

## AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MÁQUINAS PARALELAS

Philippe Navaux, Paulo Fernandes, Maurizio Tazza\*  
Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
CX. Postal 1501, 90001, Porto Alegre, RS-BRASIL

### RESUMO

O estudo do desempenho de Máquinas Paralelas passa pelo uso de ferramentas que possam modelar da melhor forma possível o comportamento destas máquinas. O presente artigo propõe níveis de influência no desempenho de máquinas paralelas e por consequência um ambiente para modelagem e avaliação de desempenho. Apresenta-se SARA, um exemplo de ferramenta de avaliação para o ambiente proposto e discute-se a validade da proposta.

### ABSTRACT

Parallel machines performance analysis needs modelling tools to find out the best machine behavioral model. This paper presents a proposition for performance influence levels to parallel machines and also a performance evaluation environment. SARA, a processor interconnection analysis tool is presented and the proposal effectiveness is discussed.

### 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos quarenta anos de existência do computador sempre que projetistas de arquitetura definem uma nova máquina, uma dúvida assalta a equipe de projeto: qual será a performance desta máquina? ou qual será sua melhor configuração? Para responder a estas perguntas foram desenvolvidas ferramentas que permitem obter uma prévia avaliação do comportamento de uma máquina antes do seu projeto definitivo e construção. Com o advento das máquinas paralelas e toda gama de arquiteturas especiais, tornou-se praticamente obrigatório o emprego de ferramentas de avaliação para previamente estabelecer a melhor configuração para uma dada aplicação.

Ferramentas de avaliação de desempenho necessitam de um modelo que descreva a máquina a avaliar. A acuracidade dos resultados da avaliação está diretamente ligada a acuracidade deste modelo, porém, o custo de desenvolvimento de modelos exatos pode ultrapassar os custos da própria execução física da máquina. Busca-se então, ferramentas de avaliação de desempenho genéricas que possam ser aplicadas a toda uma classe de máquinas fornecendo resultados suficientemente precisos para uma série de máquinas reais distintas. Estas ferramentas possuem mo-

delos básicos de comportamento, aos quais associa-se um conjunto de parâmetros, gerando um modelo específico para cada máquina a avaliar. Enquanto descrevemos máquinas paralelas como um todo indivisível, o alto grau de complexidade destas inviabiliza a geração automatizada de modelos acurados. Portanto, torna-se interessante possuir uma estratificação dos níveis de descrição de máquinas paralelas.

Busca-se uma estratificação em níveis de abstração distintos para máquinas paralelas, viabilizando a avaliação individual de cada nível descrito através de modelos mais simples e precisos. Os parâmetros obtidos em cada nível descrevem um fator de influência no desempenho de máquinas paralelas. Definidas as ferramentas específicas para cada um dos níveis, integra-se os resultados obtidos de acordo com suas interpretações. É necessário um ambiente capaz de integrar diversas ferramentas através dos resultados para uma completa avaliação da máquina para ela.

O presente artigo discute uma Metodologia de Avaliação de Desempenho de Máquinas Paralelas propondo níveis de Influência (seção 2). Mapeando as propostas para a realidade são feitas considerações sobre um ambiente de avaliação de desempenho e descreve-se SARA, uma ferramenta para este ambiente (seção 3). Finalmente discute-se a aplicabilidade desta metodologia e trabalhos futuros (conclusão).

### 2. NÍVEIS DE INFLUÊNCIA

A definição dos níveis de influência no desempenho de máquinas paralelas baseia-se nos trabalhos de definição de metodologias de classificação e de projeto de sistemas de computação em geral.

\* Curso de Pós-Graduação em Informática Industrial - CPGII/CEFET  
Av. Sete de Setembro, 3165 -  
80230, Curitiba, PR-BRASIL

Este trabalho é parcialmente apoiado por CNPq, FINEP e CAPES

## 2.1. Estratificação baseada em Metodologias de Classificação

Os níveis de influência podem ser definidos como sendo aqueles onde é possível estabelecer uma taxonomia segundo algum determinado critério. Tendo em vista que a descrição da máquina paralela será feita por usuários que classificarão sua máquina segundo tais critérios, a estratificação seria de fácil compreensão pelos usuários deste ambiente de avaliação. Desta forma, os níveis de influência seriam definidos por critérios que diferenciam as máquinas paralelas.

Um exemplo de definição de um nível de influência segundo classificação é o trabalho de Treleaven, Brownbridge e Hopkins [ 14 ] onde descreve-se uma classificação das máquinas paralelas segundo seu modelo de operação. Baseado neste, é possível definir a máquina paralela em um nível de modelo de operação.

Outro exemplo é o trabalho de Anderson e Jensen [ 1 ] onde define-se uma taxonomia de interconexões de processadores segundo critérios diversos. De acordo com esta proposta, um dos níveis de estratificação é o nível de interconexão de processadores, pois o usuário poderia caracterizar sua máquina paralela segundo o tipo de interconexão adotada.

## 2.2. Estratificação baseada em Metodologias de Projeto

Os níveis de influência podem ser definidos semelhança dos níveis de abstração utilizados para a descrição de sistemas de computação genéricos (sistemas digitais). Neste caso os níveis utilizados para descrições visando síntese automática, verificação e teste podem ser mapeados para os níveis de influência. Desta forma, é possível aproveitar tais descrições para a avaliação de desempenho. A única diferenciação entre o ambiente de projeto e o ambiente de avaliação de desempenho ocorre a nível de ferramentas que utilizariam as descrições. Enquanto ferramentas de projeto visam a síntese ou a correção das descrições, as ferramentas de avaliação estabelecem estimativas de desempenho referentes à máquina projetada.

Como metodologia de projeto existem diversas classificações em níveis como a de Siewiorek, Bell e Newell [ 11 ] que sugere quatro níveis de projeto: PMS, linguagem, projeto lógico e circuitos. Existe ainda a proposta de Hartenstein [ 5 ] que sugere sete níveis: desenvolvimento de componentes, projeto com circuitos, projeto lógico, organização de máquina, arquitetura de máquina, implementação e projeto de linguagem. Finalmente existe a proposta de Gajski e Kuhn [ 4 ] que propõe diversos níveis de abstração segundo descrições em três pontos de vista distintos: eixos funcional, estrutural e geométrico (diagrama Y).

## 2.3. Estratificação proposta

A definição dos níveis de influência segundo a possibilidade de estabelecimento de uma taxonomia visa facilitar o processo de descrição da máquina paralela. A definição dos níveis de influência pela semelhança com os níveis de descrição de projeto visa compatibilizar esforços de projeto e análise de desempenho. No entanto, estes critérios não isentam da preocupação primeira na definição de níveis de influência que é possibilitar o estabelecimento de resultados relevantes ao desempenho da máquina paralela a cada nível individualmente. Desta forma, os níveis devem ser estabelecidos com a preocupação de fornecer informações relevantes sobre os possíveis pontos de degradação de desempenho. Esta informação é traduzida pela semântica dos parâmetros obtidos pela avaliação de cada nível.

Na modelagem proposta, cada nível de abstração é composto pelas primitivas que o compõem (elementos) e pelo seu padrão de funcionamento (comportamento). Em cada nível modelamos a máquina paralela segundo uma classificação do padrão de funcionamento e uma definição da estrutura dos componentes primitivos. O quadro 1 apresenta a estratificação proposta para os diversos níveis de influência no desempenho de máquinas paralelas.

O nível de Software de Aplicação trata da modelagem no comportamento de programas, isto é, algoritmos. As primitivas deste nível são primitivas capazes de definir formalmente um algoritmo, ou seja, linguagens formais. A semântica dos resultados obtidos é a carga útil da máquina paralela. Desta forma, a partir da especificação do software de aplicação é extraído o dimensionamento da carga útil, o quanto o programa de aplicação utiliza a máquina.

O nível do Sistema Operacional abrange a modelagem de todas as rotinas de gerenciamento e acesso aos recursos físicos necessários para o funcionamento dos programas de aplicação. Neste caso as primitivas de descrição serão processos com capacidade de interação entre eles. O funcionamento básico será definido pelo tipo de S.O. adotado. Por exemplo, podemos ter o S.O. implementado através de satélites, modelo cliente/servidor, etc. A interpretação semântica dos parâmetros de saída é o "overhead", isto é, a carga adicional representada pelo software de gerência de recursos, ou seja, o sistema operacional.

Como toda máquina paralela é composta de diversos elementos de processamento, o nível de Interconexão preocupa-se em modelar a estrutura e a política de comunicação entre estes. As primitivas de descrição deste nível são os elementos típicos de descrições PMS, Processadores (ou elementos de processamento), Módulos de memória, Chaves (ou arbitradores) e Caminhos (ou barramentos). O comportamento básico é fornecido pela topologia adotada, por exemplo: anel, crossbar, estrela, etc. Como resultado os parâmetros obtidos descrevem o

Níveis de aplicação	Primitivas/ elementos	Funcionamento/ Comportamento	Parâmetros Obtidos
Software de Aplicação	linguagem	Algoritmos	carga útil
Sistema Operacional	processos	tipos de SO's	overhead de gerenciamento
Interconexão	blocos PMS	topologia	overhead de tráfego interblocos
Elementos de Processamento	Barramentos, ULA's e Chaves	arquitetura	poder de processamento
Blocos Elementares	blocos RT	organização	overhead de tráfego intrablocos
Tecnologia	transistores, portas lógicas, máscaras, etc	tecnologias Ex: gate array, CMOS, NMOS	restrições físicas de implementação

Quadro 1 - Níveis de Influência de Máquinas Paralelas

"overhead" causado pelo tráfego de mensagens entre os elementos de processamento. A este nível é possível analisar os principais gargalos nas máquinas com processamento paralelo.

No nível de Elementos de Processamento descreve-se individualmente o funcionamento e estrutura de cada nodo da rede de interconexão responsável pelo processamento efetivo. As primitivas de descrição deste nível são os caminhos percorridos pelo fluxo de dados (barramentos e chaves) e os operadores (ULA's). O funcionamento é descrito pela arquitetura do elemento de processamento, ou seja, a forma como são executadas as transformações. O poder de processamento dos elementos básicos da máquina é a interpretação semântica dos resultados obtidos neste nível.

Assim como o nível de elementos de processamento trata da análise da arquitetura, o nível de blocos fornece informações da organização lógica a nível RT ("Register Transfer Level"). As primitivas deste nível são registradores, barramentos, multiplexadores, decodificadores, etc. O funcionamento básico é implícito à semântica associada aos próprios elementos primitivos. Desta forma, o funcionamento básico é definido pela própria organização descrita. A interpretação semântica dos resultados obtidos neste nível é o "overhead" do tráfego de sinais internos ao próprio elemento de processamento.

O último nível, tecnologia, abrange todas as distinções tecnológicas nos níveis de projeto lógico, de transistores e até de máscaras de difusão em silício. Para propósitos de avaliação de desempenho toda gama de variações tecnológicas de implementação são traduzidas unicamente através da determinação das restrições físicas dos circuitos.

### 3. AMBIENTE DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MÁQUINAS PARALELAS

Uma avaliação de desempenho pode ter três razões, é um estudo para selecionar, melhorar a performance ou auxiliar no projeto de uma máquina [ 2 ]. Em qualquer um destes casos busca-se uma opinião qualitativa sobre a máquina. A impossibilidade de modelar adequadamente as restrições desejadas pelo usuário leva ao desenvolvimento de ferramentas de avaliação de desempenho com resultados quantitativos.

Desta forma, o usuário faz seu próprio julgamento qualitativo a partir de um elenco de respostas quantitativas fornecidas pelo sistema de avaliação. Cada um dos parâmetros quantitativos deste conjunto descreve um aspecto individual da máquina. Por exemplo, o índice de subutilização de recursos fornece informações sobre a carga ociosa dos componentes do sistema. Porém, nenhum dos resultados quantitativos fornecidos pode, individualmente, descrever todas as informações necessárias a estimativa completa de performance da máquina.

A proposta de descrições da máquina paralela em diversos níveis sugere a adoção de ferramentas distintas para cada um destes. Como o resultado da avaliação não é fornecido por um parâmetro quantitativo único, também os métodos de avaliação podem ser divididos em diversos níveis de influência e implementados em ferramentas de avaliação distintas (fig. 1).

As ferramentas de avaliação de desempenho utilizadas em cada nível podem valer-se de formalismos distintos, por exemplo: simulação, teoria de filas, etc. Estes diferentes formalismos permitem avaliações com maior ou menor grau de precisão e facilidade dependendo da aplicação específica. A integração dos resultados obti-

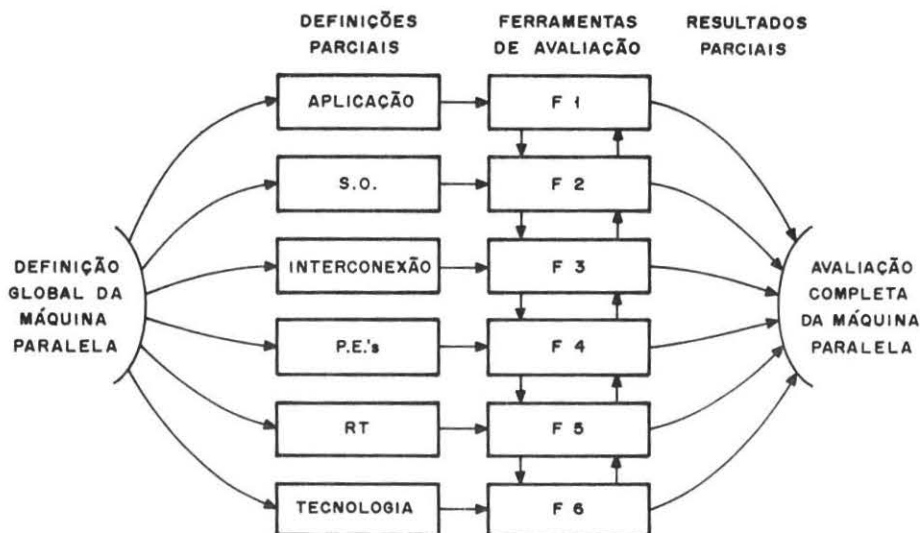


Fig.1 - Ambiente de avaliação de desempenho multi-nível

dos é feita de acordo com a interpretação semântica.

### 3.1. SARA: Ferramenta para Interconexão de Processadores

SARA é uma ferramenta para análise de desempenho de redes e arquiteturas segundo um formalismo baseado na teoria geral de redes (redes de Petri [ 8 ] [ 9 ] [ 10 ]). Os parâmetros de interesse relevantes ao desempenho de interconexões de processadores são obtidos de modelos comportamentais desenvolvidos em redes de Petri. Maiores informações sobre SARA podem ser encontradas em [ 6 ] e [ 7 ].

SARA aceita interconexões definidas segundo uma taxonomia topológica baseada no trabalho de Anderson e Jensen [ 1 ]. Este trabalho classifica interconexões de processadores quer sejam computadores afastados geograficamente (redes), quer sejam processadores agindo internamente em uma máquina (arquiteturas).

Na taxonomia adotada optou-se pela topologia da interconexão como critério básico de classificação. Esta escolha visa tornar o processo de definição natural ao usuário. A seguir são descritas as interconexões previstas por SARA (fig. 2) até a presente etapa do projeto. Maiores informações sobre a taxonomia adotada podem ser encontradas em [ 3 ].

**ANEL** - A característica básica deste grupo é uma arquitetura circular onde cada processador está conectado a dois outros processadores vizinhos. Pelo anel circulam tokens responsáveis pela troca de mensagens. Este grupo subdivide-se em duas classes: anel standard e anel com arbitrador.

**COMPLETA** - Todos os processadores possuem um caminho dedicado que os interconecta a todos os demais processadores da interconexão. A comunicação entre dois processadores se dá através do caminho direto entre eles. Este grupo não possui subdivisão em classes.

**MULTIPROCESSADOR** - Todos os processadores são conectados a um ou mais módulos de memória global por onde mensagens são trocadas. Este grupo subdivide-se em cinco classes segundo a forma de conexão entre processadores e módulos de memória: memórias multiporta (ligação direta), barramento único, múltiplos barramentos, crossbar e multi-estágio.

**BARRAMENTO** - A comunicação ocorre através de um barramento global ao qual todos os processadores estão conectados. Este grupo subdivide-se em duas classes: barramento standard e barramento com arbitrador central.

**ESTRELA** - Todos os processadores estão conectados por barramentos dedicados a um arbitrador central pelo qual mensagens são trocadas. Este grupo não se subdivide em classes, pois não existem variações topológicas, mas de acordo com o funcionamento do arbitrador central temos duas categorias: arbitrador standard e arbitrador com buffer.

**REGULAR** - Os processadores são conectados entre si por caminhos dedicados que possuem algum padrão de ligação. A comunicação se dá através da difusão de mensagens na rede desde o processador fonte até o processador destino. Este grupo subdivide-se em tantas classes quanto forem os possíveis padrões de ligação, por exemplo: mesh, cubo, árvore, hipercubo, etc.

**IRREGULAR** - A semelhança do grupo regular os processadores são conectados por uma malha de ligações, porém esta malha não possui nenhum padrão que a caracterize.

SARA define um ambiente interativo no qual o usuário estabelece a topologia da interconexão (grupo, classe e categoria) e sua configuração específica. Esta última é definida através de aspectos estruturais (número de processadores, etc), aspectos físicos (velocidade de linhas, etc) e aspectos comportamentais (utilização prevista, ou seja, processamento local X global, etc). Como resposta o sistema fornece



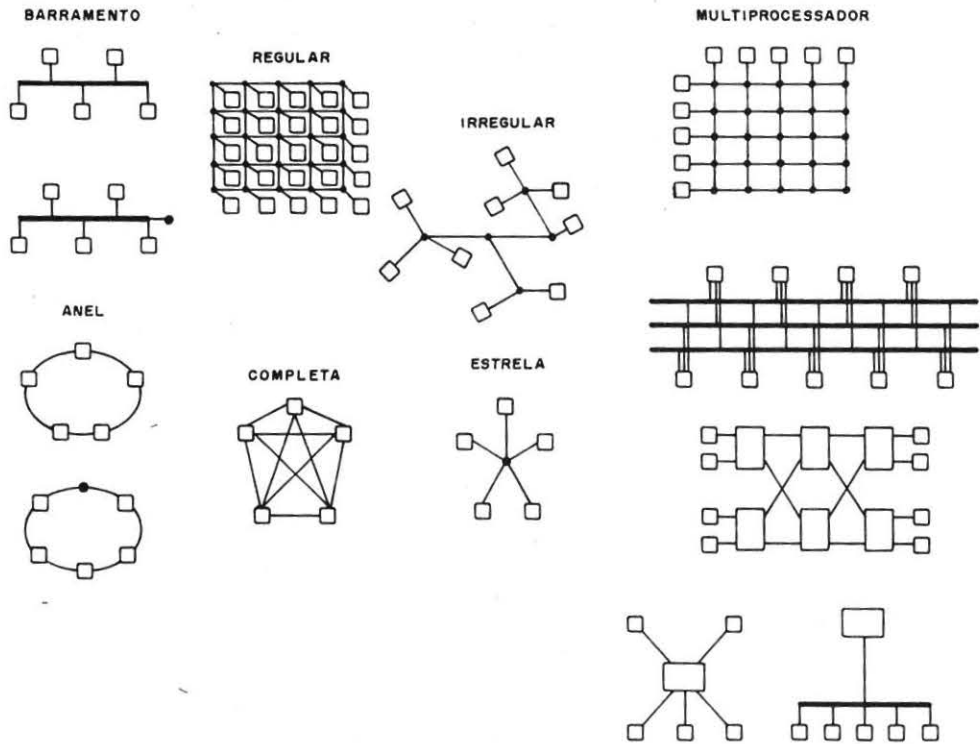


Figura 2 - Taxonomia adora por SARA

parâmetros quantitativos relevantes ao desempenho da interconexão (throughput, índices de sub-utilização, etc).

A topologia da interconexão define um funcionamento implícito, já previamente descrito através de uma rede de Petri temporizada imcompleta. Para completar as informações necessárias à análise, a configuração específica define a marcação inicial e anotações de tempo que serão associadas à rede pre-definida. Desta forma, a avaliação executada por SARA é feita não sobre a interconexão propriamente, mas sim, sobre o seu modelo em redes de Petri. Sobre uma

rede de Petri construída desta forma, pode ser extraído o throughput da interconexão, este parâmetro fornece o número de mensagens transmitidas por unidade de tempo. Podem ainda ser extraídos os índices de sub-utilização de cada componente (processadores, módulos de memória, arbitradores, etc). Finalmente, os gargalos do sistema podem ser localizados e ter seus tempos induzidos de espera e suas populações médias avaliadas. O formalismo utilizado para a extração de tais parâmetros de modelos em redes de Petri pode ser encontrado em [ 12 ] e [ 13 ].

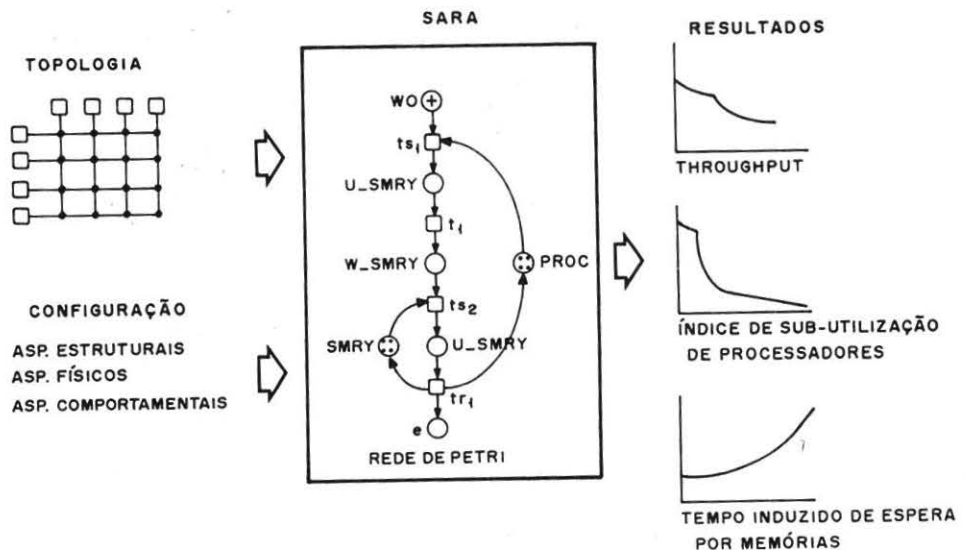


Figura 3 - Funcionamento genérico de SARA

Um exemplo genérico de funcionamento de SARA está descrito através da figura 3, onde encontramos como entrada uma determinada interconexão e como saída uma análise de seus parâmetros relevantes ao desempenho. A entrada é feita através da definição da topologia (classificada segundo a taxonomia adotada) e pela descrição específica (aspectos estruturais, físicos e comportamentais). Internamente é gerado o modelo em redes de Petri e os resultados relevantes são calculados e exibidos sob a forma numérica e/ou gráfica.

### 3.2. Integração de Ferramentas

Todas as ferramentas de avaliação operam sobre uma mesma realidade, a máquina paralela, descrita em níveis distintos. Este fato sugere a troca de informações entre ferramentas de níveis vizinhos. Esta troca de informações poupa o usuário de redefinir certos aspectos em mais de um nível. Além disto, resultados de ferramentas de um determinado nível podem alimentar as ferramentas vizinhas. Com esta prática temos um ambiente de avaliação onde não só a descrição, mas também a análise, é integrada.

SARA, por exemplo, integra-se ao ambiente proposto para avaliação de desempenho através da descrição dos aspectos comportamentais. Os de mais níveis alimentariam o modelo de análise com as informações dos tempos requisitados para processamento. Estes tempos seriam basicamente função da carga necessária (carga útil somada ao overhead de gerenciamento) e do poder de processamento (função do overhead intra blocos e das restrições físicas).

### 4. CONCLUSÃO

O ambiente proposto pretende viabilizar um estudo profundo de máquinas paralelas através da análise de desempenho destas a partir de modelos descritos em um ambiente integrado multinível. No entanto, é possível obter estimativas de performance com alto grau de confiabilidade mesmo antes de possuir uma implementação completa e integrada deste ambiente de avaliação. Ferramentas desenvolvidas individualmente fornecem resultados quantitativos que a qualquer um dos níveis tem uma semântica própria para o usuário, e, portanto, relevantes ao desempenho da máquina paralela modelada.

Através da interpretação semântica dos resultados é possível ainda obter estimativas parcialmente integradas, ou seja, estimativas geradas por duas ou mais ferramentas de avaliação integradas manualmente pelo mapeamento de suas entradas e saídas, respectivamente, o modelo e os resultados. Por exemplo, supondo uma avaliação onde os resultados da ferramenta F1 são manualmente mapeados para o modelo da ferramenta F2. Os resultados de F2 irão traduzir não só a análise feita por esta ferramenta, mas também, a pré-análise feita por F1.

No Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Rio Grande do

Sul (CPGCC-UFRGS) vem sendo desenvolvidas pesquisas sobre o ambiente proposto desde 1985. Atualmente, já existe uma implementação estável de SARA a nível de interconexões e duas ou três ferramentas estão em desenvolvimento: a) SSIP: é um simulador de interconexões de processadores do grupo multiprocessador, trata-se de uma ferramenta análoga a SARA quanto a seus propósitos, diferindo basicamente em relação ao método de avaliação utilizado; b) PIPE é um analisador de arquiteturas pipeline, portanto um analisador de desempenho a nível de elementos de processamento.

### REFERÊNCIAS

- [1] ANDERSON, G.A. & JENSEN, E.D., Computer interconnection structures: taxonomy, characteristics, and examples. Computing Surveys, New York, 7(4):197-213, Dec 1985.
- [2] FERRARI, D., Computer systems performance evaluation. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1978.
- [3] FERNANDES, P.H.L., Modelagem de interconexão de processadores. Departamento de Informática - UFRGS, 1987.
- [4] GAJSKI, D.D. & KUHN, R.H., New VLSI tools. Computer, New York, 16 (12): 11-17, Dec. 1983.
- [5] HARTENSTEIN, R.W., Fundamentals of structured hardware design. North-Holland, Amsterdam, 1977.
- [6] NAVAUX, Ph., TAZZA, M., FERNANDES, P. SARA: Interface com o usuário e escopo de aplicação. In: CONGRESSO NACIONAL DE INFORMÁTICA, 20, São Paulo, Ago. 31-Set. 6 1987. Anais. São Paulo, SUCE SU 1987.
- [7] NAVAUX, Ph., FERNANDES, P., TAZZA, M., SARA: A processor Interconnection performance analysis tool. In: EUROMICRO 88, Zurich, Aug. 29-set. 1 1988.
- [8] PETRI, C.A., General net theory. In: PROCEEDINGS OF THE JOINT IBM UNIVERSITY OF NEWCASTLE UPON TYNE. SEMINAR, Newcastle upon Tyne, Sep. 7-10, 1976. Proceedings. University of Newcastle upon Tyne, 1977. pp. 131-69.
- [9] PETERSON, J.L., Petri net theory and the modelling of systems. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1981.
- [10] REISIG, W., Petri nets: an introduction. Berlin, Springer-Verlag, 1985.

- [11] SIEWIOREK, D.P., BEL, C.G., NEWELL, A.,  
Computer structures: principles and exam-  
ples. McGraw-Hill, London, 1982.
- [12] TAZZA, M., Ein netztheoretisches modell  
zur quantitativen analyse von systemen  
(Q-modell). R. Oldenbourg Verlag, Mün-  
chen, 1985. (Bericht nr. 149)
- [13] TAZZA, M., Análise quantitativa de sis-  
temas. III EBAl, Curitiba, 1988.
- [14] TRELEAVEN, P.C., BROWNBIDGE, D.R.,  
HPOKINS, R.P., Data-driven and demand-  
driven computer architectures. Computing  
Surveys, New York, 14(1): 93-143, Mar.  
1982.