

4676 - 1

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE
PROCESSADORES NUMÉRICOS :
COPROCESSADOR E
PROCESSADOR VETORIAL
FERNANDO ROSA DO NASCIMENTO
AGOSTO/89**

Trabalho realizado com o apoio do CNPq.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Departamento de Informática

Av. Osvaldo Aranha, 99

90.210 - Porto Alegre - RS, BRASIL

Endereço para correspondência:

UFRGS/CPGCC/Biblioteca

Caixa Postal 1501

90.001 - Porto Alegre - RS, BRASIL



RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise detalhada de dois tipos de arquiteturas empregadas em processamento numérico : os coprocessadores e os processadores vetoriais. São analisados os aspectos de : arquitetura e organização, recursos internos, registradores, instruções e tipos de dados. Após é feita uma análise comparativa. Os aspectos tão diversos das arquiteturas , mas muito úteis dependendo das aplicações, são objeto deste estudo.

PALAVRAS-CHAVES : arquitetura e organização de computadores, processador numérico, coprocessadores numéricos, processamento vetorial e paralelismo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. COPROCESSADOR 8087	03
2.1 Registradores	03
2.2 Tipos de dados	05
2.3 Arquitetura	06
2.4 Instruções	07
3. PROCESSADOR NUMÉRICO WTL 3132/3332	09
3.1 Registradores	09
3.2 Tipos de dados	10
3.3 Arquitetura	12
3.4 Instruções	12
4. ANÁLISE COMPARATIVA	15
4.1 Registradores	16
4.2 Tipos de dados	17
4.3 Arquitetura	18
4.4 Instruções	19
5. CONCLUSÃO	20
 BIBLIOGRAFIA	 21

1. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento da tecnologia de fabricação de circuitos integrados tem possibilitado um alto grau de integração e alta velocidade de processamento a custos competitivos. Estas novas tecnologias aliadas às necessidades crescentes do mercado levaram os fabricantes a se dedicarem ao desenvolvimento de microprocessadores com poderosas UCPs (unidades centrais de processamento) de 16 e 32 bits, que incluem técnicas de pipeline, grande número de registradores, etc. . Estes microprocessadores dispõem de um conjunto rico de instruções, que são basicamente para movimento de dados, processamento lógico e aritmético, e portanto suportam o desenvolvimento de software para aplicações de uso geral. As operações aritméticas realizadas são soma, subtração, multiplicação e divisão sobre números inteiros com sinal de 16 e até 32 bits.

Embora as aplicações em geral levassem a estas arquiteturas, elas são bastante deficientes quando se pensa em processamento numérico de alta velocidade em ponto flutuante , incluindo-se funções trigonométricas e transcendentes. As aplicações científicas e industriais que requerem um alto desempenho para processamento aritmético não são servidas pelos modernos microprocessadores, e sim por circuitos integrados (CIs) dedicados. Destes CIs, os mais conhecidos são os coprocessadores e os processadores digitais de sinais (DSPs).

Os DSPs /MAR 83/ são microprocessadores dedicados que permitem a multiplicação e adição de números em ponto flutuante num único ciclo de máquina. Como os ciclos de máquinas chegam a

50 ns, a taxa de processamento pode chegar a 20 milhões de operações em ponto flutuante por segundo (20 MFlops). Para tanto dispõem de um multiplicador paralelo, um conjunto de registradores, uma unidade aritmética e uma unidade de controle; fabricados num ou em dois CIs (bloco de controle e bloco operacional).

Os coprocessadores numéricos são extensões físicas e lógicas dos processadores de uso geral, de tal forma que operam como um único processador com um conjunto de instruções, de registradores e de recursos bastante ampliados. Apresentam um repertório de instruções bastante poderoso em comparação com os DSPs, mas têm uma taxa de processamento bem mais modesta.

Este artigo se propõe a descrever um exemplo significativo de cada tipo de processador numérico para depois compará-los em relação ao desempenho, custos, aplicações, programação, etc. .

2. COPROCESSADOR 8087

Este é o coprocessador mais usado atualmente, pois é utilizado com os microprocessadores 8086 e 8088, sendo este último a UCP dos microcomputadores tipo IBM - PC.

O 8087 [SIM 83] dispõe dos seguintes recursos:

- a) oito (8) registradores de dados de 80 bits, endereçados em forma de pilha ou individualmente;
- b) um registrador de controle de 16 bits;
- c) um registrador de estado de 16 bits;
- d) um registrador de 16 bits com o estado dos dados (tag word)
- e) um apontador de instruções de 32 bits;
- f) um apontador de dados de 32 bits;
- g) um módulo aritmético para mantissa;
- h) um módulo aritmético para expoente;
- i) um deslocador programável,

2.1 REGISTRADORES

Os registradores de dados são de 80 bits, sendo 64 bits para a mantissa e 16 para o expoente, que é a representação interna dos dados no 8087. Associado a cada registrador de dados existem dois bits que informam o seu estado (zero, vazio, válido e especial). O conjunto destes bits associados (16 bits) podem ser lidos diretamente da "tag word".

O registrador de estado do 8087 é composto dos seguintes campos:

- a) bit 15, indica se o NDP está processando;
- b) bits 14,10,9 e 8, indicam o estado do NDP em função da última operação realizada, a exemplo dos "flags" de uma UCP, servindo para teste e desvios;
- c) bits 13,12 e 11, contém o número do registrador de dados que é o atual topo da pilha;
- d) bit 7, ativado se o 8087 requisita um serviço de interrupção do 8088/8086, em resposta a alguma condição de erro pré-determinada;
- e) bits 0 a 5, assinalam condições de erro (operação inválida, dado desnormalizado, divisão por zero, overflow, underflow e precisão).

O registrador de comando serve para orientar o que o 8087 deve fazer no caso de erros, ajustar o controle de precisão e de arredondamento, habilitar interrupções, entre outros. Os campos do registro de comando são:

- a) bit 12, determina o modelo de infinito a ser usado, projetivo que usa só uma representação ou aproximação conclusiva com duas representações de infinito;
- b) bits 11 e 10, controlam o arredondamento (para cima, para baixo, para o próximo ou par e para zero),
- c) bits 9 e 8, controlam a precisão das operações;
- d) bit 7, habilita o 8087 a gerar interrupções;
- e) bits 0 a 5, individualmente habilitam que cada uma das condições de erro, possa gerar ou não um pedido de interrupção.

Os apontadores de exceções são dois, para instruções e

para dados. Eles existem para auxiliar o programa a tentar recuperar um erro, pois indicam qual a instrução e qual o dado que o "causaram". A palavra de estado também é útil, pois indica o tipo de erro ou erros ocorridos.

2.2 TIPOS DE DADOS

Os tipos de dados manipulados pelo 8087 são mostrados na tabela 1.

Tipo de dado	Número de bits	Dígitos válidos	Faixa de aplicação
Inteiro	16	4-5	$-32768 < x < 32767$
Inteiro curto	32	9	$-2E9 < x < 2E9$
Inteiro longo	64	18	$-9E18 < x < 9E18$
Decimal empacotado	80	18	$-99...9 < x < 99...9$
Real curto	32	6-7	$0; 1,2E-38 < x < 3,4E38$
Real longo	64	15-16	$0; 2,3E-308 < x < 1,7E308$
Real temporário	80	19-20	$0; 3,4E-4932 < x < 1,1E4932$

Tabela 1 - Tipos de dados usados pelo 8087.

Estes tipos obedecem aos formatos do padrão IEEE 754. Todos estes tipos de dados são transformados automaticamente no formato real temporário (80 bits) ao serem armazenados nos registradores de dados do 8087. O tipo de dado a ser armazenado na memória do sistema é definido pela operação de escrita que se faz no 8087.

2.3 ARQUITETURA

O 8087 é dividido internamente em dois blocos; unidade de controle (UC) e unidade de execução numérica (UEN), conforme mostrado na figura 1.

Na UC estão os registradores de execução, a palavra de controle e a de estado, buffers de dados e as interfaces para a UCP 8088 ou 8086.

Na UEM estão os demais registradores, os registradores temporários, os blocos funcionais, os diversos barramentos e a unidade de controle microprogramada. Os blocos funcionais são: o módulo aritmético e o deslocador programável ligados ao barramento da parte fracionária e o módulo aritmético para o barramento do expoente.

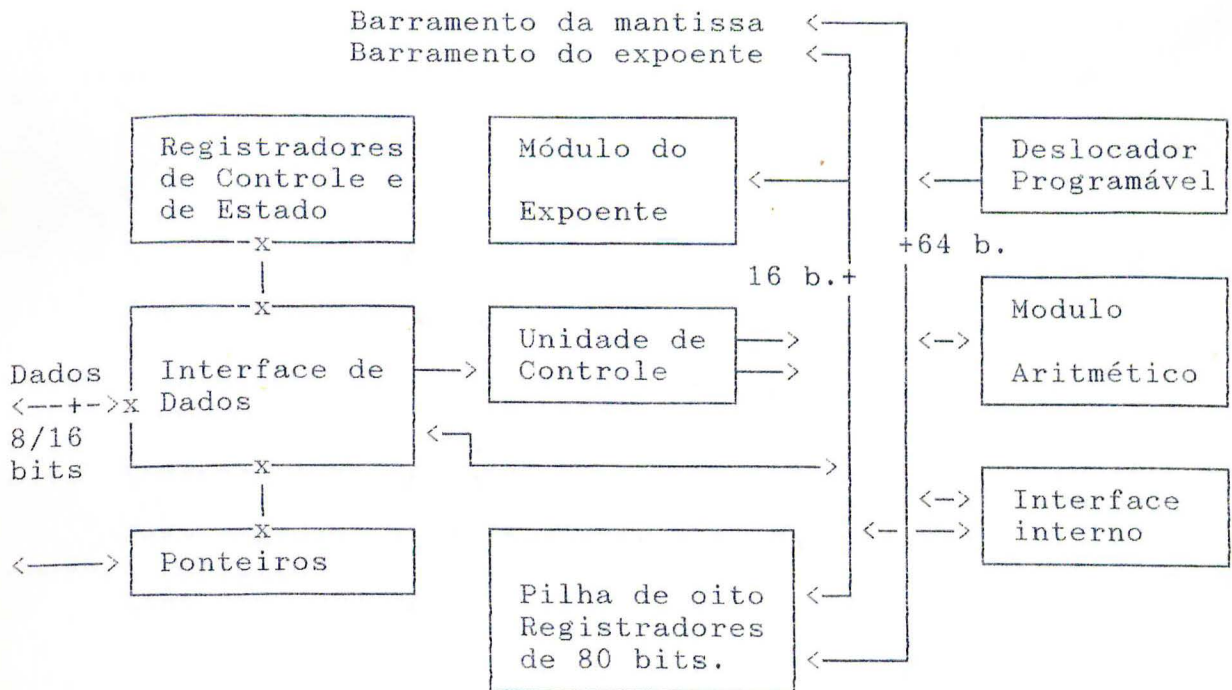


Figura 1 - Diagrama em blocos do 8087.

O barramento da mantissa tem 68 bits e do expoente tem 16 bits, o que permite que as transferências internas de operandos sejam feitas em alta velocidade. A unidade de controle microprogramada tem a função de decodificar e comandar a execução das instruções, entre elas os algoritmos que executam as funções trigonométricas e as exponenciais.

2.4 INSTRUÇÕES

O 8087 pode executar 68 instruções envolvendo os sete tipos de dados citados. As instruções se dividem nos seguintes grupos:

- a) transferência de dados, permitem que os dados sejam movidos entre a memória e os registradores, ou só entre registradores;
- b) comparação, realizada entre memória e registrador ou só entre registradores;
- c) carga de constantes no topo da pilha com: 0, 1, π , log na base 2 de e, log na base 2 de 10, ln de 2 ou log na base 10 de 2. Estas constantes são do tipo real temporário e estão no 8087;
- d) aritméticas: soma, subtração, multiplicação, divisão, raiz quadrada, resto, arredondamento, valor absoluto e troca de sinal. As quatro primeiras podem ser realizadas entre memória e registrador ou só entre registradores, sendo as demais só com registradores.
- e) transcendentes: tangente, arco-tangente, $(2 \exp ST(0))-$

1, $ST(1).log$ na base 2 de $ST(0)$ e $ST(1).log$ na base 2 de $(ST(0)+1)$;

f) controle de processador, utilizadas para trabalhar com os registradores de comando, de estado, etc. .

O novo coprocessador 80387 de Intel, conforme descrito em [MUR 86], inclui três novas instruções para cálculo do seno e cosseno. Uma destas instruções calcula simultaneamente o seno e o cosseno.

3. PROCESSADOR NUMÉRICO WTL 3132/3332

A Weitek produz uma grande família de processadores numéricos de alto desempenho para aplicações em processamento digital de sinais (DSPs), processamento de imagens, etc. . Como exemplo foi escolhido a Unidade de Ponto Flutuante (UPF) WTL 3132/3332 [WEI 86], devido ao seu altíssimo desempenho, se comparado com o coprocessador descrito anteriormente. A UPF escolhida funciona com o sequenciador (unidade de controle) WTL 7136, formando assim um poderoso processador aritmético em ponto flutuante (PF), capaz de atingir velocidade de processamento de até 20 MFlops.

O WTL 3132/3332 dispõe dos seguintes recursos:

- a) unidade de multiplicação em PF de 32 bits;
- b) unidade lógica e aritmética em PF de 32 bits;
- c) unidade lógica de divisão;
- d) conjunto de 32 registradores de 32 bits, com quatro portas de acesso simultâneo;
- e) porta de dados bidirecional de 32 bits no WTL 3132, e mais duas portas unidirecionais no WTL 3332;
- f) três registradores temporários de 32 bits;
- g) registradores de instrução, de estado e de modo.

3.1 REGISTRADORES

A UPF dispõe de um conjunto de 32 registradores de dados que podem ser simultaneamente acessados por quatro portas internas (A,B,C,D). As portas A e B só permitem leitura,

fornecendo assim os operandos das ULAs. A porta C é só de escrita, servindo para guardar os resultados. A porta D é de leitura ou escrita, e é usada para movimentar os dados dos registradores e as portas (barramentos) externos de dados.

A UPF ainda dispõe de três registradores de dados temporários, usados principalmente para acumular dados intermediários.

O registrador de instrução tem 32 bits no WTL 3132 e 33 bits no WTL 3332. O registrador de estado tem somente dois bits, um para overflow e outro para underflow.

A UPF tem um registrador de modo, o qual configura o fluxo interno de dados e habilita os flags de exceção. Os bits 2 e 5 habilitam as condições de underflow e de overflow a gerarem pedidos de interrupção ao WTL 7136. Os bits 3,4 e 11 reconfiguram os caminhos internos de dados para melhor adaptação a determinados algoritmos. O bit 12 (WTL 3332) permite que dois operandos sejam lidos através das portas de dados, num único ciclo de máquina.

3.2 TIPOS DE DADOS

O WTL 3132/3332 suporta dados em ponto flutuante e em inteiro, obedecendo ao padrão IEEE 754, versão 10, com algumas pequenas restrições.

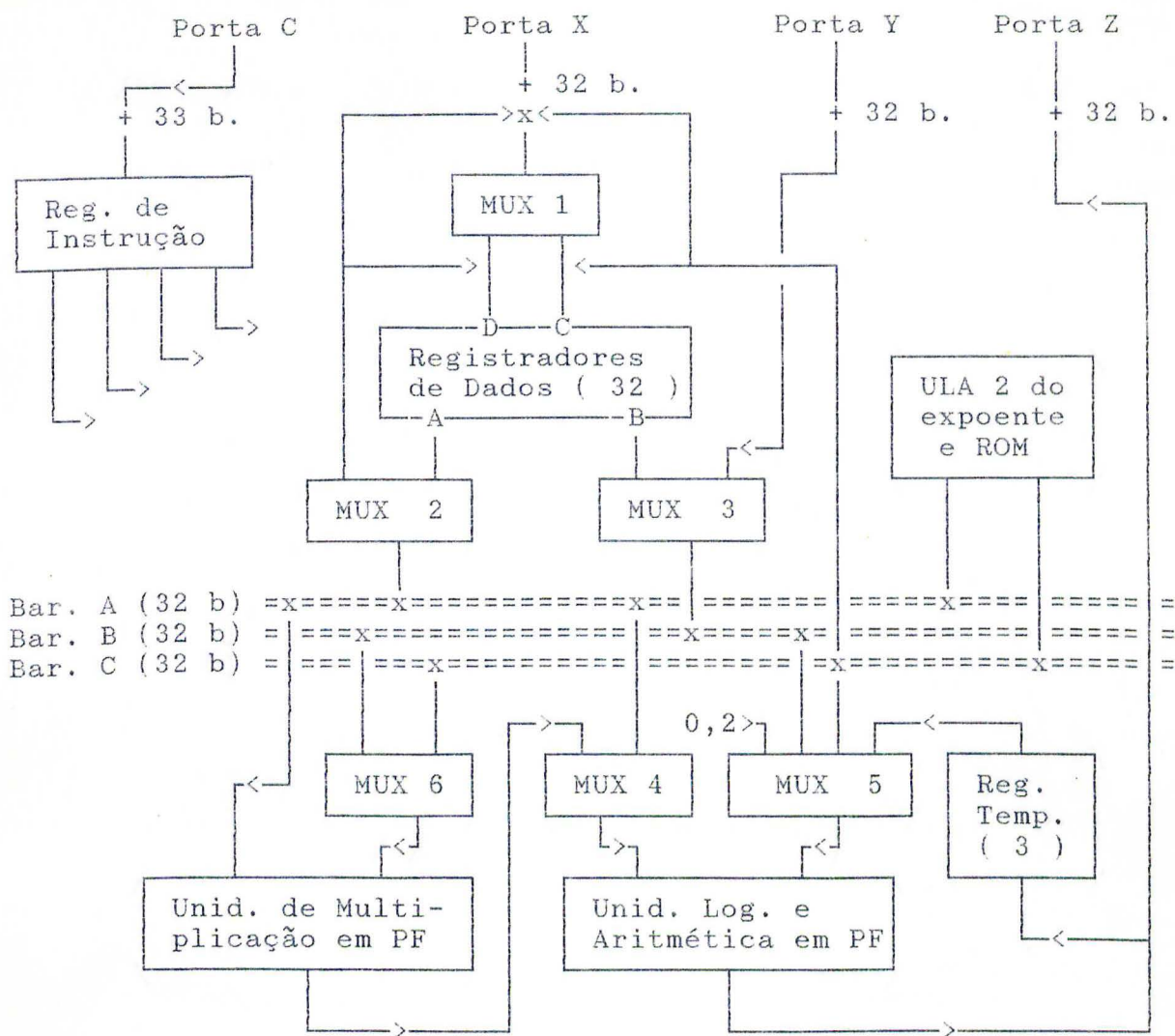


Figura 2 - Diagrama em blocos do WTL 3332.

Os dados em inteiro usam 24 bits, podendo ser convertidos em ponto flutuante. Os dados em ponto flutuante usam 32 bits, 8 para o expoente e 24 para a mantissa. Quanto ao padrão IEEE, existem algumas limitações como: não suporta números desnormalizados, usa só o arredondamento para o próximo, etc. .

3.3 ARQUITETURA

O diagrama em blocos do WTL 3332 é mostrado na figura 2, sendo que o WTL 3132 difere pela ausência de um multiplexador (MUX 3) e das portas Y e Z.

A arquitetura do WTL 3332 oferece seguintes recursos:

- a) uma unidade de multiplicação em série com uma ULA (ambas de 32 bits em PF), permitindo que num ciclo de máquina seja realizado uma multiplicação e uma soma/subtração;
- b) conjunto de 32 registradores de 32 bits, com 4 portas de acesso simultâneo;
- c) porta de instrução (C) e de dados (X, Y e Z) independentes (arquitetura de Harvard), propiciando um alto grau de paralelismo e de desempenho nas operações de entrada e saída de dados;
- d) três barramentos internos de dados com 32 bits, facilitando a obtenção de altas taxas de comunicação interna.

3.4 INSTRUÇÕES

O WTL 3132/3332 é uma unidade operacional controlada pelo WTL 7136, sendo sua micro-instrução composta dos seguintes campos:

- a) bit 33 (WTL 3332), controla a entrada do barramento B via multiplexador MUX 3;
- b) bits 30 a 32, seleção da função a ser executada pela

unidade de multiplicação, ULA 1 e ULA 2. As operações são multiplicação com soma/subtração, soma e subtração.

No caso destes bits estarem em zero, os bits 20 a 24 da micro-instrução indicarão que a operação a ser realizada é uma converção de ponto flutuante para inteiro (ou o inverso), a obtenção do valor absoluto ou leitura/limpeza do registrador de estado;

- c) bits 25 a 29 (end. A), bits 20 a 24 (end. B), bits 15 a 19 (end. C) e bits 7 a 11 (end. D), especificam um dos 32 registradores para cada uma das quatro portas do conjunto de registradores. Este acesso é realmente paralelo e permite alimentar eficientemente o multiplicador e as ULAs;
- d) bit 14, habilita a escrita na porta C do conjunto de registradores a partir do barramento C;
- e) bits 12 e 13, selecionam o tipo de operação a ser feita pela porta X (leitura/escrita);
- f) bits 4 a 6, selecionam qual o dado que será usado numa das entradas da ULA 1, através de um multiplexador (MUX 5). O dado pode ser uma constante (0 ou 2), fornecido pelo barramento interno C ou B ou por um dos três registradores temporários;
- g) bits 2 e 3, selecionam o destino da saída da ULA 1 para um dos registradores temporários ou para o barramento C;
- h) bit 1, seleciona qual o dado que será usado numa das entradas da unidade de multiplicação, através de um multiplexador (MUX 6). O dado pode vir do barramento

interno B ou C;

- i) bit 0, habilita a atualização ou não do registrador de condição.

4. ANÁLISE COMPARATIVA

Após a descrição dos dois tipos de processadores numéricos, cabe um estudo comparativo dos aspectos mencionados e de suas implicações em aplicações específicas. Fica fácil agora comparar quantitativamente as duas arquiteturas e suas implicações.

O conceito de coprocessador se aplica a unidades funcionais, que acopladas a uma UCP ampliam os recursos físicos e o conjunto de instruções, de tal forma que o programador enxerga uma nova UCP, bem mais poderosa. Este conceito é fundamental ao desenvolvimento de sistemas modulares de alto grau de integração, expansão e facilidade de programação. Um coprocessador pode ser visto como a soma de duas unidades especializadas: operacional e de controle. A unidade operacional é, neste trabalho, uma unidade de ponto flutuante. A unidade de controle tem duas funções: monitorar os barramentos da "verdadeira" UCP e controlar a unidade funcional através da instrução recebida. Esta segunda tarefa é a usual de uma unidade de controle, porém a primeira é função específica de um coprocessador. O fato de haver esta monitoração para "captura" das instruções do coprocessador, dentre aquelas do fluxo normal de instruções, traz as seguintes vantagens:

- a) o conjunto de instruções é único para o programador;
- b) o programador não trabalha com um dispositivo endereçável, e portanto não é dependente da arquitetura e;
- c) o custo de implantação é baixo, limitando-se ao custo do coprocessador.

Uma unidade de ponto flutuante é um dispositivo que não se integra a uma UCP como um coprocessador, mas sim como um periférico, através do sistema de entrada e saída ou através do compartilhamento de uma área de memória. É portanto endereçável e dependente da implementação.

Após esta breve introdução, vai se comparar detalhadamente os dois tipos de processadores numéricos.

4.1 REGISTRADORES

Existe uma diferença significativa no número e tamanho dos registradores de dados do 8087 e do WTL 3132/3332, conforme mostrado na tabela 2.

A diferença de tamanho entre os registradores é devido ao tipo de dados que ambos suportam. Já o número de registradores reflete a grande necessidade de dados que o WTL 3132/3332 tem para manter as suas altas taxas de processamento. Embora os processadores da Weitek tenham um número baixo de registradores

	8087	Weitek
Reg. da dados	08	32
Reg. temporario	00	03
Num. bits reg. dados	80	32
Num. bits reg. comando	16	32
Num. bits reg. estado	16	02

Tabela 2 - Quadro dos registradores do 8087 e da Weitek.

para muitas aplicações, as taxas de processamento são mantidas graças ao fato de que os registradores de dados dispõem de quatro portas de acesso simultâneo e, de que o processador tem de um (WTL 3132) até três barramentos de dados externos. Outros DSPs fornecem um bom número de registradores (até 1024) para suprir a falta de vários barramentos externos. Porém esta solução não é tão genérica quanto a da Weitek, pois para os problemas que requerem mais registradores, os tempos de acesso a memória externa começam a pesar, reduzindo-se o desempenho do processador. Nestes casos é comum o fabricante anunciar um alto desempenho do DSP em função de um problema bastante particular, adequado aos recursos do seu produto.

O WTL 3132/3332 ainda dispõe de três registradores temporários de dados, estrategicamente colocados na saída da ULA. O registrador de estado dispõe de só dois bits, resultado das operações aritméticas. Já o 8087 possui um sofisticado registrador de estado e dois apontadores de exceções, necessários a implementação do conceito de coprocessador.

4.2 TIPOS DE DADOS

O WTL 3132/3332 tem apenas dois tipos de dados, inteiro (24 bits) e ponto flutuante (32 bits). Embora sejam adequados para processamento digital de sinais, não o são para aplicações numéricas de alta precisão. Alguns DSPs incorporam dados em ponto flutuante de 64 bits. Já o coprocessador 8087 tem vários tipos de dados, com até 80 bits em PF. Tais tipos de dados obedecem a

norma IEEE 754 e são adequados para um grande número de aplicações.

4.3 ARQUITETURA

Os processadores numéricos são processadores especializados que têm a característica de executar cálculos em velocidade bem superior a de uma UCP de uso geral. Para tal empregam vários recursos na sua arquitetura: registradores e barramentos com o tamanho do maior tipo de dado, múltiplos barramentos, unidades operacionais especiais, pipeline, etc. .

O WTL 3132/3332 apresenta um altíssimo grau de paralelismo por possuir: um grande número de barramentos internos e externos, uma unidade de multiplicação paralela, uma ULA, um banco de registradores com quatro portas e um conjunto de multiplexadores. Todos estes recursos podem ser explorados em cada micro-instrução, a ponto de executar a transformação de uma matriz 4x4 em apenas 16 ciclos.

O 8087 tem a seu favor um conjunto de registradores e um barramento interno de dados com largura de 80 bits. Porém suas limitações maiores estão no reduzido tamanho das ULAs (16 bits) e no interface externo de dados que é de 8/16 bits, de acordo com a UCP a que estiver ligado (8088/8086). Isto faz com que as instruções sejam executadas através de uma seqüência de microinstruções, que consomem de 10 até 1200 ciclos de máquina.

O grau de paralelismo disponível pela Weitek é muito superior ao 8087, mas isto não inviabiliza o conceito de coprocessador. O fato de o 8087 dispor de uma arquitetura tão

pouco paralela está ligado ao estágio tecnológico disponível na época em que foi projetado.

4.4 INSTRUÇÕES

Outra das principais características dos processadores numéricos, além do alto desempenho, é o de fornecer instruções não disponíveis normalmente numa UCP tradicional, tais como funções trigonométricas, exponenciais, logarítmicas, etc. .

O desenvolvimento de processadores numéricos estimulou a criação de padrões, tal como o IEEE 754, e vice-versa. Porém aplicações específicas forçaram o desenvolvimento de DSPs que inicialmente tentaram resolver determinados problemas , sem se preocupar com normatização.

Os coprocessadores, desde o 8087, procuram fornecer um conjunto rico de instruções, o que já não acontece com os DSPs. Um grande problema de quem deseja dispor do alto desempenho do WTL 3132/3332 é o de criar um conjunto rico de instruções e de tipos de dados da mesma forma que o 8087, via microprogramação.

5. CONCLUSÃO

Foi apresentado uma descrição detalhada dos vários aspectos do 8087 e do WTL 3132/3332. O que fica evidente é que para se obter um alto desempenho de um DSP como o da WTL, é necessário se pagar um alto custo pelo projeto e implementação de uma arquitetura capaz de suportá-lo, bem como pelo desenvolvimento do software necessário (instruções mais o aplicativo em si). Embora os recursos para desenvolvimento de hardware e de software de DSPs estejam mais acessíveis, os investimentos globais são grandes, sendo portanto uma alternativa de baixo custo para pequenos computadores o acréscimo de coprocessadores nas famílias 8086, 80286 e 80386 (8087, 80287 e 80387). Esta opção já é amplamente empregada por quem precisa de processamento numérico de alto desempenho. Exemplo disto são:

- a) muitos compiladores já incorporam as instruções dos coprocessadores e,
- b) muitos aplicativos, principalmente em CAD, já verificam automaticamente a existência de coprocessador numérico, a fim de utilizá-lo, pois sem o qual seu desempenho fica sofrível.

O uso de coprocessadores têm sido aceitos devido aos seus méritos já discutidos, apesar de em determinados modelos e em épocas de lançamento alcançarem preços bastante altos (de até US\$ 1.000,00) . Foi o caso das versões de mais de 25 MHz do coprocessador 80387.

BIBLIOGRAFIA

- /MAR 83/ Marrin, E. M. . VLSI and software move DSP techniques into mainstream. **Computer Design**, Hittleton, **24** (12): 69-87, Sept. 1985.
- /SIM 83/ Simington, R. B. . The Intel 8087 numerics processor extension. **Byte**, Peterborough, **8** (4): 154-175, Apr. 1983.
- /MUR 86/ Murray, W. H. e Pappas, C. H. . **80386/80286 assembly language programming**. Berkeley, Osborne / Mc Graw-Hill, 1986.
- /WEI 86/ WEITEK CORPORATION. **WTL 3132/3332 32 Bit IEEE Floating Point Data Paths**. 1986.