

O Impacto da Rede de Interconexão no Índice de Atividade da Arquitetura APO

João Angelo Martini¹, Marcos A. Cavenaghi², Claudinei Geraldo^{1,Ψ}, Evaldo Gardenali²

¹ Departamento de Informática, Universidade Estadual de Maringá
Av. Colombo 5790, Maringá - PR, Brasil
{jangelo@din.uem.br}

² Departamento de Computação, Universidade Estadual Paulista
Av. Luiz Carrijo Coube s/n, Bauru - SP, Brasil
{cavenagh@fc.unesp.br}

Resumo—

Este trabalho apresenta um estudo da influência da rede de interconexão sobre o desempenho da arquitetura APO. O trabalho avalia principalmente o impacto da rede de interconexão sobre o desempenho da arquitetura, permitindo identificar para quais taxas de transmissão da rede ocorre melhor desempenho da arquitetura. Os resultados deste trabalho mostram que a modificação arquitetural implementada na APO proporcionou grande melhoria de desempenho, solucionando dessa forma o problema do índice de atividade nas unidades da arquitetura. Os resultados mostram também que há um amplo espaço para a investigação de arquiteturas paralelas com interligação através de redes ópticas. Finalmente, o artigo discute oportunidades de continuidade de investigações futuras para este trabalho, apresentando novos desafios que são a continuidade natural dos trabalhos até agora desenvolvidos pelo grupo.

Palavras-chave— Rede de Interconexão, WDM (Wavelength Division Multiplexing), Arquiteturas de Alto Desempenho, Avaliação de Desempenho.

Abstract—

This work presents a study on the impact of the interconnection network on the performance of the APO architecture. The central point is the investigation of the interconnection network on the transmission rates for the APO architecture. The results show that architectural modifications implemented in the APO has led to an increase in performance, solving the active time problem observed during simulations with the first version of the APO. These results have also led to an intensive investigation on the convergence between parallel architectures and optical interconnection networks. Finally, the work discusses new opportunities for future works, presenting new challenges as a natural continuation for the work that has already been developed.

Keywords— Interconnection Network, WDM (Wavelength Division Multiplexing), High Performance Architectures, Performance Evaluation.

I. INTRODUÇÃO

Redes de interconexão desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de um Sistema Paralelo, sendo um fator determinante para o seu desempenho, confiabilidade e custo. As limitações conhecidas das redes de interconexão eletrônicas tais como largura de banda e desempenho não satisfatórios [STO91, LOU94, BOR94] levam à investigação de outras tecnologias capazes de suportar estes requisitos. Estas investigações trazem à luz uma promissora tecnologia: comunicação óptica.

Esta tecnologia pode satisfazer os requisitos de largura de banda e desempenho impostos pelas altas taxas de comunicação observadas nesses sistemas. Redes de interconexão baseadas nesta tecnologia (redes de interconexão óptica) são amplamente estudadas. Neste contexto, *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) [WIL97, SEN98, BOR97] pode ser usado para implementar tais redes.

WDM divide a largura de banda da fibra óptica em canais assíncronos, cada qual com um diferente comprimento de onda e taxa de transmissão. Este mecanismo permite a implementação de taxas da ordem de Tb/s (Terabits/s). As redes baseadas em WDM têm algumas vantagens sobre as redes eletrônicas convencionais [BOR94, CHA99]:

- **Largura de Banda:** a largura de banda de uma fibra é de 25THz e há sistemas comerciais operando em Gb/s e sistemas experimentais em Tb/s. A tecnologia comercial atual está muito próxima dos 40Gbps por canal e com a evolução observada nos últimos anos, acredita-se que velocidades de Tbps serão alcançadas em breve.
- **Baixo Nível de Perdas:** em seu comprimento de onda de atenuação mínima, 1,55 μm , a perda em uma fibra é da ordem de 0,2 dB/Km, enquanto que num cabo coaxial de cobre a perda é de 2,5 dB/Km em um sinal de 1 MHz e mais de 50 dB/Km em 1 GHz. Essa

^Ψ Aluno Bolsista PIBIC-CNPq/UEM

atenuação é muito mais relevante quanto mais alta for a taxa de transmissão.

- Escalabilidade: a perda de potência em um barramento comum cresce linearmente com o número de processadores, já num acoplador estrela passiva (PSC - *Passive Star Couple*) cresce logaritmicamente. Isso permite acoplar uma quantidade razoável de nós à rede sem a utilização de regeneradores.
- Modularidade: na maioria dos sistemas *single-hop* um nó pode ser acrescentado à rede sem necessidade de se redimensionar o sistema todo. Isso é ideal para Sistemas de Alto Desempenho, em que a adição de um nó ao sistema deve ser o mais simples possível.
- *Multicasting*: *broadcasting* e *multicasting* são viabilizados em uma rede WDM devido à natureza *broadcast* do acoplador PSC.

Este é um trabalho evolutivo que se insere dentro do contexto das linhas de investigação propostas em Redes de Interconexão para Sistemas de Alto Desempenho. Ele investiga o impacto da rede de interconexão sobre o desempenho de uma arquitetura paralela denominada APO (Arquitetura Paralela com rede de interconexão Óptica) [MAR99].

A. Contexto de Redes de Interconexão em Arquiteturas Paralelas

O desenvolvimento de redes de comunicação e arquiteturas paralelas está relacionado desde os projetos pioneiros. Muitos projetos experimentais em arquiteturas paralelas foram investigados a partir de então e têm servido como base para subseqüentes desenvolvimentos na área de redes de alta velocidade baseadas em comunicação óptica.

Porém, o interesse em relação às pesquisas na área de Arquiteturas Paralelas tem tido altos e baixos apresentando um comportamento cíclico de problemas e soluções em que novos experimentos e estudos trazem à tona problemas anteriormente não detectados e suscitam a busca de soluções através do desenvolvimento de novas pesquisas.

O interesse pela área diminuiu quando se identificou que o subsistema de interconexão era tão ou mais complexo do que todo o restante da arquitetura. Conforme a velocidade dos elementos computacionais foi aumentando, cada vez mais o gargalo foi recaindo sobre a interconexão entre os elementos [STO91, LOU94]. Dentro desse ciclo problema-solução se inserem dois trabalhos de investigação na área de redes de interconexão. O primeiro, desenvolvido por Martini [MAR94] discute a influência das redes de interconexão na arquitetura Wolf [CAV00a, CAV00b, CAV98]. Nesse trabalho, implementou-se duas redes de interconexão para as quais foram testadas diversas topologias: *crossbar*, *GSN* e *Delta*. Foram analisadas todas as combinações desses pares de redes de interconexão para uma série de programas de teste.

Esse trabalho mostrou que não há uma única combinação de topologias para as redes de interconexão da arquitetura que seja eficiente para todos os casos. Esse é o principal resultado do trabalho de Martini [MAR 94], colocando a fotônica numa perspectiva de ser a abordagem que poderia viabilizar a arquitetura. Também neste contexto se insere outro trabalho desenvolvido por Martins [MAR 98] que mostra a viabilidade e o potencial de exploração e investigação dessa nova tecnologia (fotônica) para arquiteturas paralelas em geral.

II. ARQUITETURA APO

Esse processo de investigação de uma rede de interconexão para a arquitetura Wolf conduziu a uma nova proposta de arquitetura paralela, denominada APO, mostrada na Figura 1.

As unidades que compõem a arquitetura são: unidade de Entrada e Saída (E/S), unidade de Controle de Fluxo (CF), Memória de Estruturas (ME), Memórias de Dados (MD's) e os Elementos de Processamento (EP's) formados pelas Memórias de Instruções (MI) e Unidades Funcionais (UF).

A comunicação entre as unidades é realizada através da troca de pacotes que representam dados. Esses pacotes também contêm informações de controle sobre o dado que eles representam. É na existência desses pacotes e na necessidade da troca destes pelas unidades que compõem a arquitetura, que se inserem as redes de interconexão estudadas.

A. Descrição Funcional

Para um melhor entendimento dos requisitos de comunicação na arquitetura APO e como as redes de interconexão se encaixam nesta, esta subseção apresenta uma breve descrição funcional da arquitetura, tomando como base a movimentação dos pacotes entre cada unidade.

A rede de interconexão envia os pacotes de dados provenientes da Entrada para as Memórias de Dados, que são responsáveis pelo armazenamento dos operandos das instruções. No caso da MD de destino já estar sendo utilizada, o pacote é armazenado na unidade de Controle de Fluxo para posterior distribuição. As MD's geram pacotes contendo o(s) operando(s) de uma instrução. Este pacote é distribuído para um dos Elementos de Processamento.

A Memória de Instruções armazena as informações do nó para o qual o(s) operando(s) é(são) dirigido(s). Ela produz um pacote contendo todas as informações necessárias para executar a instrução e o envia para sua correspondente Unidade Funcional que executa a instrução, produzindo resultados (mais operandos ou o resultado final). A Memória de Estruturas (ME) é usada para armazenar estruturas de dados como vetores e matrizes, explorando o paralelismo nessas estruturas de dados.

Para investigar as redes de interconexão propostas para a arquitetura APO utilizou-se um simulador dirigido a

tempo. O simulador implementa todas as características da arquitetura descrita nesta subseção e apresentada na Figura 1.

B. Protocolo de Controle e Requisitos de Comunicação da Arquitetura APO

A rede de interconexão deve interligar as unidades da arquitetura obedecendo aos requisitos de comunicação apresentados por elas. Optou-se por utilizar um protocolo de controle que evite colisões, assim deve haver algum tipo de controle que faça o gerenciamento quando duas ou mais unidades (nós) tentam transmitir simultaneamente para o mesmo destino. Portanto, é necessário um protocolo de controle que arbitre o acesso ao meio de transmissão para permitir que as unidades efetuem suas transmissões.

Neste trabalho empregou-se um protocolo de controle baseado em nó central [MAR00]. A arquitetura da rede é baseada no sistema WDM *single-hop* [MUK92]. Cada nó da rede recebe dados através de um canal (comprimento de onda) específico. Dessa forma, um nó transmissor que queira transmitir para um determinado destino deve ter seu transmissor sintonizado no comprimento de onda específico do receptor de destino desejado.

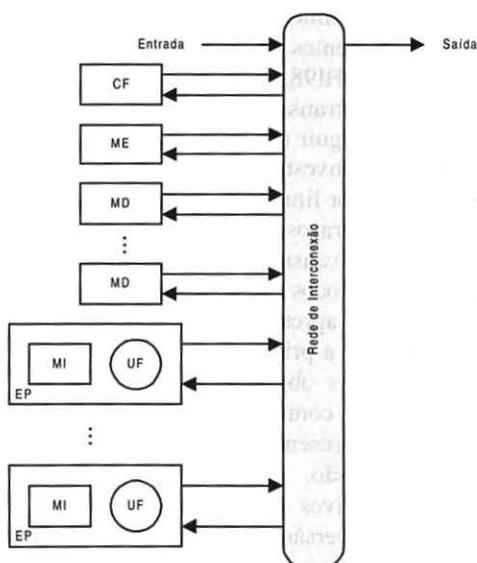


Fig. 1 Arquitetura APO

B.1 Descrição do Protocolo com Nó Central

O controle para transmissão é realizado durante o período de tempo denominado de ciclo de controle. Após o ciclo de controle é realizada a transmissão do pacote de dado. Esse período é chamado de ciclo de transmissão.

Neste protocolo cada nó que deseja transmitir seu dado faz um pedido de transmissão para o nó controlador central. O nó controlador central analisa os pedidos e envia as respostas para os nós que requisitaram permissão para transmitir.

Cada nó envia o endereço do destino para o qual deseja transmitir, o controlador verifica os pedidos e evita que ocorram colisões no caso de mais de um nó requisitar o mesmo destino. O controlador utiliza a técnica *round-robin* para gerenciamento dos pedidos. Assim, a cada ciclo de controle alterna-se a ordem de transmissão e o nó de maior prioridade num ciclo será o de menor prioridade no ciclo subsequente.

B.2 Descrição dos Nós em Função dos Transmissores e Receptores

Nesta subseção são apresentadas as estruturas de cada nó em termos de transmissores e receptores. Cada nó deve ter um transmissor e um receptor para efetuar o ciclo de controle, além dos transmissores e receptores para realizarem a transmissão e recepção dos pacotes.

A estrutura de cada nó é mostrada na Figura 2 (A: Entrada/Saída; B: Elemento de Processamento; C: Memória de Estruturas; D: Unidade de Controle de Fluxo; E: Memória de Dados). Cada nó faz o pedido de transmissão ao controlador através do transmissor de controle Tx_{Ci} e recebe a resposta do seu pedido através do receptor de controle Rx_{Ci} .

Os outros transmissores enviam pacotes para os destinos desejados. Em algumas unidades utiliza-se um transmissor fixo para pacotes destinados à CF, pois o nó sintoniza primeiro tentando enviar pacotes para a MD. Caso não receba a permissão para transmitir para a MD e sim para a CF, então não precisa sintonizar novamente seu transmissor.

III. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA ARQUITETURA APO EM FUNÇÃO DA REDE DE INTERCONEXÃO

Esta seção apresenta a avaliação de desempenho da arquitetura APO em função da rede de interconexão e do posicionamento da unidade de Controle de Fluxo (CF). Para realizar esta avaliação utilizou-se o parâmetro denominado Índice de Atividade, que é calculado como sendo a quantidade de ciclos que determinada unidade ficou ativa dividida pelo tempo total consumido na simulação, ou seja, a porcentagem do tempo de atividade da unidade durante a simulação. Este parâmetro permite investigar o impacto da rede de interconexão sobre o desempenho da arquitetura [LIS97].

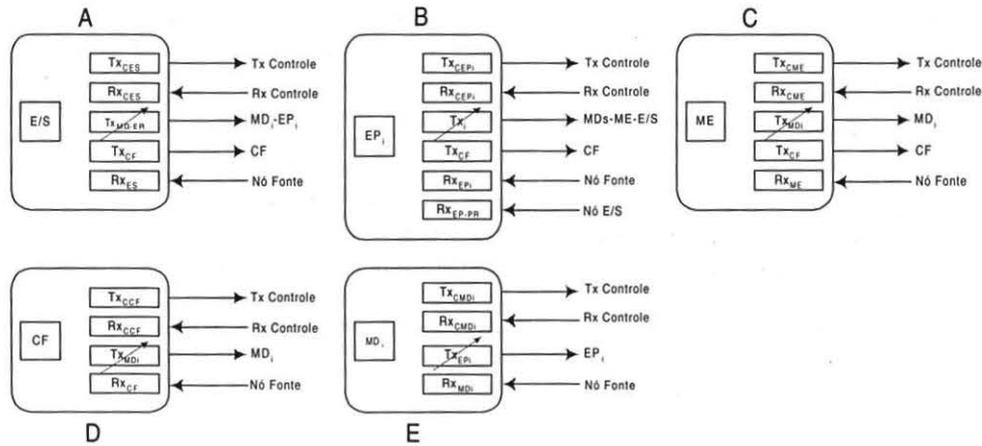


Fig. 2 Estrutura de cada nó

Esta investiga o foi realizada para a arquitetura APO mostrada na Figura 1 e para uma varia o da arquitetura, com unidades de CF distribuídas conforme mostrado na Figura 3. O modelo proposto para a arquitetura na Figura 3 acena como uma abordagem alternativa ao modelo da Figura 1, já que poderá apresentar resultados melhores para o  ndice de Atividade, uma vez que este novo modelo distribui melhor o tráfego na arquitetura através da cria o de várias unidades CF. Resumidamente, distribuiu-se o *buffer* compartilhado (CF da Figura 1), entre todas as unidades que o utilizariam (MD's da Figura 1) resultando na arquitetura da Figura 3.

Essa nova abordagem foi implementada a fim de se verificar se os resultados coletados confirmavam a aposta inicial de que o tráfego seria melhor distribuído na arquitetura, visto que o modelo inicial da APO com apenas uma unidade CF poderia apresentar sobrecarga desta unidade, levando   obten o de índices de Atividade baixos para todas as unidades da arquitetura.

Do ponto de vista da rede de interconexão, essa nova abordagem da arquitetura conduziu a uma redu o do número de dispositivos empregados para se efetuar as transmissões. Isto pode ser entendido através das Figuras 2 e 3: como a arquitetura passa a contar com um novo bloco constituído pelas unidades CF e MD, elimina-se a necessidade do transmissor e do receptor de controle da CF (Tx_{CCF} e Rx_{CCF}) uma vez que esse controle pode ser feito pela própria MD. Além disso, reduz-se também um transmissor de dados da CF e um receptor de dados da MD, já que a transmissão   realizada apenas pela MD e a recep o apenas pela CF correspondente.

A. Resultados

Para a investiga o utilizou-se o simulador da arquitetura APO implementado em C++. As simula es foram realizadas com a utiliza o de programas que geram tráfego intenso na rede de interconexão: Fatorial,

Integra o Binária, Gauss, Interpola o, Laplace, Multiplica o de Matrizes, N-Queens e Simple [CAV98]. Foram usadas diversas taxas de transmissão durante as simula es. As taxas de transmissão usadas foram: $Tx_{2,5}$ para 2,5 Gbps, Tx_5 para 5 Gbps, Tx_{10} para 10 Gbps, Tx_{20} para 20 Gbps, Tx_{40} para 40 Gbps e Tx_{400} para 400 Gbps.

A faixa de taxas de transmissão abrange taxas disponíveis comercialmente até as taxas mais elevadas factíveis em ambientes de laboratórios de pesquisas [WIL97, SEN98, SHI98, TER98, AIW98, CHE98]. Os valores das taxas de transmissão são multiplicados por dois até a taxa Tx_{40} e a seguir multiplicou-se a taxa por um fator de dez a fim de se investigar a possibilidade de encontrar uma margem superior limitante para a taxa de transmissão.

A Figura 4 mostra os índices de Atividade (IA) como fun o das taxas de transmissão (Tx_i) para os blocos EP's e a Figura 5 para os blocos constituídos pelo conjunto CF's e MD's. Cada gráfico apresenta a diferença percentual entre os IA's obtidos com a primeira versão da arquitetura APO (Figura 1) e aqueles obtidos com a versão derivada da primeira (Figura 3), com a distribu o da unidade CF. O eixo vertical está representando porcentagens e o horizontal as taxas de transmissão.

Os valores positivos indicam que se obteve ganho de desempenho com a versão derivada, isto  , mostram que os IA's tiveram crescimento em fun o da distribu o da unidade CF. Os valores negativos mostram os casos em que a primeira versão da arquitetura apresentou melhor desempenho que a versão derivada. Todos os gráficos mostram a tendência de comportamento dos IA's em fun o da varia o da taxa de transmissão da rede de interconexão. Os  ndices de atividade dos EP's e MD's apresentam comportamento semelhante.

Os resultados mostram que, em geral, há um crescimento bastante significativo do IA para a segunda versão da APO. Por exemplo, para o programa N-Queens, nas figuras 4 e 5, nota-se um crescimento acima de 100% para o valor do IA para as taxas de transmissão $Tx_{2,5}$ e Tx_5 .

Esse crescimento é mais acentuado para a faixa de taxa de transmissão que vai de $Tx_{2,5}$ a Tx_5 . A partir de Tx_{10} , apesar de ainda ocorrer crescimento do IA, ele é menos acentuado.

A região abrangendo a faixa de transmissão que vai de Tx_{20} a Tx_{40} é a que apresentou o pior desempenho, sendo que em alguns casos como, por exemplo, para os programas Integração Binária, Gauss e Multiplicação de Matrizes (Figura 4), a versão preliminar da arquitetura APO proporcionou melhor desempenho, por isso, esses respectivos gráficos apresentam valores negativos. Para Tx_{400} a segunda versão da arquitetura APO volta a apresentar um ganho de desempenho, propiciando um aumento significativo para o IA para a maioria dos programas.

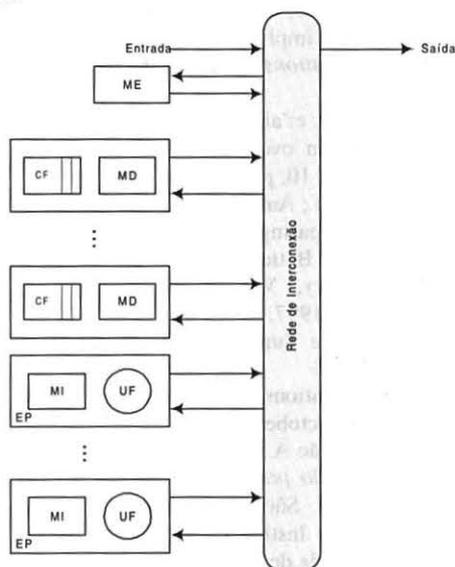


Fig. 3 Arquitetura APO com unidade CF distribuída

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a influência da rede de interconexão sobre o desempenho da arquitetura e apresentou uma nova versão da arquitetura APO que implementa unidades de Controle de Fluxo distribuídas. Investigou também o impacto dessa alteração arquitetural sobre o desempenho da rede de interconexão que compõe a arquitetura. As modificações implementadas na arquitetura a partir de sua configuração base possibilitam de imediato algumas vantagens significativas do ponto de vista da rede de interconexão:

- Simplificação do Mecanismo de Transmissão/Recepção: os nós da rede se tornam menos complexos em termos de transmissores e receptores;
- Simplificação do Protocolo de Controle: a primeira consequência direta dessa simplificação se traduz também numa complexidade menor para o controlador central;

- Menor Custo: conseqüente redução de custo de implementação;
- Quantificação: permite quantificar a largura de banda requisitada pela arquitetura.

Os resultados deste trabalho mostram ainda que a modificação arquitetural proporcionou melhoria de desempenho para a arquitetura APO, visto que a diferença percentual entre os valores obtidos para o IA para as duas versões da arquitetura é grande. Dessa forma, este trabalho apresenta a solução para o problema do índice de atividade nas unidades da arquitetura APO, usando uma rede de interconexão de alto desempenho para implementar a comunicação entre suas unidades. Mostram também que a taxa de transmissão tem um impacto muito significativo sobre o desempenho da arquitetura: conforme se aumenta a taxa de transmissão aumenta-se também o IA.

As curvas mostradas apresentam um comportamento característico com valores iniciais elevados para o ganho de IA e um decréscimo em torno da faixa de transmissão de Tx_{10} a Tx_{40} , com elevação do ganho novamente em torno de Tx_{400} . Isso indica que, dentre as taxas de transmissão testadas para a rede de interconexão, Tx_{400} é a que proporciona o maior desempenho. No entanto, como há um intervalo da ordem de dez vezes entre as taxas Tx_{40} e Tx_{400} , há uma margem de taxas de transmissão que demanda uma nova investigação a fim de se delimitar a faixa de transmissão que proporcione melhor custo/desempenho para a arquitetura.

Este trabalho mostrou também que o IA depende não apenas de alterações arquiteturais, mas também da taxa de transmissão da rede de interconexão e que a combinação de característica arquitetural e velocidade de transmissão pode influenciar no comportamento do desempenho da arquitetura, visto que para Tx_{20} e Tx_{40} o desempenho da versão 1 da APO é melhor que o da versão 2. Neste ponto, far-se-ão necessárias maiores investigações para identificação de possíveis transientes que possam estar originando este tipo de resultado.

Algumas das contribuições deste trabalho no contexto da pesquisa de redes de interconexão são:

- Intensificar a investigação de tecnologia óptica em redes de interconexão aplicadas em Sistemas de Alto Desempenho/Arquiteturas Paralelas;
- Explorar a possibilidade de convergência entre mecanismos de comunicação óptica e as arquiteturas paralelas;
- Abrir o espectro de investigação para uma nova linha de pesquisa que é interconexão para *Petaflops Computing*, tendo como base as redes de interconexão ópticas de alta velocidade;
- Consolidar as linhas de pesquisa do grupo HPPCA (www.din.uem.br/~hppca).

V. TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abre um amplo espectro de novas possibilidades de investigações futuras, as quais são sintetizadas a seguir:

- Uma continuidade direta para este trabalho consiste na investigação de limitantes inferior e superior para as taxas de transmissão a partir dos resultados obtidos. Isso demanda um intenso exercício de simulação, com refinamentos em relação ao *quantum* de variação na taxa de transmissão, a fim de se identificar com precisão a taxa de transmissão mais adequada à arquitetura APO;
- Uma nova abordagem do ponto de vista da rede de interconexão suscita a investigação de outras características como reconfigurabilidade e tolerância a falhas;
- A melhoria de desempenho obtida com a distribuição da unidade de Controle de Fluxo instiga também uma nova investigação a fim de se definir a melhor posição para a unidade CF;
- Isso implica conseqüentemente numa redefinição da rede de interconexão;
- O novo campo de investigação que vem demandando esforços da comunidade acadêmica e industrial trata de *Petaflops Computing*. No contexto da APO, esta nova abordagem demanda a investigação e o conseqüente estudo de um novo modelo para a rede de interconexão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Programa PIBIC-CNPq/UEM), à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), à FUNDUNESP (Fundação para o Desenvolvimento da UNESP) e ao Informar – Centro Softex Genesis de Maringá pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [AIW 98] Aisawa, S. et al. Ultra-wideband, long distance WDM demonstration of 1 Tbit/s (50x20 Gbit/s), 600 Km transmission using 1550 and 1580 nm wavelength bands. *Electronics Letters*, Vol. 34, Nº 11, p. 1127-1129, May 28, 1998.
- [BOR 94] Borella, M. et al. Optical Interconnects for Multiprocessor Architectures Using Wavelength-Division Multiplexing. *Proceedings of the Twenty-Seventh Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 1994, p. 499-508.
- [BOR 97] Borella, M. et al. Optical Components for WDM Lightwave Networks. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, Nº 8, p. 1274-1307, August 1997.
- [CAV 00a] Cavenaghi, Marcos A., Martini, João A. and Garcia Neto, A. Solution for the Wolf Architecture Load Balancing Problem. *The Proceedings of the 2000 Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS 2000)*. Vancouver, British Columbia, Canada, July 16-20, 2000. p. 103-107.
- [CAV 00b] Cavenaghi, Marcos A., Martini, João A. and Garcia Neto, A. Proposal to Solve Workload Problems in the Simulator of the Wolf Architecture. *The Proceedings of the 4th International Conference/Exhibition on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPC-Asia 2000)*. Beijing, China, May 14-17, 2000. p. 315-318. The IEEE Computer Society.
- [CAV 98] Cavenaghi, M. A.; Travieso, G. and Garcia Neto, A. A Simple Mechanism to Deal with Sequential Code in Dataflow Architectures. *Proceedings of International Conference on High Performance Computing (HiPC 98)*, Madras, India, 1998, p. 188-193. The IEEE Computer Society.
- [CHA 99] Chatterjee, S. and Pawlowski, S. Enlightening the effects and implications of nearly infinite bandwidth. *Communications of the ACM*, Vol. 42, Nº 6, p. 75-83, June 1998.
- [CHE 98] Chen, C. D. et al. 1.2 Tbit/s (30 ch x 40 Gbit/s) WDM transmission over 85 Km fibre. *Electronics Letters*, Vol. 34, Nº 10, p. 1002-1004. May 14, 1998.
- [LIS 97] Liszka, K. J.; Antonio, J. K. and Siegel, H. J. Problems with Comparing Interconnection Networks: Is an Alligator Better Than an Armadillo? *IEEE Concurrency*, Vol. 5, Nº 4, p. 18-28, October-December 1997.
- [LOU 94] Louri, A. e Sung, H. 3D Optical Interconnects for High-Speed Interchip and Interboard Communications. *IEEE Computer*, Vol. 27, Nº 10, p. 27-37, October 1994.
- [MAR 94] Martini, João A.. *Estudo de Desempenho de Redes de Interconexão para a Arquitetura a Fluxo de Dados Proto-Wolf*. São Carlos, 1994. 110 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [MAR 98] Martins, João E. M. P. *Investigação de Técnicas Fotônicas de Chaveamento Aplicadas em Arquiteturas Paralelas*. São Carlos, 1998. 197 p. Tese de Doutorado. Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [MAR 99] Martini, João A. et al. Proposal of a Dataflow Architecture with Optical Interconnection Network. *Proceedings of High Performance Computing Symposium - HPC'99*, 1999, San Diego, California. p. 377-380.
- [MAR 00] Martini, João A.; Cavenaghi, Marcos A. and Garcia Neto, Álvaro. On The Impact of Control Protocols for Optical Networks on Execution Time in a Parallel Architecture. *Proceedings of the 4th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing – ICA3PP*, 2000, Hong Kong, China.
- [MUK 92] Mukherjee, B. WDM-Based Lightwave Local Networks. Part I: Single-Hop Systems. *IEEE Network*, V. 6, Nº 3, p. 12-27, May 1992.
- [SEN 98] Senior, J. M.; Handley, M. R. e Leeson, M. S. Developments in Wavelength Division Multiple Access Networking. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 36, Nº 12, p. 28-36, December 1998.

[SHI 98] Shi, H. et al. 20x5 Gbit/s optical WDM transmitter using single-stripe multiwavelength modelocked semiconductor laser. *Electronics Letters*, Vol. 34, Nº 2, p. 179-181, January 22, 1998.

[STO 91] Stone, H. S. e Cocke, J. Computer Architecture in the 1990s. *IEEE Computer*, Vol. 24, p. 30-38, September 1991.

[TER 98] Terahara, T. et al. 0.7 Tbit/s (66x10.66 Gbit/s) WDM transmission over 2212 Km using broadband, high-power EDFA with pump reflector. *Electronics Letters*, Vol. 34, Nº 10, p. 1001-1002, May 14, 1998.

[WIL 97] Willner, A. E. Mining the optical bandwidth for a terabit per second. *IEEE Spectrum*, Vol. 34, Nº 4, p. 32-41, April 1997.

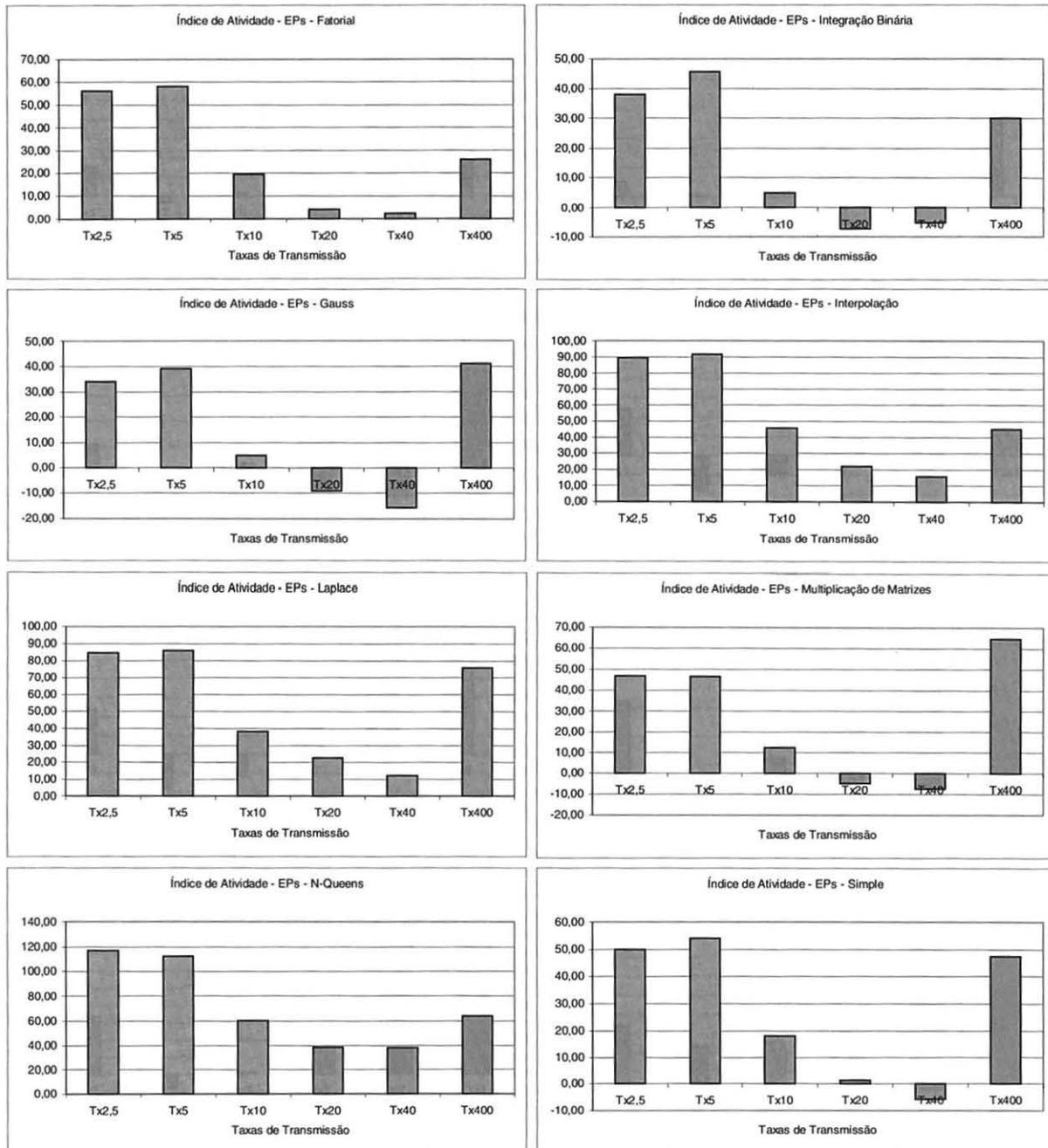


Fig 4 Diferença Percentual entre os Índices de Atividade dos EP's para as duas versões da APO

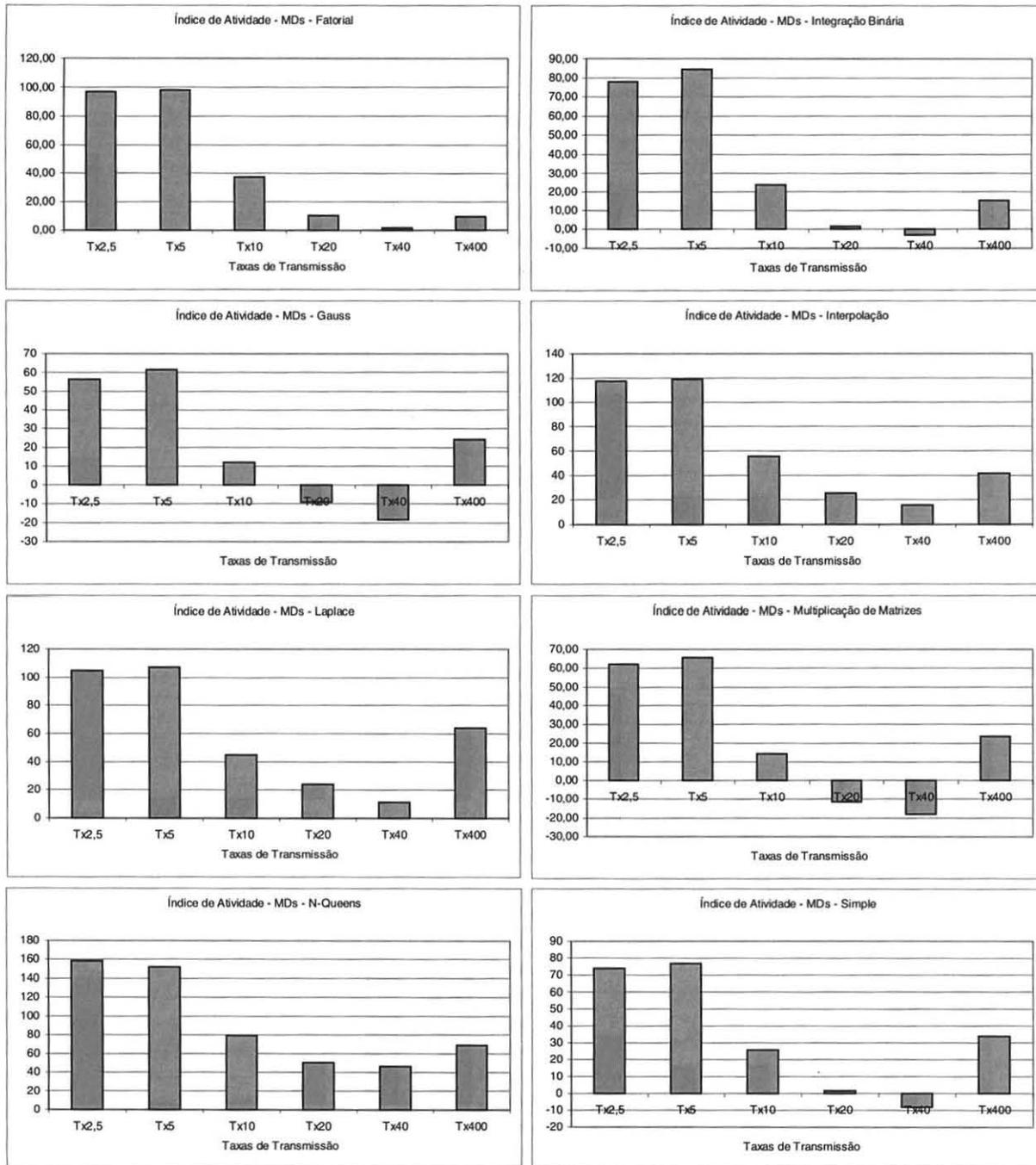


Fig 5 Diferença Percentual entre os Índices de Atividade das MD's para as duas versões da APO