

# 1. Introdução

O surgimento da computação paralela deu-se pela necessidade de aumentar a potência computacional, com o intuito de se atingir alto desempenho para aplicações específicas. Adicionalmente, o objetivo era solucionar grandes problemas com um tempo de processamento menor do que o realizado por computadores seqüenciais (arquitetura de von Neumann), tendo-se em uma única máquina vários processadores, cooperando e comunicando entre si. Como um aumento expressivo de desempenho nas arquiteturas de von Neumann sempre foi uma tarefa árdua devido às limitações tecnológicas, a computação paralela tem sido tratada como uma alternativa atrativa, particularmente quando os problemas a serem solucionados são essencialmente paralelos.

Várias mudanças ocorreram na área de computação nas últimas décadas, levando à alta conectividade dos recursos computacionais, o que permitiu a solução de vários problemas de modo mais eficiente, a um custo relativamente mais baixo.

A motivação para a conexão dos diferentes recursos dos sistemas computacionais não é única, variando desde o simples compartilhamento de discos e impressoras à união de uma grande quantidade de processadores viabilizando um aumento na potência computacional disponível, melhor tolerância a falhas e maior mobilidade dos usuários.

Com o avanço da computação paralela, foram propostas várias maneiras para se conectar os recursos computacionais, criando-se diferentes arquiteturas paralelas. Cada arquitetura apresenta determinadas características, visando melhor desempenho sob um dado enfoque. Para acompanhar o desenvolvimento das arquiteturas paralelas e agrupar os equipamentos com características comuns, foram propostas algumas taxonomias, dentre elas a de Flynn (Flynn, 1972; Flynn & Rudd, 1996) e a de Duncan (Duncan, 1990).

O alto custo dos equipamentos com arquiteturas paralelas e da implantação desses sistemas sempre representou um obstáculo à sua ampla disseminação. Por outro lado, o desempenho dos computadores pessoais e das estações de trabalho tem apresentado um aumento significativo ao longo das últimas décadas. Ao mesmo

tempo o custo relativamente baixo dessas máquinas, favoreceu a sua ampla utilização, levando à interconexão dessas máquinas, o que permitiu o estabelecimento de sistemas computacionais distribuídos, constituindo uma área amplamente difundida e pesquisada nas últimas três décadas (Tanenbaum, 1996; Coulouris et al, 1994).

Embora não haja um consenso quanto a quais características devam ser consideradas formalmente em sistemas computacionais distribuídos, transparência é um requisito comum em todas classificações propostas pelos diversos autores (Tanenbaum, 1996; Coulouris et al, 1994; Müllender, 1993).

Os sistemas computacionais distribuídos mostraram ao longo dos anos suas vantagens sobre os sistemas centralizados, conquistando em pouco tempo lugar de destaque no cenário computacional. Essa classe de sistemas tem sido cada vez mais aperfeiçoada a fim de prover melhor desempenho a um custo relativamente baixo.

Desde os anos 80, vários trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de explorar o potencial dos sistemas computacionais distribuídos aliado aos conceitos de computação paralela. Assim, a convergência das áreas de computação paralela e de sistemas distribuídos trouxe uma nova gama de vantagens, principalmente no que se refere à implementação da computação paralela, proporcionando redução de custos e a utilização mais adequada de recursos computacionais. Portanto, foi possível a união do custo relativamente baixo oferecido pelos sistemas computacionais distribuídos, ao alto desempenho fornecido pelo processamento paralelo, originando o que passou a ser conhecido como "*computação paralela distribuída*".

Embora as vantagens obtidas com a computação paralela distribuída sejam evidentes, diversos novos problemas emergem dessa nova abordagem. Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas levando-se em consideração os problemas existentes na utilização da computação paralela distribuída. A maioria dessas pesquisas aborda problemas com os meios de interconexão, com a portabilidade das aplicações, com os protocolos de comunicação, com o escalonamento de processos e suas implicações no desenvolvimento final do sistema, entre outros. O

escalonamento de processos constitui um tema de grande importância, principalmente por influenciar diretamente o desempenho do sistema.

Vários são os objetivos que podem ser atingidos a partir de políticas de escalonamento de processos; o balanceamento de cargas, por exemplo, é um deles, sendo responsável por fornecer um equilíbrio no uso dos recursos de processamento do sistema, mantendo sua estabilidade e, potencialmente, levando à obtenção de melhor desempenho. Várias políticas e respectivos mecanismos implementam abordagens diversas para o escalonamento de processos, com o objetivo de balancear as cargas do sistema (Wang & Morris, 1985; Shivaratri et al., 1992).

Os resultados observados em termos do desempenho atingido na execução de uma dada classe de aplicações estão intimamente ligados à qualidade das informações utilizadas pelo mecanismo que implementa uma política de escalonamento. A qualidade das informações, por sua vez, depende ainda da natureza, da quantidade e da validade das informações, no instante em que são utilizadas pelo processo que decide onde executar um dado processo (Feitelson et al, 1997; Feitelson & Rudolph, 1995).

A utilização de índices de carga tem sido amplamente adotada na implementação de políticas de escalonamento, visando a diferentes objetivos. Atualmente, no que se refere a escalonamento de processos, um índice de carga corresponde a uma métrica usada para quantificar a carga de trabalho existente em cada elemento de processamento do sistema.

A maioria dos modelos adotados para índices de carga discutidos na literatura (Ferrari & Zhou, 1987; Kunz, 1991; Mehra, 1993; Schnor et al, 1996; Xu & Lau, 1997; Dantas & Zaluska, 1998) consideram implementações bastante simples no que se refere à avaliação da carga de trabalho, bem como à medição do desempenho dos elementos de processamento. Adicionalmente, os índices de carga considerados na literatura visam, quase exclusivamente, sistemas homogêneos, desconsiderando os níveis de heterogeneidade existentes nos sistemas distribuídos.

A complexidade para se tratar a heterogeneidade dos sistemas no que se refere aos índices de carga, deixa em aberto uma lacuna bastante atrativa para o

desenvolvimento de pesquisas. Preencher essa lacuna pode permitir que melhores níveis de desempenho possam ser alcançados e estabelecidos quando as soluções simplificadas, já consolidadas no que se refere a sistemas homogêneos, possam ser adotadas com sucesso para os sistemas heterogêneos.

Isso constitui o tema central a ser abordado nesta tese, que busca a obtenção de novos índices de carga, estendendo-os para índices de desempenho que sejam capazes de espelhar não somente a carga de trabalho submetida a uma máquina (ou sistema) em um dado momento, mas que sejam capazes de refletir também o desempenho computacional disponível, considerando-se a heterogeneidade do sistema.

Assim, esta tese aborda o problema de índice de carga (e de desempenho) em sistemas computacionais distribuídos heterogêneos. O escalonamento de processos é discutido como o mecanismo que fará uso desses índices, objetivando a obtenção de melhor desempenho.

Mais especificamente, esta tese apresenta uma nova maneira de se tratar a heterogeneidade dos sistemas computacionais distribuídos, levando ao estabelecimento de um novo índice de desempenho (em substituição aos índices de carga) que possa ser utilizado de forma eficiente nesse tipo de sistema, baseando-se nos preceitos consagrados na literatura (Ferrari & Zhou, 1987; Kunz, 1991; Khokhar et. al., 1993; Ambrosious et. al., 1996; Braun et. al, 1998; Ekemecic, Tartaja & Milutinovic, 1996; Beitz et al, 2000; Amir et al, 2000; Abdelzaher & Shin, 2000; Beaumont et al, 2003).

## **1.1 Organização dos Capítulos**

Estruturalmente, esta tese está composta por um capítulo de introdução, dois capítulos de revisão bibliográfica, um capítulo apresentando a formalização de métricas para a aferição da heterogeneidade de um sistema computacional distribuído, um capítulo descrevendo soluções para obtenção de índices de desempenho, um capítulo de estudo de caso, um capítulo com a apresentação dos resultados obtidos e um capítulo de conclusões. Além disso, é incluído um apêndice contendo os códigos-fonte dos programas utilizados na concepção do simulador e

nos testes executados e um capítulo de referências bibliográficas. Os parágrafos subseqüentes descrevem mais detalhadamente os capítulos que compõem este trabalho.

O Capítulo 2 discute o escalonamento de processos em sistemas computacionais distribuídos. Mais especificamente, esse capítulo apresenta uma revisão dos conceitos essenciais sobre o escalonamento de processos relatados na literatura especializada: políticas, mecanismos, classificações e objetivos. Dentre os objetivos é dado destaque ao balanceamento de cargas, muitas vezes confundido com o próprio escalonamento. Cada conceito apresentado é discutido e tem seu foco direcionado para os objetivos de interesse deste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre índices de carga. Uma vez que a medição da carga de trabalho se faz necessária, independentemente do tipo de escalonamento que se está utilizando, o índice de carga de determinado recurso é imprescindível para o sucesso de um escalonador. Na primeira parte do capítulo, tem-se a definição de conceitos básicos e do estado da arte de índices de carga, suas características e funcionamento. A segunda parte do capítulo trata dos fatores que influenciam direta ou indiretamente o desempenho obtido por um escalonador de processos. Os recursos que afetam esse desempenho e o impacto causado por cada um deles são também discutidos. Finalizando o capítulo, é discutida a necessidade de se ter um índice que seja flexível e que leve em consideração as diversidades apresentadas pelos sistemas computacionais distribuídos heterogêneos.

Com o intuito de analisar o comportamento dos diversos índices de carga existentes na literatura, quando da sua utilização por um escalonador de processos em um sistema computacional distribuído heterogêneo, diversos estudos de caso foram elaborados e são apresentados no capítulo 4. Esses experimentos constituem-se na submissão de diferentes tipos de aplicações ao mesmo ambiente de escalonamento, quando adotados diferentes índices de carga. A execução dos experimentos foi realizada em uma plataforma distribuída baseada no sistema operacional Linux (Maxwells, 2000; Ferreira, 2003). O ambiente utilizado para distribuir os processos é o AMIGO (*dynAMical flexible schedulinG envirOnment* (Souza, 2000)), que atende a aplicação e envia os processos para as máquinas

envolvidas no processamento. A idéia é avaliar o impacto dos índices de carga quando o ambiente utilizado está composto por máquinas heterogêneas. Adicionalmente, uma vez que o escalonamento de processos é dinâmico, pode-se observar também que um sistema, mesmo sendo homogêneo, pode se tornar temporariamente heterogêneo. Com esses estudos pode-se observar a real ligação existente entre o tipo de aplicação submetida ao escalonamento e o índice de carga utilizado por esse escalonador. Esses estudos deram margem à investigação da heterogeneidade do sistema como um todo e da necessidade em se conhecer mais profundamente o impacto causado por essa heterogeneidade.

No Capítulo 5 é estabelecido um histórico teórico sobre heterogeneidade e são apresentadas as formas presentes na literatura para o cálculo do grau de heterogeneidade/homogeneidade de um sistema computacional (Grosu, 1996; Zhang & Yan, 1995). Uma comparação e uma análise dessas métricas foi desenvolvida, levando a uma nova solução para as necessidades deste trabalho (Branco et al, 2003a; Branco et al, 2003b; Branco et al, 2003c). A formalização de uma nova métrica é apresentada e a comparação desta com as presentes na literatura é feita. Dessa forma, são redefinidos os cálculos do grau de heterogeneidade e o impacto que representa no escalonamento de processos no tocante ao ganho de desempenho.

Uma vez avaliados os índices de carga existentes na literatura e o grau de heterogeneidade apresentado pelos sistemas computacionais, o capítulo 6 apresenta um índice de desempenho original, que leva em consideração não só a carga do recurso bem como a heterogeneidade existente entre esses recursos. Esse novo índice pondera os elementos básicos (CPU, disco, rede e memória) de um sistema de modo a fornecer não somente a carga de um recurso isoladamente, mas que uma imagem global da capacidade de trabalho do elemento em análise. Para tanto, foi confeccionado um simulador de índice de desempenho baseado na teoria de filas, que possibilitou a avaliação não somente dos índices de carga anteriores, como também do novo índice proposto. Uma descrição das especificações do simulador e o seu funcionamento também são aspectos tratados nesse capítulo.

Partindo do simulador existente, várias simulações foram executadas e analisadas estatisticamente, e os resultados obtidos são apresentados no capítulo 7.

As simulações executadas vieram ao encontro do esperado, demonstrando a real relação existente entre o índice de carga utilizado para efetuar o escalonamento e o tipo de aplicação submetida. Esses resultados mostraram também a viabilidade em se adotar o índice de desempenho proposto nesta tese.

Ao final desta tese, no capítulo de conclusões, são realizadas ponderações globais sobre o que foi abordado no decorrer do texto. O objetivo dessas ponderações está fortemente ligado às possibilidades fornecidas pelas novas proposições efetuadas, quais as suas funcionalidades, quais os seus domínios de aplicação e suas possíveis limitações. Após essas ponderações, são explicitadas as contribuições deste trabalho, que vão desde a revisão bibliográfica crítica em relação ao tema, à proposta do novo índice de desempenho para ambientes heterogêneos. Ao final do Capítulo 8, são enumeradas diversas sugestões para trabalhos futuros, visando à continuidade deste trabalho.

O texto é concluído com a apresentação formal das referências bibliográficas no capítulo 9 e o apêndice que fornece detalhes sobre as aplicações utilizadas para efetuar os testes descritos no capítulo 4 e o simulador apresentado no capítulo 6.