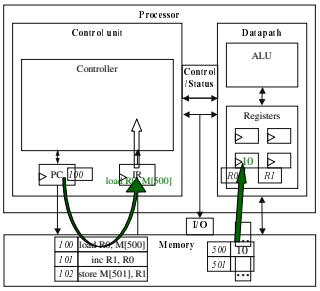


Sub-operações da Unidade de Controle

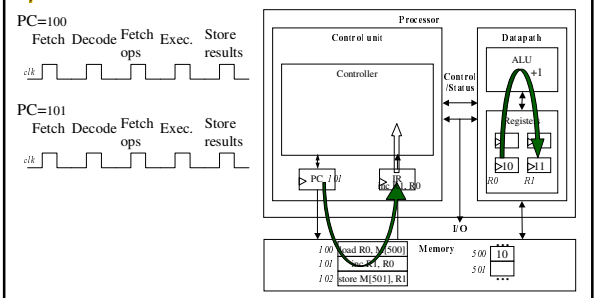
- Armazena resultados
  - Escreve dado de registrador em memória
  - (Para esta instrução em particular nada acontece durante esta sub-operação)



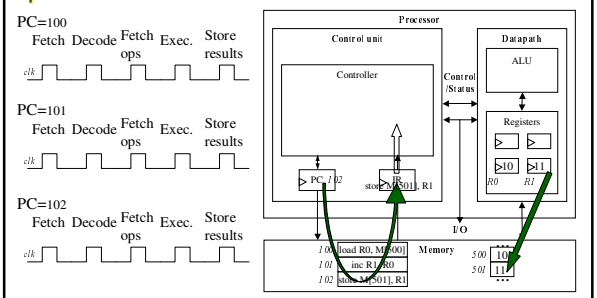
Ciclos de uma Instrução



Ciclos de uma Instrução

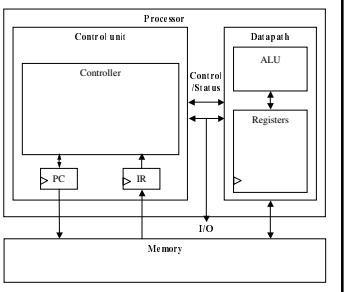


Ciclos de uma Instrução



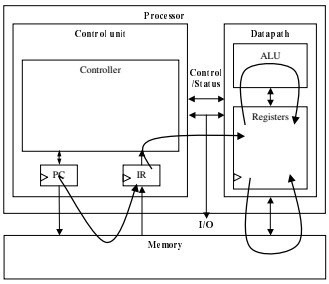
Considerações da Arquitetura

- *Processador de N-bits*
  - ALU, registradores, barramento, interface de memória N-bits
  - Comum em aplic. emb: 8-bit, 16-bit, 32-bit
  - Comum em Desktop/servidores: 32-bit, ou 64
- Tamanho do PC determina espaço de endereçamento

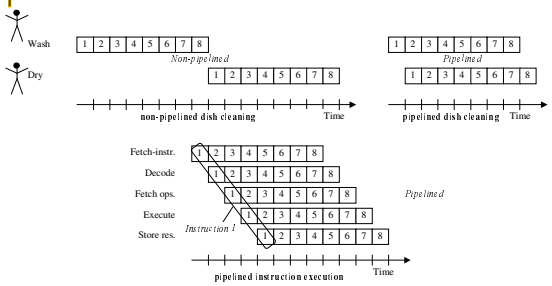


Considerações da Arquitetura

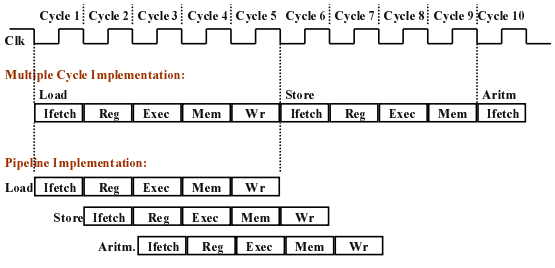
- Frequência do Clock
  - Deve ser maior que o maior retardo de carregamento de registrador
  - Acesso à memória possui o maior retardo



Pipelining: Aumentando Taxa de Execução das Instruções



Multi-ciclo vs. Pipeline

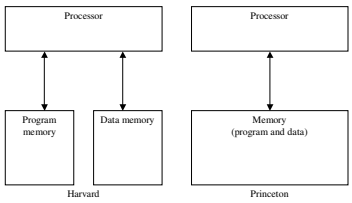


Arquiteturas Superescalares e VLIW

- Desempenho pode ser melhorado por:
  - Clock mais rápido
  - Pipelining
  - Múltiplas ALUs permitindo a execução de uma de uma sequência de instruções
    - Superescalares
      - Escalar: operações não vetoriais
      - Instruções buscadas em blocos e se executa o maior número possível
        - » Hardware adicional para descobrir instruções independentes
    - VLIW
      - cada palavra na memória tem múltiplas instruções independentes
        - » Compilador deve descobrir e escalonar instruções
        - » Aumento de popularidade

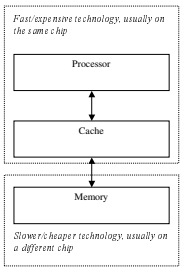
Arquiteturas de Memória

- Princeton
  - Menos fios
- Harvard
  - Acesso simultâneo à dado e instruções

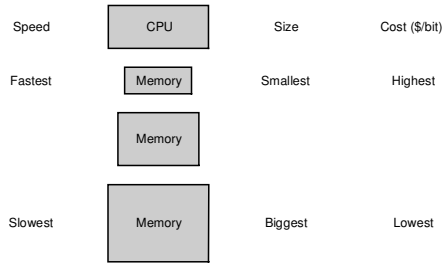


Memória Cache

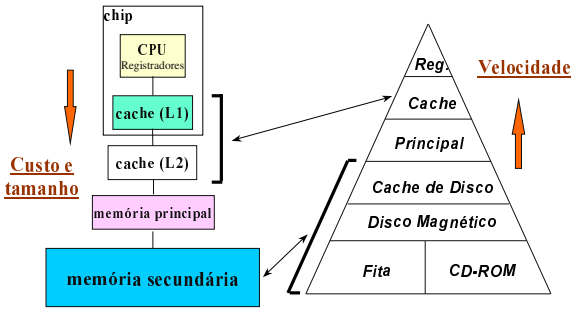
- Acesso à memória pode ser lento
- Cache é pequena porém tão rápida quanto o processador
  - Possui cópia de parte da memória
  - Hits e misses



Sistema Hierárquico de Memória



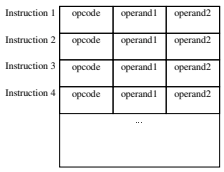
Hierarquia de Memória



Visão do Programador

- Programador não necessita visão detalhada da implementação
  - Precisa saber quais instruções podem ser executadas
- Dois Níveis de Abstração
  - Linguagem de Montagem (Assembly level)
  - Linguagens Estruturadas (C, C++, Java, etc.)
- Projetos são feitos usando linguagens estruturadas
  - MAS algum nível de assembly PODE ser necessário
  - Drivers: parte do programa que se comunica com e/ou controla outro dispositivo
    - Com considerações detalhadas de tempo e manipulação de bits
    - Nível de assembly pode ser o ideal

Instruções Nível Assembly

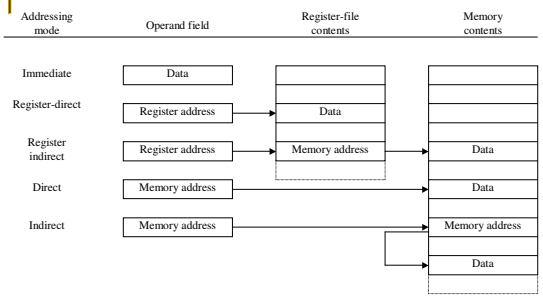


- Repertório de Instruções:
  - Define o conjunto de instruções que o processador pode executar
    - Transferência de Dado: memória/registrador, registrador/registrador, I/O, etc.
    - Aritméticas e Lógicas
    - Desvios: determina outro valor para PC (diferente de PC+1)

Um Repertório de Instruções Simples

Assembly instruct.	First byte		Second byte	Operation
MOV Rn, direct	0000	Rn	direct	Rn = M(direct)
MOV direct, Rn	0001	Rn	direct	M(direct) = Rn
MOV @Rn, Rm	0010	Rn	Rm	M(Rn) = Rm
MOV Rn, #immed.	0011	Rn	immediate	Rn = immediate
ADD Rn, Rm	0100	Rn	Rm	Rn = Rn + Rm
SUB Rn, Rm	0101	Rn	Rm	Rn = Rn - Rm
JZ Rn, relative	0110	Rn	relative	PC = PC+ relative (only if Rn is 0)
	opcode		operands	

Modos de Endereçamento



Exemplos de Programas

C program

```
int total = 0;
for (int i=10; i!=0; i--)
  total += i;
// next instructions...
```

Equivalent assembly program

```
0       MOV R0, #0;      // total = 0
1       MOV R1, #10;     // i = 10
2       MOV R2, #1;      // constant 1
3       MOV R3, #0;      // constant 0
Loop:   JZ R1, Next;     // Done if i=0
5       ADD R0, R1;      // total += i
6       SUB R1, R2;      // i--
7       JZ R3, Loop;     // Jump
Next:   always           // next instructions...
```

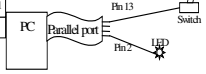
- Tente outros…
  - Handshake: Espere até que o valor de M[254] não seja 0, faça M[255] igual 1, espere até que M[254] seja, faça M[255] igual a 0 (assuma que estes endereços são portas).
  - Conte as ocorrências de zeros em um array armazenado na memória (endereços de 100 a 199)

Visão do Programador

- Espaço de Programa e de Dados
  - Processadores embarcados são bastantes limitados (em geral)
    - e.g., 64 Kbytes de programa, 256 bytes de RAM (expansível)
- Registradores: Quantos existem?
  - Somente para programadores em assembly
- I/O
  - Como se comunicar com sinais externos?
- Interrupções

Exemplo: driver de porta paralela

LPT Connection Pin	I/O Direction	Register Address
1	Output	0^{th} bit of register #2
2-9	Output	0^{th} bit of register #2
10,11,12,13,15	Input	$6,7,5,4,3^{th}$ bit of register #1
14,16,17	Output	$1,2,3^{th}$ bit of register #2

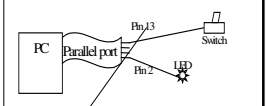


- Usando linguagem assembly pode-se configurar a porta paralela de um PC para se fazer E/S digital
  - Escrita e leitura de 3 registradores especiais (conforme tabela que mostra pinos do conector da porta e sua posição nos registradores
  - Exemplo: porta paralela monitora uma chave e acende ou apaga um LED de acordo com a posição da chave

Exemplo Porta Paralela

```
; This program consists of a sub-routine that reads
; the state of the input pin, determining the on/off state
; of our switch and asserts the output pin, turning the LED
; on/off accordingly
      .386

CheckPort   proc
      push  ax          ; save the content
push  dx          ; save the content
      mov   dx, 3BCh + 1; base + 1 for register #1
      in    al, dx      ; read register #1
      and   al, 10h     ; mask out all but bit # 4
      cmp   al, 0       ; is it 0?
      jne   SwitchOn    ; if not, we need to turn the LED on

SwitchOff:
      mov   dx, 3BCh + 0; base + 0 for register #0
      in    al, dx      ; read the current state of the port
      and   al, f7h     ; clear first bit (masking)
      out   dx, al      ; write it out to the port
      jmp   Done              ; we are done

SwitchOn:
      mov   dx, 3BCh + 0; base + 0 for register #0
      in    al, dx      ; read the current state of the port
      or    al, 01h     ; set first bit (masking)
      out   dx, al      ; write it out to the port

Done: pop   dx          ; restore the content
      pop   ax          ; restore the content
CheckPort   endp
```

```
extern "C" CheckPort(void);   // defined in
                              //
assembly
void main(void) {
      while( 1 ) {
            CheckPort();
      }
}
```



LPT Connection Pin	I/O Direction	Register Address
1	Output	0th bit of register #2
2-9	Output	0th bit of register #2
10,11,12,13,15	Input	6,7,5,4,3th bit of register #1
14,16,17	Output	1,2,3th bit of register #2

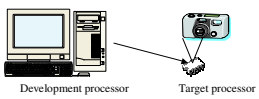
Sistema Operacional

- Software opcional que fornece serviços de "baixo nível" para a aplicação
  - Gerenciamento de arquivos e acesso a disco
  - Interface entre teclado e vídeo
  - Escalonamento de múltiplos programas para execução
    - Ou mesmo múltiplas threads de um programa
  - Programa faz chamadas ao S.O.

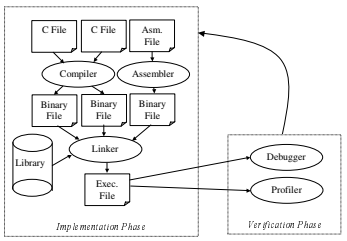
```
DB file_name "out.txt" -- store file name

MOV R0, 1324            -- system call "open" id
MOV R1, file_name       -- address of file-name
INT 34                  -- cause a system call
JZ  R0, L1              -- if zero -> error

   . . . read the file
JMP L2                  -- bypass error cond.
L1:
   . . . handle the error

L2:
```

Ambiente de Desenvolvimento

- Processador de Desenvolvimento
  - Processador usado na escrita e depuração de programas
    - Usualmente PC
- Processador Target
  - Processador que irá executar o programa no sistema embarcado
    - Usualmente diferentes do processador de desenvolvimento



Processo de Desenvolvimento de Software



- Compiladores
  - Cross compiler
    - Executa em um processador mas gera código para outro
- Assemblers
- Linkers
- Debuggers
- Profilers

Executando um programa

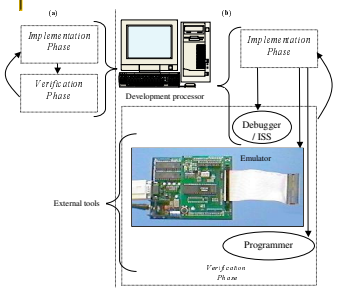
- Se processador de desenvolvimento é diferente do processador alvo, como executar o código compilado???
- Duas opções:
  - Download para processador alvo
  - Simulação
- Simulação
  - Um método: Descrever o processador usando HDL (Hardware description language)
    - Lento
  - Outro Método: Usar ISS (*Instruction set simulator)*
    - Executa no processador de desenvolvimento as instruções do processador alvo

Instruction Set Simulator para o Processador Simples

```
#include <stdio.h>
typedef struct {
    unsigned char first_byte, second_byte;
} instruction;

instruction program[1024];  //instruction memory
unsigned char memory[256];  //data memory

void run_program(int num_bytes) {

   int pc = -1;
   unsigned char reg[16], fb, sb;

   while( ++pc < (num_bytes / 2) ) {
      fb = program[pc].first_byte;
      sb = program[pc].second_byte;
      switch( fb >> 4 ) {
         case 0: reg[fb & 0x0f] = memory[sb]; break;
         case 1: memory[sb] = reg[fb & 0x0f]; break;
         case 2: memory[reg[fb & 0x0f]] =
                    reg[sb >> 4];  break;
         case 3: reg[fb & 0x0f] = sb; break;
         case 4: reg[fb & 0x0f] += reg[sb >> 4]; break;
         case 5: reg[fb & 0x0f] -= reg[sb >> 4]; break;
         case 6: pc += sb; break;
         default: return -1;
```

```
      }
   }
   return 0;
}

int main(int argc, char *argv[]) {

   FILE* ifs;

   If( argc != 2 ||
       (ifs = fopen(argv[1], "rb") == NULL ) {
            return -1;
   }
   if (run_program(fread(program,
       sizeof(program) == 0) {
            print_memory_contents();
            return(0);
   }
   else return(-1);
}
```

Teste e Depuração



- ISS
  - Permite controlar tempo de execução, setar break-points, ver e setar valores de registradores, execução paso-a-passo,…
  - POREM não permite interação com ambiente REAL
- Download para placa
  - Uso de programador de dispositivo
  - Executa em ambiente real porém com baixa controlabilidade
- Compromisso: emulador
  - Executa em ambiente real (ou próximo do real)
  - Suporta alguma controlabilidade (via PC)

Processadores de Repertório de Instruções de Aplicação Específica (ASIPs)

- Processadores de propósito geral
  - Algumas vezes MUITO GENÉRICOS para ser eficiente para aplicação específica
    - Ex: processamento de vídeo: buffers e operações em arrays
  - MAS processador de aplicação única possui alto custo NRE e não é programável
- ASIPs – Aplicam-se a um domínio particular
  - Possuem características de arquitetura específicas ao domínio
    - Ex: controle embarcado, processamento digital de sinais, processamento de vídeo, processamento de rede, telecomunicações, etc.
    - Suportam uma área de aplicação
  - São Programáveis

Exemplo de ASIP :Microcontrolador

- Para aplicações de controle
  - Leitura de sensores, ativar atuadores
  - Manipula com eventos: existe dados mas em pequena quantidade
  - Ex: disk drive, máquina de lavar, forno de microondas, etc…
- Características dos Microcontroladores
  - Periféricos em Único CHIP
    - Temporizadores, conversores analógico-digital, comunicação serial, etc…
    - Acesso através de registradores (facilidade de programação)
  - Programa de memória e dados no chip
  - Acesso a vários dos pinos do chip
  - Instruções para manipulação de bits e operações de baixo-nível

Exemplo de ASIP: Digital Signal Processors (DSP)

- Para aplicações de processamento de sinais
  - Grande quantidade de dado digitalizado (em streaming)
  - Transformações nos dados devem ser rápidas
  - Ex: filtro para telefone celular, TV digital, sintetizador de música
- Características dos DSPs
  - Várias unidades de execução
  - Instrução Multiplica-acumula
  - Operações eficientes em vetores, ex: add dois arrays
    - ALUs vetoriais, loop buffers, etc…

ASIPs customizados

Processadores adquiridos como módulo de propriedade intelectual (IP)
- Modelo VHDL sintetizável
- Layout

- Possibilidade de ajustar hardware (adicionar ou retirar instruções)
  - Grande impacto no desempenho, tamanho e potência
  - Problema: necessidade de compilador/depurador para ASIP customizado
    - Uma solução: geração automática de compiladores/depuradores
      - e.g., www.tensillica.com
    - Outra solução: retargettable compilers
      - e.g., www.improvsys.com (customized VLIW architectures)

Selecionando o microprocessador

- Características
  - Técnicas: velocidade, potência, tamanho, custo
  - Outras: ambiente de desenvolvimento, conhecimento prévio, licenças, …
- Como avaliar o desempenho de um processador?
  - Velocidade do Clock: nr. de instruções por ciclo pode diferir
  - Instruções por segundo: tipo de instruções podem diferir
  - Dhrystone: Benchmark Sintético, desenvolvido em 1984. Dhrystones/sec.
    - MIPS: 1 MIPS = 1757 Dhrystones per second (based on Digital's VAX 11/780).
    - 750 MIPS = 750*1757 = 1,317,750 Dhrystones per second
  - SPEC: conjunto de benchmarks mais realísticos orientados a desktop
  - EEMBC – EDN Embedded Benchmark Consortium, www.eembc.org
    - Benchmarks: automóveis, eletrônica de consumo, redes, automação de escritório, telecomunicações.

Alguns Processadores

Processor	Clock speed	Periph.	Bus Width	MIPS	Power	Trans.	Price
General Purpose Processors							
Intel PIII	1GHz	2x16 K L1, 256K L2, MMX	32	~900	97W	~7M	$900
IBM PowerPC 750X	550 MHz	2x32 K L1, 256K L2	32/64	~1300	5W	~7M	$900
MIPS R5000	250 MHz	2x32 K 2 way set assoc.	32/64	NA	NA	3.6M	NA
StrongARM SA-110	233 MHz	None	32	268	1W	2.1M	NA
Microcontroller							
Intel 8051	12 MHz	4K ROM, 128 RAM, 32 I/O, Timer, UART	8	~1	~0.2W	~10K	$7
Motorola 68HC811	3 MHz	4K ROM, 192 RAM, 32 I/O, Timer, WDT, SPI	8	~.5	~0.1W	~10K	$5
Digital Signal Processors							
TI C5416	160 MHz	128K, SRAM, 3 T1 Ports, DMA, 13 ADC, 9 DAC	16/32	~600	NA	NA	$34
Lucent DSP32C	80 MHz	16K Inst., 2K Data, Serial Ports, DMA	32	40	NA	NA	$75

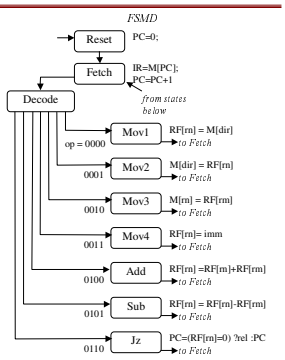
Sources: Intel, Motorola, MIPS, ARM, TI, and IBM Website/Datasheet; Embedded Systems Programming, Nov. 1998

Projetando um Processador de Propósito Geral

- Interessante para entender funcionamento
- Projeto é feito de forma bottom-up e mais otimizado

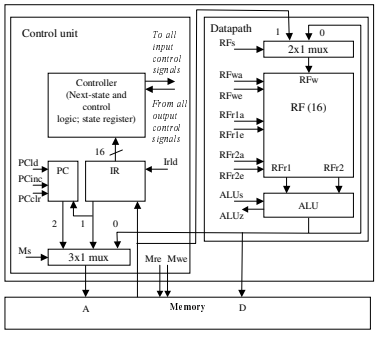
Declarations:
bit PC[16], IR[16];
bit M[64k][16], RF[16][16];

Aliases:
op IR[15..12] dir IR[7..0]
rn IR[11..8] imm IR[7..0]
rm IR[7..4] rel IR[7..0]

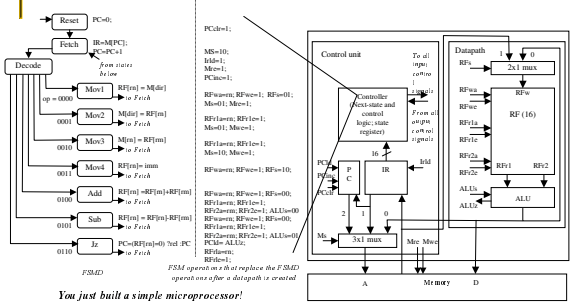


Um Microprocessador Simples

- Registradores para cada variável
- Unidades Funcionais para cada operação aritmética
  - Uso de uma ALU
- Conexões entre componentes
- Sinais de controle



Um Microprocessador Simples



You just built a simple microprocessor!

Resumo

- Processadores de Propósito Geral
  - Bom desempenho, baixo custo NRE, flexível
- Controle, processamento e memória
- Uso de linguagens estruturadas
- Várias ferramentas disponíveis
  - Simulador ISS e emuladores
- ASIPs
  - Microcontroladores, DSPs, processadores de rede, ASIPs customizados
- Escolha do processador é uma etapa importante
- Projetar um processador de propósito geral é conceitualmente o mesmo que projetar um processador de propósito específico