

ECC: Estrutura de Correlação de Características Arquiteturais e de Carga de Trabalho

Jussara Ferreira Marândola, Carlos Augusto Paiva da Silva Martins
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
{marandolaj@terra.com.br}, {capasm@pucminas.br}

Resumo

Neste artigo apresentamos uma Estrutura de Correlação de Características (ECC) que correlaciona as características arquiteturais dos computadores e as características das cargas de trabalho (aplicações). Desenvolvemos a ECC inicialmente para resolver um problema específico: escolher um computador de alto desempenho (HPC) para executar uma determinada carga de trabalho, modelada como um sistema de equações lineares. Deste modo, aplicamos a ECC em um estudo de caso, no contexto do SINAPAD e verificamos e validamos os resultados obtidos com os resultados do Linpack Benchmark. Analisando o contexto da computação, observamos vários problemas relacionados com arquitetura de computadores, computação paralela, computação de alto desempenho e análise de desempenho em diferentes áreas de aplicação que podem ser resolvidos utilizando a nossa ECC. A contribuição desta pesquisa não é somente a análise ou o estudo de caso, mas principalmente a proposta, desenvolvimento e verificação da Estrutura de Correlação de Características (ECC).

1. Introdução

Neste artigo apresentamos uma **Estrutura de Correlação de Características (ECC)** que correlaciona características arquiteturais (hardware e software) e características de carga de trabalho. Pesquisadores e usuários de aplicações computacionais podem utilizar esta estrutura para solucionar problemas relacionados com desempenho e eficiência computacional, utilizando suas próprias características específicas (sistemas computacionais e aplicações).

A **motivação** para a criação e o desenvolvimento de uma estrutura (modelo) que correlacionasse características arquiteturais e características da carga de trabalho iniciou-se a partir da análise de problemas de desempenho como o problema da escolha de um computador HPC (*High Performance Computing*). Durante o estudo do SINAPAD (Sistema Nacional de Processamento de Alto Desempenho) [1], gerou-se o interesse por analisar os computadores HPC do parque computacional do SINAPAD. A aplicação da ECC para este problema possui como um dos seus principais objetivos otimizar a execução de uma aplicação específica. Os resultados dessa pesquisa foram publicados em um artigo

[2] no CSITeA'03 (*International Conference on Computer Science, Software Engineering, Information Technology, e-Business, and Applications*) [3].

A Estrutura de Correlação de Características possibilita a **resolução de diversas classes de problemas**, como a escolha de um sistema computacional otimizado para a execução de uma dada aplicação, a escolha de uma implementação de aplicação tendo um modelo único (sistema computacional) ou simplesmente a escolha de características de carga de trabalho específicas considerando uma ou mais características arquiteturais.

Analisar o desempenho de um computador é uma tarefa complicada, pois normalmente envolve muitas características relacionadas com aplicações, tamanho do problema implementação, algoritmos, linguagem de programação, compilador, otimizações, sistema operacional, arquitetura de computador (hardware e software), etc.. Atualmente, muitos resultados de análise de desempenho são obtidos através do uso de *benchmarks*, contudo esses resultados nem sempre são representativos do desempenho real de um sistema computacional executando uma determinada carga de trabalho real. *Benchmarking* é uma técnica para avaliação de desempenho e de características arquiteturais [4].

Assim, ressaltamos a **importância** desse trabalho ao possibilitar uma otimização de desempenho e/ou de eficiência computacional, baseada na análise das características arquiteturais do computador e da carga de trabalho. O ganho de desempenho e/ou eficiência na execução das cargas de trabalho, é geralmente devido a uma boa correlação das características envolvidas.

Pensando nesta situação, criamos e desenvolvemos a Estrutura de Correlação de Características que nos possibilita resolver muitos problemas relacionados com computação paralela, análise de desempenho e computação de alto desempenho considerando somente a correlação das características das cargas de trabalho e dos sistemas computacionais. Neste caso, não existe uma obrigatoriedade de execução de carga de trabalho em um sistema computacional real, como é o caso do uso de *benchmarks*.

O **objetivo** deste artigo é apresentar uma estrutura (modelo), denominada estrutura de correlação de características (ECC), que possibilita a análise e a resolução

dos diferentes problemas citados anteriormente sem a necessidade de execução de cargas de trabalho em sistemas computacionais reais (parte experimental). Verificamos os resultados da aplicação da ECC no SINAPAD (estudo de caso) usando os resultados obtidos com o Linpack Benchmark disponíveis no site Top500 [5].

O restante do artigo está organizado na apresentação da Estrutura de Correlação de Características, no Estudo de Caso com os Resultados da aplicação da ECC, na Validação e Verificação dos Resultados, e finalmente, na Conclusão.

2. Estrutura de Correlação de Características

Observando a maioria dos sistemas computacionais, constatamos que eles são compostos por dois objetos ou componentes muito importantes: um que executa a computação (o computador) e o outro que representa a lógica da computação e o controle do computador (a aplicação).

A nossa **hipótese inicial** é que existe uma forte relação entre estes dois objetos, principalmente entre as características ou qualidades destes objetos, características arquiteturais e da carga de trabalho.

Consideramos **características arquiteturais** as características dos blocos construtivos do computador tanto hardware quanto software como processador, memória, rede de interconexão, largura de banda, latência, sistema operacional, compilador e linguagens de programação. Podemos analisar as características arquiteturais internas de cada bloco ou as características sistêmicas do computador formado por estes blocos.

As **características da carga de trabalho** são características de uma aplicação total ou características de parte ou partes da carga de trabalho executada em um computador. A carga de trabalho é tudo que é executado em um sistema computacional (computador).

A nossa **segunda hipótese** é que a correlação entre as duas classes de características, características arquiteturais (hardware e software) e características da carga de trabalho (aplicações), é fundamental para a otimização do desempenho e/ou da eficiência computacional nos contextos considerados.

Nossa estrutura possibilita e necessita de uma **análise do grau de correlação** e o **nível do grau de correlação**.

O grau de correlação é a métrica que expressa a gradação de correlação entre cada par de características, onde uma das características pertence a classe de características arquiteturais e a outra a classe de características da carga de trabalho.

O nível de correlação é a métrica que expressa a gradação de correlação entre os valores das características.

A Estrutura de Correlação de Características (ECC), baseia-se em características que são definidas e especificadas pelo usuário, sendo modelada como uma **matriz (linhas e colunas)**, de modo que as linhas representam as

características arquiteturais e as colunas representam as características da carga de trabalho.

| Estrutura de Correlação | | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| Características | Características da Carga de Trabalho | | | |
| Arquiteturais | CC1 | CC2 | ... | CCm |
| CA1 | | | | |
| V ₁ | | | | |
| V ₂ | | | | |
| CA2 | | | | |
| V ₃ | | | | |
| ... | | | | |
| V _k | | | | |
| ... | | | | |
| CA _n | | | | |
| V _{k-1} | | | | |

Figura 1- Modelo Geral da ECC

As características (da arquitetura e da carga de trabalho) podem ser **parâmetros fixos** ou **variáveis**, dependendo do problema onde aplicamos a ECC. Podemos considerar uma aplicação como parâmetro fixo e sistemas computacionais como parâmetros variáveis ou então um sistema computacional (computador) como parâmetro fixo e diferentes aplicações como parâmetros variáveis durante a utilização da ECC.

A definição dos métodos e/ou critérios para a escolha das características e para a determinação do grau e nível de correlação entre elas não é parte da ECC. Pois, nossa proposta de estrutura de correlação é conceitualmente independente dos métodos e critérios utilizados, em função das hipóteses utilizadas na proposta e desenvolvimento da estrutura.

A Estrutura de Correlação de Características é um **modelo de mapeamento** entre características arquiteturais e da carga de trabalho.

A partir desta estrutura podemos **formular vários problemas** que podem ser resolvidos com a sua utilização, como: Escolha de um computador HPC considerando uma dada aplicação; Escolha de uma implementação de aplicação HPC considerando um computador de alto desempenho; Dada uma aplicação, qual característica arquitetural dos computadores HPC é mais importante para o desempenho deste software?; Dada uma característica arquitetural específica, qual característica de carga de trabalho seria ideal para executar nesta arquitetura?

O desempenho das plataformas computacionais é baseado nas características de carga de trabalho que são executadas nas mesmas. Alguns trabalhos analisam a relação entre os sistemas de memória e a carga de trabalho [6].

Encontramos diversas definições e caracterizações de diferentes aplicações e de componentes da arquitetura de um computador citados em muitos trabalhos correlatos que apresentamos logo a seguir.

A caracterização de aplicações permite ajustar e otimizar a micro-arquitetura do processador, a hierarquia de memória e

a arquitetura do sistema para um conjunto particular de características de aplicações. A caracterização da carga de trabalho também é fundamental para a avaliação de desempenho [7].

Relacionamos alguns trabalhos correlatos na literatura como aplicações comerciais que são consideradas como as mais importantes no estudo de análise de desempenho e caracterização da carga de trabalho [8,9,10]. Os estudos fundamentados em caracterização da carga de trabalho são focados em aplicações OLTP (*Online Transaction Processing*), DSS (*Decision Support Systems*) e servidores web.

A caracterização de aplicações de servidores Java tem sido um tópico de pesquisa ativo durante anos. Muitos resultados de caracterização da carga de trabalho Java são baseados no estudo do SPECjvm98 [11,12].

Concluimos que existem diversas cargas de trabalho ou aplicações que podem ser analisadas. **A escolha das características da carga de trabalho (workload) depende completamente do domínio da aplicação do usuário e não é parte da definição da ECC.** Por exemplo, se usamos uma carga de trabalho para desenvolver um microprocessador de baixa potência, ele necessitará de características específicas do consumo da potência [13]. Podem ser citadas várias características arquiteturais para este caso como: paralelismo de nível de instruções, número de registradores de ponto flutuante, tempo do ciclo, quantidade de operações aritméticas, quantidade de operações lógicas e quantidade de operações de controle.

As principais possíveis **vantagens** do uso da ECC são: a possibilidade de analisar diferentes cargas de trabalho, utilizando características de quaisquer aplicações. A estrutura permite a caracterização de uma carga de trabalho e de um computador hipotéticos, sem necessitar de uma aplicação real, um computador e avaliação real de desempenho (métodos e medidas). O custo total é muito pequeno e os resultados obtidos com a aplicação da ECC podem ser comparados com os resultados de *benchmarks* que tenham características similares da aplicação em foco.

Não encontramos no estado da arte até o momento nenhum modelo ou estrutura similar para possíveis comparações.

Em nosso estudo de caso, esta Estrutura de Correlação será utilizada para resolver o problema de escolha de um computador HPC considerando uma dada aplicação específica.

3. Estudo de Caso: Escolha de um Computador de Alto Desempenho

O **problema inicial** do nosso estudo de caso é a escolha de um computador HPC dentre três computadores no contexto SINAPAD: Cray T94, SUN ENT10000, IBM SP2, para executar uma carga de trabalho com características

similares ao Linpack, envolvendo sistemas de equações lineares e matrizes complexas. Selecionamos alguns computadores de alto desempenho, representativos das classes escalar e vetorial. O objetivo é obter o melhor tempo de resposta.

No estudo de caso, apresentaremos a **aplicação da Estrutura de Correlação de Características (ECC)** passo a passo. Como havíamos dito, neste tipo de problema, as características da carga de trabalho são parâmetros fixos e as características arquiteturais são parâmetros variáveis, pois existe apenas uma única carga de trabalho e três computadores.

A **carga de trabalho** especificada em nosso estudo de caso é representativa de problemas da engenharia elétrica que são geralmente modelados com equações algébricas, envolvendo manipulação de matrizes complexas e uma grande quantidade de cálculos com matrizes. Os elementos dessa aplicação são totalmente independentes por serem executado em cada elemento do vetor, favorecendo uma execução concorrente / paralela.

A nossa carga de trabalho está relacionada com problemas de decomposição numérica de equações lineares, e possui as seguintes características: modelo de programação (paralelismo de dados), granularidade grossa e alto grau de paralelismo. Veja a tabela a seguir:

| Características da Carga de Trabalho | |
|--------------------------------------|----------------------|
| | Matriz Complexa |
| Granularidade | grossa |
| Grau de Paralelismo | alto |
| Modelo de Programação | paralelismo de dados |

Figura 2 - Características do "Workload"

Portanto, esta aplicação (carga de trabalho) é considerada independente, ou seja, há uma grande quantidade de processamento em relação à comunicação (grão grosso).

O alto grau de paralelismo em uma aplicação implica que o processamento é dividido em muitos pedaços, grãos, para serem executados simultaneamente em muitos processadores.

O modelo de programação "paralelismo de dados" é um estilo muito importante na computação, especialmente na computação numérica, onde as operações quase idênticas são executadas em cada elemento de um array. Segundo o "CM-5 *Technical Summary*", paralelismo de dados implica em operações sendo executadas em diferentes elementos de dados por diversos processadores simultaneamente [14].

Para montar a ECC, tivemos que especificar as seguintes características da carga de trabalho: **granularidade, grau de paralelismo e modelo de programação.**

Foram escolhidas estas características pelo fato delas influenciarem em inúmeros fatores que contribuem para o ganho de desempenho computacional.

Por exemplo, o **tamanho de cada sub tarefa** do processador é em muitos ambientes uma questão central em computação paralela. **Granularidade** é o tamanho médio da

subtarefa, medida em instruções executadas. Grau de paralelismo é o número de subtarefas disponíveis para execução em paralelo. Modelo de programação é como a computação é desempenhada [15].

As **características arquiteturais** selecionadas são características sistêmicas do hardware como: número de elementos de processamento, espaço de endereçamento e rede de interconexão.

Inúmeros **parâmetros** podem ser analisados para se obter um **desempenho computacional**, como por exemplo, aqueles mostrados na tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Características Arquiteturais dos Computadores HPC

| Características Arquiteturais | CRAY T94 | ENT10000 | SP2 |
|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| N Nós | 1 | 1 | 41 |
| N EP's | 4 | 32 | 48 |
| EP/Nó | 4/1 | 32/1 | 2/4;4/8/16 |
| Espaço Endereçamento | MC | MC | MP |
| Modelo | SIMD | MIMD (UMA) | MIMD (NORMA) |
| Arquitetura | PVP (Parallel Virtual Processor) | SMP | MPP |
| Topologia de Interconexão | Barramento de Dados | Chave Crossbar | Circuito de Rede |
| Sistema Operacional | UNICOS 1.0 | SOLARIS 2.5.1 | AIX 4.1.5 |
| Linguagens de Programação | C/C++, Fortran90, Pascal Vector | C/C++, Fortran90, PVM, Java | HPF, C/C++, PVMc, MPI |

No CENAPAD-MG/CO, os dois computadores HPC da classe MIMD são classificados como: o multicomputador IBM SP2 é considerado como fracamente acoplado, arquitetura NORMA (*No Remote Memory Access*) e memória privada (passagem de mensagens) e o multiprocessador SUN ENT10000 como fortemente acoplado, arquitetura UMA (*Uniform Memory Access*) e memória compartilhada [16].

No CESUP-RS (Centro Nacional de Supercomputação do Rio Grande do Sul), temos uma máquina SIMD (multiprocessador vetorial) com arquitetura PVP (Parallel Virtual Processor) e memória compartilhada.

O **computador Cray T94** é conhecido como um multiprocessador vetorial de memória compartilhada. Este tipo de processador não possui o mecanismo de memória cache para acelerar o tempo de acesso, pois a memória principal é extremamente rápida. Cada CPU contém dois "pipes" vetoriais para adição e multiplicação, tendo um desempenho de duas operações de ponto flutuante por ciclo

de clock, o que corresponde ao desempenho de pico individual de 1.8 Gflops. Então, esta máquina é mais indicada para problemas específicos de operações aritméticas de ponto flutuante com "arrays".

O **multiprocessador SUN Enterprise 10000** é mais indicado para aplicações que apresentam uma grande quantidade de informações compartilhadas entre os processos ou tarefas paralelas, códigos com grande número de instruções, e dependência de comunicação entre os programas. Estas características são excelentes para programas baseados em modelos de programação de variáveis compartilhadas.

O **multicomputador IBM SP2** é mais indicado para aplicações que apresentam maior escalabilidade, alta demanda de vazão, tarefas e processos independente, baixo custo de implementação, possibilitando o uso de computadores independentes ou autônomos, e computadores paralelos (aglomerado de computadores).

A seguir apresentamos a aplicação da Estrutura de Correlação de Características no contexto do estudo de caso.

3.1. Aplicação da Estrutura de Correlação de Características (ECC)

Na proposta da ECC não há nenhum método ou critério de escolha de características ou para determinação do grau de correlação e nível de correlação entre as características.

Contudo, para aplicar a nossa ECC, necessitamos definir nossos próprios critérios e padrões estabelecidos para analisar o problema no estudo de caso.

Quanto ao **grau de correlação**, classificamos como: baixo/médio/forte. O grau de correlação é a mensuração da importância da correlação das características. Na tabela, analisamos e classificamos apenas quando o grau de correlação foi denominado alto e médio. Assim, desprezamos o grau de correlação baixo, por ser um indicador fraco de importância de correlação.

Quanto ao **nível de correlação**, o critério utilizado pode ser considerado como um peso que graduamos a importância de uma característica de carga com outra de arquitetura. O nível de correlação é classificado em: regular/bom/muito bom. O fato do grau de correlação ser alto não significa que o nível de correlação terá que ser muito bom, pois o nível depende da característica da aplicação (objeto) e da arquitetura.

Para montar e aplicar a Estrutura de Correlação de Características, tivemos previamente que analisar todas as características arquiteturais dos três computadores HPC do SINAPAD e as características da nossa carga de trabalho. Neste tópico, aplicaremos a ECC para cada computador HPC considerado e analisado.

Para aplicarmos a ECC no nosso estudo de caso, consideramos que as características arquiteturais são **parâmetros variáveis**, pois existem três sistemas computacionais de alto desempenho: SUN ENT10000, IBM

SP2, Cray T94; e que as características da carga de trabalho são **parâmetros fixos**, pois especificamos apenas uma única carga de trabalho envolvendo sistemas de equações lineares.

Entre as **características da carga de trabalho** destacamos grãos independentes, com muito processamento em relação à comunicação e um grande número de operações de ponto flutuante.

As **características arquiteturais** selecionadas para a aplicação da ECC foram: número de EP's, tipo de espaço de endereçamento e rede de interconexão (largura de banda e latência da comunicação) e desempenho de pico.

Em uma rede de interconexão, a largura de banda e a latência de comunicação influenciam consideravelmente na velocidade computacional. Existem dois componentes na velocidade da comunicação: computador (hardware e software) e algoritmo. No computador a velocidade é medida pela velocidade computacional dos nós em MFLOPS e pela velocidade da comunicação das conexões. No algoritmo, é medido o tamanho do grão que expressa a quantidade de execução (computação) [15].

Na **estrutura de cada ECC** montada realizamos uma análise do grau de correlação entre as diferentes classes de características (arquiteturais e carga de trabalho) e avaliamos o nível do grau de correlação.

A **análise do grau de correlação** mostra um alto grau entre grau de paralelismo – número de EP's, modelo de programação – espaço de endereçamento, rede de interconexão – grau de paralelismo, granularidade, modelo de programação.

O **nível de correlação (gradação)** é apresentado individualmente em cada ECC para o respectivo computador HPC. O fato do tamanho do grão ser grosso, significa que a comunicação não terá muita importância. Por este motivo, não analisamos a latência e a largura de banda.

Vejamos a seguir, as três Estruturas de Correlação de Características das máquinas pertencentes ao SINAPAD e suas análises:

Tabela 2 - ECC da Cray T94

| ESTRUTURA DE CORRELAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS – ECC | | | |
|--|--------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| CARACTERÍSTICA ARQUITETURAIS | CARACTERÍSTICAS DA CARGA DE TRABALHO | | |
| Correlação de Características | Modelo de Programação | Granularidade | Grado de Paralelismo |
| <i>Cray T94</i> | Paralelismo de Dados | Grão Grosso | Paralelismo Alto |
| <i>N_EP's</i> | Baixo | Baixo | Alto |
| <i>1-09</i> | | | X (Regular) |
| <i>10 – 32</i> | | | |
| <i>33-50</i> | | | |
| <i>Espaço de Endereçamento</i> | Alto | Médio | Baixo |

| | | | |
|-------------------------------------|----------------|----------------|--------------------|
| <i>Memória Compartilhada</i> | X (Bom) | X (Bom) | |
| <i>Memória Distribuída</i> | | | |
| <i>Rede de Interconexão</i> | Médio | Alto | Alto |
| <i>Latência</i> | Baixo | Baixo | Baixo |
| <i>Largura de Banda</i> | Baixo | Baixo | Baixo |
| Desempenho pico = 7.2 Gflops | | | X (Regular) |

A máquina Cray T94, por possuir um número pequeno de elementos de processamento (02 processadores vetoriais), tem um nível regular de correlação entre o alto paralelismo e o número de EP's. O grão grosso e o paralelismo de dados possuem um nível bom de correlação com a memória compartilhada.

O tempo de acesso aos dados na memória compartilhada das máquinas da CRAY é extremamente rápido e o modelo de programação paralelismo de dados para cálculo de matrizes complexas é mais eficiente em processadores vetoriais, com memória compartilhada.

E um diferencial da máquina da CRAY é que a capacidade individual de cada EP corresponde a 1.8 Gflops, desempenho superior aos EP's das outras duas máquinas.

O grau de paralelismo + o número de EP's possibilita em um número maior de EP's para gerar um desempenho de pico melhor e como o desempenho de pico na CRAY é o menor (7.2 Gflops), o nível de correlação entre o grau de paralelismo e o desempenho de pico é regular.

A SUN Enterprise 10000 possui um bom nível de correlação entre o alto grau de paralelismo e o número de EP's. O grão grosso possui um grau de correlação médio com o espaço de endereçamento e um nível bom de correlação com a memória compartilhada.

Tabela 3 - ECC da SUN ENT 10000

| ESTRUTURA DE CORRELAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS – ECC | | | |
|--|--------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| CARACTERÍSTICA ARQUITETURAL | CARACTERÍSTICAS DA CARGA DE TRABALHO | | |
| Características de Correlação | Modelo de Programação | Granularidade | Grado de Paralelismo |
| <i>SUN ENT 10000</i> | Paralelismo de Dados | Grão Grosso | Paralelismo Alto |
| <i>N_EP's</i> | Baixo | Baixo | Alto |
| <i>1-09</i> | | | |
| <i>10 – 32</i> | | | X (Bom) |
| <i>33-50</i> | | | |
| <i>Espaço de Endereçamento</i> | Alto | Médio | Baixo |
| <i>Memória Compartilhada</i> | X (*Bom) | X (Bom) | |

| | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|----------------|
| <i>Memória Distribuída</i> | | | |
| <i>Rede de Interconexão</i> | Médio | Alto | Alto |
| <i>Latência</i> | Baixo | Baixo | Baixo |
| <i>Largura de Banda</i> | Baixo | Alto | Baixo |
| Desempenho de Pico = 16 GFlops | | | X (Bom) |

Referenciamos o nível “*bom” para o paralelismo de dados e a memória compartilhada, porque o fato dela oferecer um espaço de endereçamento único não significa aumento de desempenho computacional, mas também não quer dizer que a máquina seja regular. Por exemplo, se todos os processadores executam dados simultaneamente na memória principal pode garantir uma vantagem.

Quando validamos a ECC através dos resultados do LINPACK, verificamos que a SUN possui um desempenho individual de cada EP maior que a IBM SP2, 20% de diferença, em 0.5 Gflops. Contudo, o desempenho de pico (16Gflops) e a carga (workload) medido no LINPACK ainda são menores que a IBM SP2.

A IBM SP2 possui o maior número de elementos de processamento e conseqüentemente uma correlação muito boa do alto paralelismo com alto número de EP's. O grão grosso tem um grau de correlação médio com o espaço de endereçamento.

Nesta máquina, o modelo de variável distribuída (passagem de mensagem) possui uma forte correlação com o espaço de endereçamento (memória distribuída), mas pode ser constatado o uso de modelo de programação de passagem de mensagens em memória compartilhada como é o caso do DSM (*Distributed Shared Memory*).

O modelo de programação paralelismos de dados implica em execução de operações em diferentes elementos de dados. Portanto, estes dados são independentes e não possuem comunicação ou dependência entre os dados. Características que correspondem com as características arquiteturais da IBM SP2.

Tabela 4 - ECC da IBM SP2

| ESTRUTURA DE CORREÇÃO | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| CARACTERÍSTICAS ARQUITETURAIS | CARACTERÍSTICAS DA CARGA DE TRABALHO | | |
| <i>Correlação de Características</i> | Modelo de Programação | Granularidade | Grado de Paralelismo |
| <i>IBM SP2</i> | Paralelismo de Dados | Grão Grosso | Paralelismo Alto |
| <i>N EP's</i> | Baixo | Baixo | Alto |
| <i>1-09</i> | | | |
| <i>10 - 32</i> | | | |
| <i>33-50</i> | | | X (Muito Bom) |
| <i>Espaço de</i> | Alto | Médio | Baixo |

| | | | |
|--|----------------|----------------|----------------------|
| <i>Endereçamento</i> | | | |
| <i>Memória Compartilhada</i> | | | |
| <i>Memória Distribuída</i> | X (Bom) | X (Bom) | |
| <i>Rede de Interconexão</i> | Médio | Alto | Alto |
| <i>Latência</i> | Baixo | Baixo | Baixo |
| <i>Bandwidth</i> | Baixo | Alto | Baixo |
| Pico de Desempenho = 19.22 Gflops | | | X (Muito Bom) |

4. Validação e verificação dos Resultados

Analisando os resultados das três Estruturas de Correlação de Características (ECC), comparando e ponderando as indicações de grau e nível de correlação, chegamos à seguinte **indicação de computadores HPC** mais adequados para execução da nossa carga de trabalho:

1)IBM SP2; 2)SUN ENT10000; 3)CRAY T94

Estes foram os resultados da nossa aplicação da ECC.

A **IBM SP2 é a máquina mais indicada** porque suas características arquiteturais possuem uma forte (maior) correlação com as características da aplicação (carga de trabalho). Muito processamento significa a necessidade de maior poder computacional. Então, uma grande quantidade de EP's e o desempenho desses EP's são características relevantes quando a aplicação não possui tanta comunicação, desprezando parcialmente a latência e largura de banda da rede de interconexão.

A **SUN Enterprise 10000** foi a **segunda máquina indicada** porque ainda possui um número de EP's bem superior à máquina Cray T94, existindo também um maior poder computacional. Quanto ao desempenho computacional da ENT10000, não se difere muito da IBM SP2. Caso houvesse muita comunicação (grão fino ou médio) na carga de trabalho, esta máquina seria ou poderia ser a indicada por possuir memória compartilhada e uma largura de banda de comunicação maior.

A **Cray T94 é a terceira máquina indicada**, porque suas características arquiteturais são mais adequadas para cargas de trabalho que possuem grão fino e um ambiente de operações de baixo nível. Caso as características da carga de trabalho fossem essas, a latência de comunicação alta e um melhor desempenho computacional individual de cada processador fariam da Cray T94 o computador escolhido no estudo de caso.

Para a validação da nossa Estrutura de Correlação de Características (ECC) e verificação dos resultados obtidos, utilizamos os resultados do **Linpack Benchmark** disponíveis na **lista do site Top500**.

Portanto, não necessitamos de nenhum teste experimental nas máquinas do SINAPAD, já que o relatório Linpack

benchmark é considerado um dos melhores benchmark para medir o desempenho dos computadores de alto desempenho, inclusive aglomerados de computadores. Duas das máquinas, localizadas no CENAPAD – MG/CO, foram listadas como uma das 500 máquinas de maior desempenho do mundo no ano de 1997, como mostramos a seguir:

Tabela 5: Lista de Junho de 1997[5]

| Rank | Manufacturer Computer/Procs | R _{max} R _{peak} | Installation Site Country/Year |
|------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 261 | Sun HPC 10000/ 32 | 11.34 16.00 | CENAPAD-MG/CO Brazil/1997 |

Tabela 6: Lista de Dezembro de 1997 [5]

| Rank | Manufacturer Computer/Procs | R _{max} R _{peak} | Installation Site Country/Year |
|------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 282 | IBM SP P2SC 120 MHz/ 40 | 14.16 19.20 | CENAPAD- MG/CO Brazil/1997 |

A justificativa para a utilização do Linpack Benchmark é que ele representa um “workload”, semelhante à nossa carga de trabalho. As características são tão similares que podemos comprovar/verificar os resultados da aplicação da nossa Estrutura de Correlação de Características e validar a aplicação da ECC através dos valores do Linpack Benchmark.

Como o Linpack Benchmark é a base da validação da nossa ECC, nos preocupamos em estudar e analisar com profundidade as características do LINPACK. Pesquisamos na literatura e não encontramos nenhum artigo que caracterizasse a carga de trabalho do LINPACK. Assim, baseamos nossa fundamentação das características do Linpack nos dados do site do top500 e artigos indicados por Dongarra [17].

O Linpack 100 Benchmark original foi criado em 1979 com objetivo de apresentar como medir e descrever a interpretação dos resultados do tempo de execução requerido para resolver um sistema de equações lineares. Os resultados foram providos de uma matriz de ordem 100, relacionando inicialmente 23 computadores [18, 19, 20].

A seguir, apresentamos os valores do pico teórico de desempenho (R_{peak}), e o desempenho máximo obtido pelo Linpack (R_{Max}).

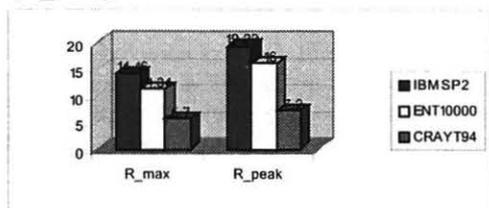


Figura 3: resultados de Rmax x Rpeak %

Analisando os resultados obtidos com a aplicação do Linpack, figura 3, considerando o R_{max}, podemos indicar a lista em ordem decrescente dos computadores HPC mais

indicados para executar a carga de trabalho do nosso estudo de caso.

Computadores HPC mais indicados (R_{max} Linpack):

1)IBM SP2; 2)SUN ENT10000; 3)CRAY T94

Portanto, como a seqüência de computadores mais indicados (resultados) obtidos com a aplicação da ECC e do Linpack são exatamente iguais, podemos considerar os resultados obtidos com a Estrutura de Correlação de Características verificados.

5. Conclusão

Analisando os resultados mostrados concluímos que todos os objetivos propostos foram atingidos com êxito. Apresentamos a Estrutura de Correlação de Características (ECC) e os possíveis problemas relacionados com análise de desempenho que podem ser resolvidos com sua utilização, e verificamos os resultados da aplicação da ECC através do Linpack Benchmark.

O desempenho computacional medido em MFLOPS/GFLOPS/TERAFLOPS não indica sempre o melhor desempenho e/ou eficiência computacional para uma carga de trabalho específica.

Analisar as características da carga de trabalho e características arquiteturais de um computador é muito importante para identificar a adequação da arquitetura ao tipo de carga de trabalho que se deseja executar.

Através da nossa Estrutura de Correlação de Características resolvemos o problema da escolha de um computador HPC considerando uma dada aplicação em nosso estudo de caso. E obtivemos a seguinte indicação: IBM SP2, SUN ENT10000, CrayT94.

Se basearmos a escolha, apenas no desempenho de pico do computador e no número de EP's, teríamos a mesma ordem de escolha. Caso as características da carga de trabalho fossem diferentes dessa especificada, poderíamos fazer uma escolha errada.

Poderíamos ter uma carga de trabalho onde houvesse alto grau de paralelismo, como aplicações transacionais (servidor web, comércio eletrônico) com demanda de ganho de vazão computacional e não tempo de resposta. Para executar estes tipos de carga de trabalho, o ideal poderia ser um aglomerado de computadores com um grande número de máquinas de desempenho médio e um alto desempenho global.

Poderíamos também ter uma carga de trabalho, com baixo grau de paralelismo, quatro grãos não independentes, tendo muita comunicação entre os processos e pouco processamento (grãos finos). Então, para estas características de carga de trabalho indicariamos a máquina Cray T94 por possuir um número aceitável de EP's de alto desempenho individual, um rápido tempo de acesso e uma boa largura de banda de comunicação.

Os resultados obtidos com a aplicação da ECC foram exatamente iguais aos resultados do Linpack Benchmark e,

portanto validamos nossa estrutura, já que a carga de trabalho especificada é similar ao Linpack.

Podemos observar algumas vantagens e desvantagens na utilização da ECC. As vantagens são: uma boa correlação entre a característica arquitetural e da carga de trabalho gera melhor eficiência computacional, a ECC não possui parte experimental, possibilidade de validação e verificação através de diversos tipos de benchmarks comerciais específicos para diferentes classes de aplicações. As desvantagens são: a estrutura pode se tornar complexa com número grande de características, critérios e métodos para análise, e no momento não existem estruturas semelhantes no estado da arte.

Uma das maiores **contribuições** do artigo foi a criação da ECC para resolução de problemas relacionados com computação paralela e análise de desempenho. Outras contribuições foram caracterizadas em consequência da criação como: a análise de características arquiteturais dos computadores do sistema SINAPAD, análise da aplicação da ECC em um estudo de caso e especificação (modelagem) da carga do trabalho do Linpack.

Nossa conclusão geral é que a Estrutura de Correlação de Características pode auxiliar na solução de diversos problemas como os indicados no item 2.

Entre os possíveis trabalhos futuros podemos citar: a criação de um modelo quantitativo, definição de métodos e critérios para a indicação do grau/nível de correlação de características e a implementação de um software (*Framework*) para o mapeamento de características determinadas pelo usuário.

6. Referências

- [1] SINAPAD Site. Disponível em: <http://www.cenapad.unicamp.br/home/sinapad/>
- [2] J.F., Marandola, C.A.P.S, Martins, "Application of Correlation Structure for the Choice of HPC Computer". In CSITeA 2003 – International Conference on Computer Science, Software Engineering, Information Technology, E-Business and Applications, 5-7 June, 2003. Rio de Janeiro, Brazil.
- [3] CSITeA'03 Home page. Disponível em: http://www.isca-hq.org/1-CSITeA'03_w.htm
- [4] Kai Hwang, Zhiwei Xu, "Scalable Parallel Computing. Technology, Architecture, Programming", McGraw Hill, ISBN 0-07-031798-4, 1998.
- [5] Top500 Site. Disponível em: <http://www.top500.org>
- [6] S. Petiti, J. Sahuquillo, A. Pont. "Characterizing Parallel Workloads to Reduce Multiple Writer Overhead in Shared Virtual Memory Systems", Proceeding of the 10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing (EUROMICRO – PDP'02), 1066-6192/02, IEEE Computer Society.
- [7] Lizy Kurian John, Purnima Vasudevan and Jyotsna Sabarinathan, "Workload Characterization: Motivation, Goals and Methodology", The first Workshop on Workload Characterization, pp 3, Dallas, Texas, November 29, 1998.
- [8] A. Aliamaki, D.J.DeWitt, M.D. Hill and D. A. Wood. "DBMSs on a Modern Processor: Where Does Time Go?", Proceeding of the 25th VLDB Conference, Edinburgh, Scotland, 1999.
- [9] L.A. Barroso, K. Gharachorloo and E. Bugnion, "Memory System Characterization of Commercial Workloads", Proceedings of the 25th International Symposium on Computer Architecture, 1998.
- [10] Q. Cao, P. Trancoso, J.-L. Larriba-Pey, J. Torrelas, R. Knighten, Y. Won, "Detailed Characterization of a Quad Pentium Pro Server Running TPC-D", Proceedings of International Conference on Computer Design, 1999.
- [11] T. Li, L. K. John, N.Vijaykrishman, A. Sivasubramaniam, A. Murthy, and J. Sabarianathan, "Using Complete System Simulation to Characterize SPECjvm98 Benchmarks", Proceedings of International Conference on Supercomputing, 2000.
- [12] B. Rychlik and J. P. Shen, "Characterization of Value Locality in Java Programs", Workshop on Workload Characterization, ICCD, September 2000.
- [13] Lieven E., Hans V., Koen De Bosschere, "Designing Computer Architecture Research Workloads", IEEE Computer Society, vol.3, n2, pp65, Fev 2003.
- [14] "The Connection Machine CM-5 Technical Summary", 245 First Street, Cambridge, MA 02154-1264, October 1991.
- [15] Almasi & Gottlieb. "Highly Parallel Computing", Second Edition, The Benjamin/Cummings Publishing Company, pp.15, Inc, 1994.
- [16] Stallings, William, *Computer Organization and architecture*, 4th ed, Prentice Hall, Inc, 1996.
- [17] Jack Dongarra, Hans Meuer, Horst Simon, and Erich Strohmaier, "High Performance Computing Today", To appear in FOMMS 2000: Foundations of Molecular Modeling and Simulation Conference, pp02.
- [18] Dongarra, Jack J., Luszczek, Piotr, Petite, Antoine. "The LINPACK Benchmark: Past, Present and Future", Technical Report, University of Tennessee, December 2001.
- [19] L. S. Blackford, J. Demmel, J. Dongarra, I. Duff, S. Hammarling, G. Henry, M. Heroux, L. Kaufman, A. Lumsdaine, A. Petitet, R. Pozo, K. Remington, R. C. Whaley, "An Updated Set of Basic Linear Algebra Subprograms (BLAS)", Volume 28, Issue 2, June 2002, pp 135 - 151, ACM TOMS, ISSN 0098-3500.
- [20] Aad J. van der Steen and Jack J. Dongarra, "Overview of Recent Supercomputers", Handbook of Massive Data Sets, edited by J. Abello, P.M. Pardalos, and M.G.C. Resende, Aad van der Steen and Jack Dongarra, Kluwer Academic Publishers, pp 791-852, ISBN 1-4020-0489-3 May 2002.