

## RESUMO

Variáveis indexadas. Necessidade de métodos eficientes para o seu processamento. Áreas de aplicação do processamento de variáveis indexadas. Exemplos. O recurso aos computadores convencionais. Considerações de natureza arquitectónica. Limitações de ordem prática e de índole económica. O recurso a processadores satélite especializados. Opções arquitectónicas e débito de processamento. Custos. A micro-informática e o processamento de variáveis indexadas. Potencialidades e limitações. Uma Solução exequível com a indústria nacional. Potencialidades.

## INTRODUÇÃO

Uma das notações mais fecundas das linguagens de alto nível tradicionais e a de variável indexada. Uma variável indexada permite representar à custa de um ou só nome um conjunto de valores do mesmo tipo e permite referenciar cada um desses valores através de um ou mais índices que identificam univocamente a sua posição no conjunto.

A inclusão de variáveis indexadas no rol de objectos de base das linguagens de alto nível correspondeu, desde os primórdios destas linguagens, a necessidade, observada fundamentalmente no domínio do Cálculo Científico de dispor de meios adequados ao manuseamento eficaz de matrizes e de vectores.

Com o despontar, em meados da década de sessenta do ramo de Processamento Digital de Sinais o recurso a variáveis indexadas assumiu uma importância renovada, e a rápida expansão das aplicações deste ramo em sectores tão distintos como o da biomedicina, de radar, da acústica, da sismologia, da análise de imagens, da prospecção petrolífera, da análise da fala, da transmissão de dados, e tantos outros, passou a motivar uma procura intensiva de equipamento cada vez mais eficiente para o processamento deste tipo de variáveis.

As aplicações vulgares das variáveis indexadas são por natureza computação intensivas, requerendo normalmente que milhares de operações aritméticas sejam executadas de forma repetitiva sobre um conjunto de dados elementares, e esse facto motivou que um dos requisitos mais críticos do equipamento a utilizar tivesse passado a ser a velocidade de processamento.

Como exemplo de uma aplicação sugestiva do processamento de variáveis indexadas pode citar-se, no âmbito da biomedicina, e tomografia axial computadorizada. A fim de apreciar a transparência e os raios X dos tecidos biológicos localizados num plano a analisar procede-se, segundo uma sequência de ângulos de incidência consecutivos, à translação do um conjunto constituído por uma fonte de raios X e por uma bateria de sectores situados segundo esse plano. Num modelo comercial, que podemos aqui tomar como referência, são utilizados 30 detectores, cada um dos quais capta 600 impulsos durante cada translação. O conjunto roda de  $10^\circ$  entre duas translações num total de  $100^\circ$ , o que corresponde a  $18 \times 30 \times 600 = 324\,000$  medidas, que são obtidas num tempo de 20 segundos. A reconstituição da imagem a partir destas medidas é obtida por processos que recorrem ao manuseamento intensivo de matrizes e à execução de transformadas rápidas de Fourier, o que, como se poderá prover do elevado número de valores a analisar, implica computações extremamente morosas, que interessa executar com rapidez máxima. Processadores de variáveis indexadas muito especializados permitem hoje em dia obter resultados em tempo real, enquanto o doente está a ser observado.

Outros exemplos muito correntes de aplicações do processamento de variáveis indexadas podem ser recolhidos no sector industrial, onde processadores digitais de sinais são largamente utilizados na análise da vibração de peças rotativas cujo comportamento se encontra encoberto por ruídos parasitas, no estudo de fenómenos de turbulência, na localização de fontes de ruídos, e, de um modo geral, na identificação do comportamento dinâmico dos sistemas de todos os tipos, desde simples circuitos osciladores até centrais nucleares.

No texto que se segue procura-se traçar uma panorâmica das alternativas que se apresentam, em termos de equipamento, aos utilizadores de métodos de análise que envolvem o processamento intensivo de variáveis indexadas. Incluem-se nesta panorâmica algumas considerações acerca das perspectivas que se antevêm no sector da micro-informática, e a concluir esboça-se a descrição de um projecto que actualmente se desenvolve no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Coimbra com o objectivo de colocar o processamento rápido de variáveis indexadas ao alcance dos utilizadores dos micro-computadores.

## PROCESSAMENTO SEM EQUIPAMENTO ESPECIALIZADO

O débito de processamento de um computador para fins gerais, quando este é utilizado em cálculos que envolvem variáveis indexadas, depende fortemente da sua arquitectura. Se se tratar de um computador predominantemente série, como é o caso da maior parte dos mini computadores. Não se lhe pode exigir velocidades muito elevadas, já que terá de recorrer, na melhor das hipóteses, a uma instrução sequencial por cada par de dados elementares mobilizados. A utilização intensiva das formas correntes de indexação e o recurso a unidades aritméticas que incluem circuitos rápidos de multiplicação permitem compensar parcialmente, morosidade do processo em aplicações que predispõem formas regulares de endereçar os dados, mas são praticamente inúteis quando os problemas a resolver requerem padrões de endereçamento irregulares. Nesses casos torna-se necessário proceder ao cálculo de endereços, e o débito de processamentos reduz-se então a valores incompatíveis com grande número de aplicações.

Embora as arquitecturas integralmente do tipo pipe-line tenham uma representação praticamente nula ao nível dos computadores comerciais, alguns dos seus princípios base de antecipação intensivo e de partição de unidades funcionais encontram-se largamente difundidos em sectores específicos dos modelos comerciais de grande e médio porte. O acréscimo da velocidade relativamente às soluções do tipo série é apreciável no que toca a operações convencionais sobre vectores e matrizes – especialmente nos modelos que incluem unidades especializadas no manuseamento de variáveis indexadas - mas os problemas emergentes do formas do endereçamento irregular tornem-se de um modo geral mais críticos visto que expõem a arquitectura a conflitos de acesso, e por vezes de dependência, que degradam substancialmente a velocidade de processamento.

Grande parte dos computadores de grande e médio porte que se produzem nos nossos dias obedecem aos princípios do multiprocessamento.

Compreende-se assim que a sua aptidão para o processamento intensivo de variáveis indexadas depende não somente da arquitectura, mas também e de forma muito definida, do modo como a utilização dessa arquitectura é otimizada pelo compilador e pelo sistema de exploração. É sensível e de resto justificável, a correlação que a este nível se observa entre preço e aptidão para aplicações específicas. Nos sistemas mais modernos a preocupação essencial é cumprir globalmente os objectivos do um computador para fins gerais, procurando satisfazer a média das aplicações comuns, o processamento intensivo de variáveis indexadas não encontra aqui terreno propício a grandes expectativas. Nos sistemas gigantes o refinamento das opções para fins específicos atinge proporções incalculáveis, que contemplam sem quaisquer reticências os objectivos mais minuciosos. O processamento de variáveis indexadas surge então como, uma área amplamente contemplada é capaz de satisfazer os caprichos dos clientes mais exigentes e mais abastados. Entra-se no foro das aplicações militares, onde as virtualidades de processamento digital de sinais, especialmente no que toca à sua utilização em radar, são exploradas até aos limites da tecnologias e da absurdo.

## O RECURSO A EQUIPAMENTO ESPECIALIZADO

Da panorâmica que acima se traçou a propósito das possibilidades de utilizar computadores para fins gerais no processamento intensivo de variável, indexadas compreende-se que uma parcela apreciável dos utilizadores deste tipo de processamento - cujos trabalhos se desenrolam em ambientes de índole laboratorial, e requerem com frequência respostas em tempo real - não veja facilmente satisfeitos os seus requisitos mínimos de velocidade e eficiência. Com efeito, as máquinas ao alcance destes utilizadores são de um modo geral minicomputadores (se não mesmo micro-computadores) cujos modestos débitos de processamento ficam muito aquém dos mínimos aceitáveis em grande número de aplicações de tempo real ou em situações em que o volume de dados a tratar é elevado.

Com o objectivo de satisfazer estes utilizadores, começaram a surgir, a partir dos primeiros anos da década de setenta, fabricantes dedicados a produção de processadores capazes de operar como satélites dos minicomputadores já existentes e especialmente optimizados para o processamento de variáveis indexadas. Inicialmente os esforços de optimização dirigiram-se quase exclusivamente para o cálculo da transformada rápida de Fourier, que constituía o obstáculo mais firme A obtenção de

resultados aceitáveis. mas pouco a pouco foi-se reconhecendo a necessidade de otimizar globalmente os cálculos e manipulações a efectuar sobre vectores e matrizes, e surgiram os verdadeiros processadores de variáveis indexadas.

De um ponto de vista funcional. estes processadores comportam-se como periféricos do computador hospedeiro. Recebem deste informação de inicialização e de controle. e operam sobre blocos de dados que. este lhes envia, através dos seus canais de acesso directo. sempre que necessita de cálculos altamente repetitivos. Uma vez transferida uma cadeia de dados. hospedeiro e satélite. passam a operar independentemente, o que permite atribuir ao primeiro a função de supervisor global do sistema, que toma a seu cargo o controle das memórias do massas e da generalidade dos periféricos. reservando para o segundo toda a carga computacional repetitiva e. sempre que necessário por razões de velocidade e eficiência, a troca directa de informação com o periféricos de aquisição e de visualização.

De um ponto de vista arquitectónico, os modelos actuais de processadores de variáveis indexados caracterizam-se fundamentalmente pela utilização de várias unidades aritméticas que operam em paralelo sob controle microprogramado, e pelo recurso a formatos de vírgula flutuante com os quais se procura preservar tanto quanto possível e precisão e a gama dinâmica dos dados. Os formatos utilizados normalmente nos sectores aritméticos, variam entre 32 bits (24 de mantissa e 8 de expoente binário ou 7 de expoente hexadecimal) e 30 bits (28 de mantissa e 10 do expoente binário). Os débitos de processamento que se conseguem obter para estes formato, chegam a atingir, graças ao elevado grau de paralelismo, cerca de 15 Mflops; Para além de conjuntos de rotinas residentes, em quantidade variável com as opções arquitectónicas que presidiram a fixação da dimensão da memória de programas. estes processadores -satélite podem ainda ser programados localmente, e podem receber do computador hospedeiro blocos de código correspondentes a rotinas a utilizar em alternativa. As velocidades reveladas na execução de programas padrão que envolvem cálculos intensivos sobre matrizes e vectores, e particularmente seleccionados para aplicações no processamento digital de sinais, são da ordem de 100 vezes as que se obteriam com minicomputadores de média velocidade.

Os preços destes processadores -satélite variam entre cerca de U.S.\$ 50.000, para as versões mínimas, e cerca de U.S.:\$ 200.000 para as configurações mais rápidas e completas.

## O SECTOR DA MTCROINFORMATICA

O desenvolvimento espectacular da microinformática não podia deixar de influenciar o ramo do processamento digital de sinais. quanto mais não fosse pelo despertar de opinião pública em geral, e da comunidade científica em particular, para os recursos de microelectrónica. Não admira. pois, que cedo tenham começado a surgir propostas de utilização de microcomputadores no processamento de sinais /9/, e que no momento actual se encontrem mesmo neste campo, sugestões de aplicações recreativas dirigida, a amadores /10,14/.

No entanto, e tal como acontecera anos antes do domínio dos minicomputadores, não tardou que a baixa velocidade de processamento se revelasse um obstáculo grave a quaisquer tentativas de generalização a aplicações mais ambiciosas. Perante a lentidão intrínseca dos jogos de instruções dos microcomputadores actuais, nem mesmo o acréscimo com multiplicadores monolíticos de alto velocidade, que entretanto começaram a surgir no mercado, contribuiu da forma significativa para melhorar em termos globais os seus débitos no processamento de vectores e de matrizes.

É perante este quadro que nos encontramos no momento actual, e foi também perante este quadro que o Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Coimbra decidiu propor em Abril de 1979, o lançamento do projecto de um processador satélite que desempenhasse relativamente aos actuais micro-computadores o mesmo papel que os processadores de variáveis indexadas acima descritos viram representar relativamente os minicomputadores. As notícias que entretanto começaram a vir a lume nas revistas que normalmente veiculamos tendências da indústria electrónica internacional parecem confirmar que chegou e momento de acrescentar aos micro-computadores a capacidade do processar eficazmente' variáveis indexadas /2,11.12,13/. O parágrafo que se segue descreve em traços largos a nossa opção nesse sentido.

## UMA SOLUÇÃO EXEQUÍVEL COM A INDUSTRIA NACIONAL

Na solução proposta, que se encontra em fase adiantado do projecto, optou-se antes de mais, pela escolha de 1 bus normalizado ao qual fosse acoplado o nosso processador satélite. O bus escolhido foi 3 MULTIBUS de Intel. que constitui no momento a norma industrial mais largamente aceite, e para a qual existe no momento uma especificação clara, objectiva e amplamente divulgada /8/. Esta opção deve ver objectivos fundamentais: evitar a necessidade de projectar interfaces específicos para os diversos modelos (presentes e futuros) de micro-computadores, aproveitar mecanismos já estabelecidos, e devidamente comprovados, para a arbitragem dos pedidos de acesso directo que a interligação satélite / hospedeiro necessariamente impõe, manter em aberto a possibilidade do utilizar o processador satélite em conjunto, tanto com microprocessadores de 8 bits como com microprocessadores de 16 bits e prever desde logo a sua eventual integração em sistemas com mais do que um microprocessador.

O processador em projecto será em principio, composto por dois circuitos impressos do tipo MULTIBUS: um que constitui o processador de variáveis indexadas propriamente dito que aqui designaremos por PVI, e outro que contém uma memória rápida de acesso aleatório, MR. Na figura 1 apresenta-se e exemplo de um sistema que inclui estes dois módulos.

O PVI compreende três unidades distintas: a unidade de controle, a unidade aritmética. e a unidade de indexação. A unidade de controlo promove e controle microprogramado do PVI o partir de informação de inicialização e de comandos de alto nível que lhe são enviadas pelo microprocessador que tiver a seu cargo o controlo do MULTIBUS. A unidade aritmética. que é reconfigurável sob controle dos microprogramas e que constitui um operador do tipo pipe-line inclui um multiplicador / acumulador monolítico do alta velocidade; um acumulador auxiliar e um registo de deslocamento. Destina-se fundamentalmente a operar sobre dados de 16 bits cujas escalas são ajustadas automaticamente segundo o principio da vírgula flutuante de bloco. mas está prevista a construção de microprogramas que explorem também, a título experimental um formato de vírgula flutuante com 16 bits de mantissa. Para preservar a precisão dos cálculos a largura da unidade aritmética na zona crítico destinado ,a resultados parciais é de 35 bits.

A unidade de indexação destina-se a produzir duas sequências de endereçamento. uma que é enviada para o MULTIBUS, e outra que endereça a memória rápida através de um bus auxiliar que interliga os dois módulos (Fig. 1). Para a produção destas sequências de endereçamento a unidade de indexação recorre a um principio original /4/ que permite reordenar os dados segundo padrões irregulares enquanto são lidos ou enquanto são escritos nas memórias do sistema /5/.

O módulo de memória rápida é multiplexado de forma a permitir, quer acessos originário do MULTIBUS, quer acessos promovidos pelo PVI através do bus auxiliar. A carga / descarga da memória rápida pode ser controlada e partir do MULTIBUS por quaisquer dispositivos que tenham a capacidade de se tornarem mestres do bus (micro-computadores do tipo SBC. controladores de discos. unidades de entrada / saída analógica). ou pode ser efectuado sob controle do PVI. Neste último caso. que ocorre quando se pretende transferir blocos de dados entre a memória rápida e qualquer módulo de memória que este já acoplado ao MULTIBUS, o PVI produz dois padrões de endereçamento: um que é enviado ao longo do MULTIBUS para o módulo de memória em causa e outro que se dirige através de bus auxiliar para a memória rápida. O facto das sequências de endereçamento a utilizar neste caso se prestarem a padrões de acesso irregulares permite uma utilização extremamente eficaz da memória rápida no calculo da transformada rápida de Fourier de blocos de dados cujas dimensões excedam largamente a sua capacidade /6/.

Os custos de produção de um sistema como o que acima se descreveu são baixos visto que se resumem a produção de circuitos impressos, implantação de componentes. soldadura e teste - actividades para as quais a indústria nacional está plenamente habilitada. As estimativas de custos. para as componentes prevendo uma produção superior a 100 unidades, ronda a centena de milhar de escudos por unidade, e que faz prever que. para quantidade que compensem minimamente os custos de marketing o de documentação, se podem colocar no mercado internacional um modelo como o proposto a preços inferiores a U.S.\$ 5.000. Este valor corresponde a cerca de um décimo dos que caracterizam as versões mínimas dos actuais processadores de variáveis indexadas. Embora as previsões e gamas dinâmicas destes últimos sejam francamente superiores às do modelo que propomos, e embora os seus débitos do processamento para dados de 32 bits sejam equivalentes aos que obtemos para dados de 16 bits, cremos que o nosso modelo apresenta sobre aqueles algumas vantagens apreciáveis: (1) Satisfaz, a preços muito inferiores as aplicações cada vez mais generalizadas, do processamento de sinais com dados não superiores a 16 bits (processamento de imagens, biomedicina, telefonia digital,

processamento da fala, síntese musical e muitas outras), (2) Destina-se a operar em ligação com micro-computadores, e não com minicomputadores, pelo que se dirige a um mercado extremamente mais vasto e variados (3) o facto de se integrar directamente num bus normalizado como o MULTIBUS - que aceita operar com mais do que um processador, e para o qual têm vindo a ser produzidos os módulos mais diversos - deixe em aberto a possibilidade de ser explorado em grande variedade de configurações, impõe-se antes de terminar um comentário aos aspectos de software. A utilização do proposto processador de variáveis indexadas pressupõe para além do recurso a rotinas de inicialização, a redacção de Programas de aplicação que permitam explorar cabalmente as suas capacidades. Quanto mais variados forem os blocos de programas de aplicação a fornecer com o Processador, melhor será, sem sombra de dúvidas a sua aceitação comercial. Crê-se que neste aspecto a Universidade poderá prestar um contributo inestimável, entregando aos seus alunos dos últimos anos projectos de programas de aplicação. Sendo o processamento de sinais uma área atraente, sugestiva, fortemente interdisciplinar extremamente rica em ensinamentos, ficarão a ganhar, não só a indústria nacional, mas também as universidades que prestarem essa contribuição.