

## **5. Métricas para Definição de Níveis de Homogeneidade e Heterogeneidade em Sistemas Computacionais Distribuídos**

A heterogeneidade dos recursos existentes nas diversas máquinas de um sistema computacional leva à possibilidade de se ter uma grande variação na potência computacional de cada uma. Essa variação, aliada à possibilidade de utilização de diferentes arquiteturas introduz dificuldades que precisam ser gerenciadas quando os processos são escalonados, visando à obtenção de bom desempenho. Os modelos visando à avaliação de desempenho e os índices de desempenho tradicionalmente usados para sistemas homogêneos, apresentam restrições quanto à aplicabilidade quando sistemas heterogêneos são considerados. Os escalonadores de processos devem incorporar mecanismos eficazes para a gestão de recursos distintos, levando-se em conta as características de arquitetura, configuração e tempo.

Assim, um primeiro passo é definir se um dado sistema computacional distribuído pode ou não ser tratado como homogêneo. Para isso pode ser definido o grau de heterogeneidade do sistema que, de modo geral, indica, mais especificamente no estudo realizado neste trabalho, se o sistema está ou não se comportando de modo heterogêneo. Isto é, a heterogeneidade será analisada levando-se em conta a dimensão tempo, além dos aspectos tradicionais de arquitetura e configuração.

Este capítulo aborda os conceitos de homogeneidade e heterogeneidade apresentados na literatura e apresenta a visão adotada neste trabalho, enfocando principalmente as métricas utilizadas para obtenção do grau de heterogeneidade e propondo uma nova métrica.

## **5.1 Considerações Iniciais**

Inúmeras referências são encontradas na literatura apresentando estudos que abordam sistemas homogêneos e heterogêneos. Na maioria dos casos são apresentadas apenas definições teóricas que levam em conta a intuição a respeito do que é um sistema homogêneo ou um sistema heterogêneo, são apresentadas (Khokhar et. al., 1993; Ambrosious et. al., 1996; Braun et. al, 1998; Ekemecic, Tartaja & Milutinovic, 1996; Braun et. al., 1999; Chen et al., 1993; Potter, 1993; Beitz et al, 2000; Amir et al, 2000; Abdelzaher & Shin, 2000; Beaumont et al, 2003).

Para a classificação de um sistema computacional em termos de homogeneidade/heterogeneidade devem ser utilizadas métricas capazes de traduzir com precisão as características arquiteturais, configuracionais e temporais<sup>5</sup>.

O estudo bibliográfico realizado para este trabalho mostra poucas abordagens com justificativas formais. Algumas dessas abordagens não são adequadas para este trabalho, por tratarem a homogeneidade/heterogeneidade sob enfoques que podem confundir a sua utilização no escalonamento de processos (Zhang & Yan, 1995) (Grosu, 1996).

Dessa forma, o objetivo central deste capítulo é a proposição de novas métricas para a avaliação adequada do grau de homogeneidade/heterogeneidade de um sistema computacional.

## **5.2 Histórico**

O termo homogeneidade tem sido tanto popularmente como cientificamente definido de inúmeras maneiras e em áreas de pesquisa diversificadas, tais como a física, matemática, engenharia, computação entre outras (Khokhar et. al., 1993; Ambrosious et. al., 1996; Braun et. al, 1998; Ekemecic, Tartaja & Milutinovic, 1996; El-Rewini et. al., 1994; Freund & Conwell, 1990; Ekemecic, Tartaja & Milutinovic, 1995; Maheswaran, Braun & Siegel, 1998; Maheswaran, Braun & Siegel, 1999;

---

<sup>5</sup> A característica temporal é introduzida neste trabalho não tendo sido encontrada na literatura outros trabalhos que a consideram.

Siegel & Ali, 1999; Beitz et al, 2000; Amir et al, 2000; Abdelzaher & Shin, 2000; Beaumont et al, 2003). Apesar da diversidade de definições, observa-se uma certa convergência no que se refere à semântica ao termo.

Por muitos anos, a computação executada em sistemas homogêneos possibilitou desempenho adequado para um grande número de aplicações. A computação homogênea, dentro da área de computação, é a que faz uso de uma ou mais máquinas de um mesmo tipo, permitindo que diversas aplicações sejam atendidas de maneira adequada (Khokhar et. al., 1993). Como homogêneo pode-se definir também um sistema que faz uso de apenas um modo de paralelismo em uma dada máquina, de modo que essa máquina não possa executar de forma adequada todos os tipos de aplicações (El-Rewini et. al., 1994) (Scott & Potter, 1994).

Neste trabalho, o termo "Sistemas Homogêneos" será visto como um conjunto de máquinas que possuem as mesmas características, incluindo-se características da arquitetura, dos diversos componentes do sistema e o comportamento temporal das máquinas.

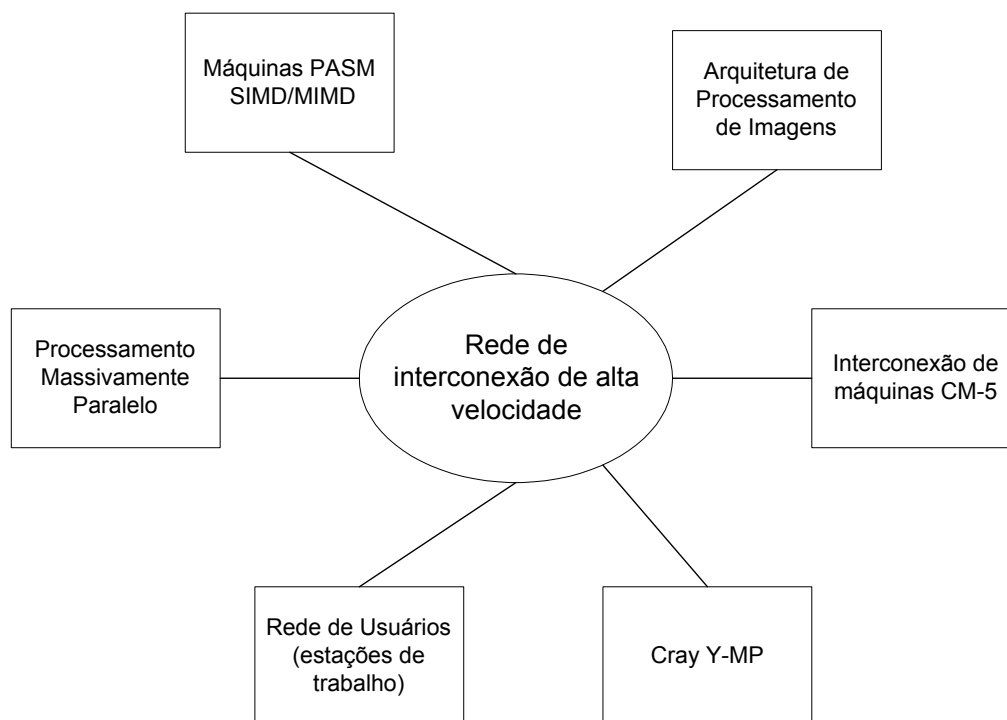
Dessa forma, um sistema computacional heterogêneo é aquele que faz uso de diferentes tipos de processadores, velocidades dos processadores, modo de computação, tamanhos de memória, números de processadores (mesmo em máquinas essencialmente paralelas), componentes de processamento, e/ou paradigmas de conectividade que otimizam o desempenho, entre outros. Sendo assim, diferentes tipos de processadores e componentes de processamento podem envolver processadores vetoriais, processadores SIMD, processadores MIMD, conexões ponto a ponto, anel, ou até mesmo uma mistura desses meios de interconexão.

Adicionalmente, um sistema pode apresentar heterogeneidade quando a característica da carga submetida para processamento leva os diversos elementos a se apresentarem como heterogêneos.

Quando uma aplicação deve ser executada em um sistema heterogêneo, espera-se poder executá-la de uma melhor maneira (em relação a um sistema homogêneo), desde que se conheçam quais as máquinas dentre as que compõem o

sistema têm melhores condições para executá-la. Isto é, pode haver uma adequação da carga aos componentes do sistema uma vez que não se considera a equivalência dos processadores, a uniformidade das arquiteturas, fatores esses que contribuem para a simplificação na obtenção de muitas métricas como os índices de carga (Freund & Conwell, 1990; Siegel, Antonio & Metzger, 1996; Siegel, Dietz & Antonio, 1997; Singh & Youssef, 1996; Tan et. al., 1997; Amir et al, 2000; Abdelzaher & Shin, 2000).

Um exemplo de um sistema computacional heterogêneo pode ser visualizado na Figura 5.1.



**Figura 5.1 – Um exemplo de um ambiente computacional heterogêneo**

Dessa maneira, tendo-se um sistema computacional heterogêneo, as máquinas que possuem diferentes potências computacionais devem ser então ordenadas por ordem de “capacidade computacional”, através de métricas que levem em consideração a heterogeneidade do sistema.

A idéia de computação heterogênea busca adequar as tarefas que estão chegando para serem executadas às melhores máquinas disponíveis no sistema, partindo-se de uma tarefa global (conhecida como meta-tarefa) que poderá ser subdividida em outras tarefas de acordo com as características específicas de cada porção do código, para que cada pedaço possa ser executado pela máquina que melhor convier.

A Figura 5.2 ilustra a idéia de se subdividir uma meta-tarefa em tarefas menores, que possam ser apropriadas às máquinas que podem executá-las de uma melhor forma.

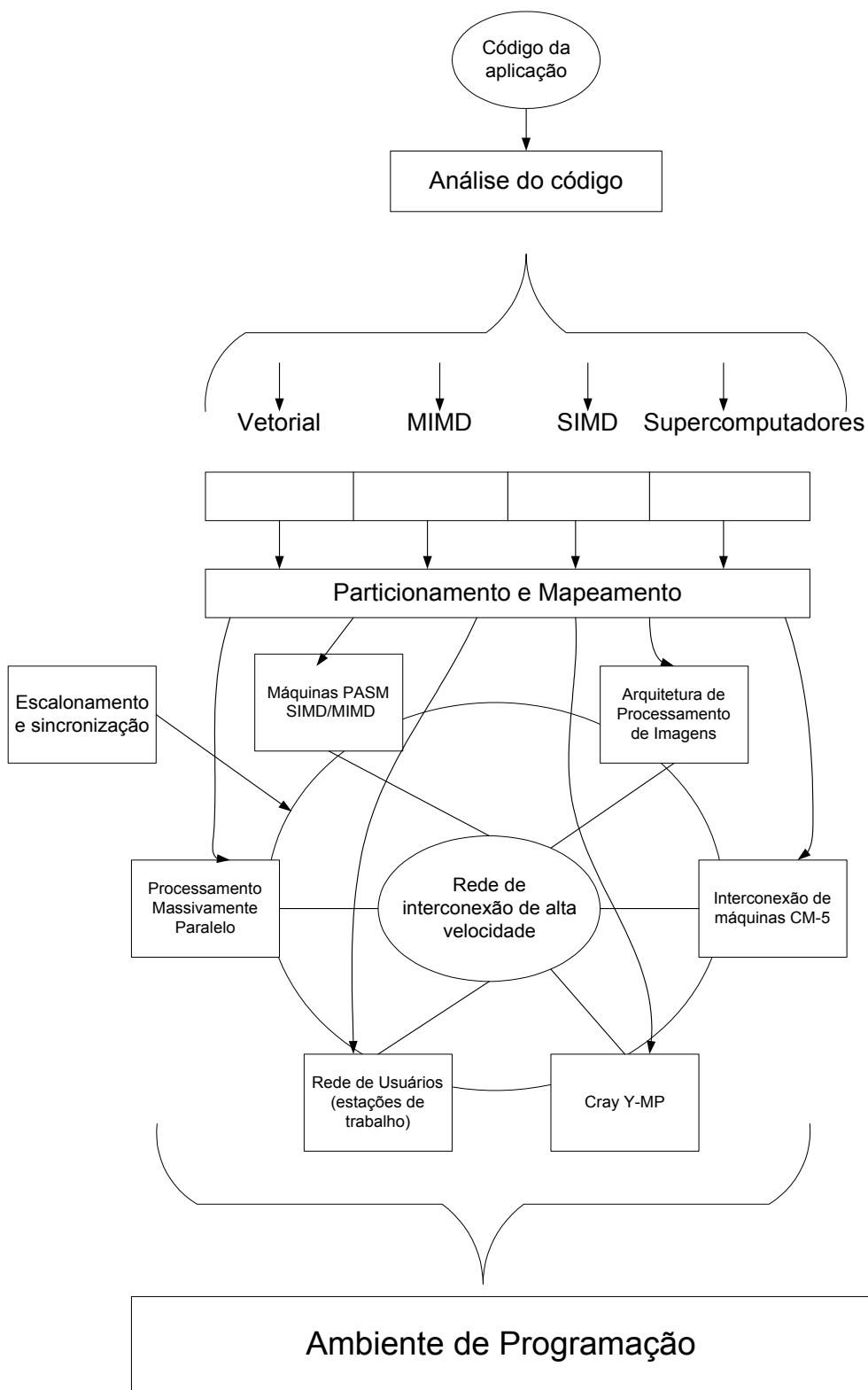


Figura 5.2 – Representação do particionamento da meta-tarefa em subtarefas a serem alocadas em máquinas que possam executá-las da melhor maneira possível (Freund & Conwell, 1990).

Embora o esquema da figura 5.2 seja geral, neste trabalho, a heterogeneidade será tratada de forma mais específica, onde não serão analisados os possíveis desmembramentos das tarefas que chegam ao sistema (de modo a explicitar todos os níveis de paralelismo embutidos). O objetivo central será considerar todas as máquinas que compõem o sistema e o quanto essas máquinas estão carregadas, produzindo um índice de desempenho que leve em conta o grau de heterogeneidade do sistema. Assim, os sistemas homogêneos são apenas uma subclasse dos sistemas heterogêneos.

### **5.3 Métricas para Obtenção do Grau de Heterogeneidade e Homogeneidade**

O uso de sistemas computacionais heterogêneos potencialmente oferece uma boa oportunidade para a obtenção de melhor desempenho das aplicações computacionais através da adequada atribuição das tarefas (ou processos) aos processadores. Entretanto, um dos grandes problemas dos sistemas distribuídos baseados em estações de trabalho é justamente essa heterogeneidade (Zhang & Yan, 1995).

As métricas de heterogeneidade podem ser utilizadas de várias maneiras. No contexto desta tese, os escalonadores de processos podem usar essas métricas para calcularem índices de desempenho mais confiáveis, permitindo melhores decisões de escalonamento. Adicionalmente, métricas de desempenho amplamente utilizadas no contexto de sistemas computacionais homogêneos, tais como *speedup*, eficiência e tempo de resposta (Ferrari & Zhou, 1987) (Mehra, 1993) (Zhang & Yan, 1995) podem ser melhor caracterizadas conhecendo-se o grau de heterogeneidade de um sistema.

Alguns modelos e métricas para sistemas heterogêneos foram propostas por Zhang & Yan (Zhang & Yan, 1995), onde os sistemas computacionais heterogêneos podem ser representados por um grafo  $(M,C)$  onde  $M=\{M_1,M_2,M_3,M_4,M_5,\dots,M_n\}$  é considerado um conjunto de máquinas heterogêneas (cada uma possuindo sua potência computacional que pode ser medida a partir da velocidade da CPU, disco e capacidade de memória), e  $C$  sendo a rede de intercomunicação ligando essas máquinas.

Com o objetivo de quantificar a heterogeneidade existente entre as máquinas de um sistema sem a utilização de medições complexas, Zhang e Yan propuseram duas métricas para avaliar a potência computacional relativa existente entre um conjunto de máquinas. Em ambas as medidas foi estipulada uma máquina como sendo a máquina padrão, a partir da qual todas as outras máquinas são comparadas; nesse caso escolheram a máquina mais rápida do sistema.

$$W_i(A) = \frac{S_i(A)}{\max_{i=1}^n \{S_i(A)\}} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde  $i=1, \dots, n$  e  $S_i(A)$  são a velocidade de  $M_i$  para executar a aplicação  $A$  dedicadamente. A velocidade pode ser definida a partir de um número de operações básicas por unidade de tempo, por exemplo, e a potência computacional de cada máquina é representada pela velocidade relativa à máquina padrão.

A segunda métrica proposta é:

$$W_i(A) = \frac{\min_{i=1}^n \{T(A, M_i)\}}{T(A, M_i)} \quad \text{Equação 5.2}$$

onde  $i=1, \dots, n$  e  $T(A, M_i)$  é o tempo de execução da aplicação  $A$  na máquina  $M_i$ .

Grosu (Grosu, 1996) ampliou o conceito dessas métricas de modo a escolher a máquina padrão como sendo a máquina mais lenta do sistema.

$$W_i(A) = \frac{\min_{i=1}^n \{S_i(A)\}}{S_i(A)} \quad \text{Equação 5.3}$$

onde  $i=1, \dots, n$  e  $S_i(A)$  é a velocidade da máquina  $M_i$  para executar a aplicação  $A$  dedicadamente, e a potência computacional é então dada a partir da velocidade de cada máquina relativamente comparada como a máquina mais lenta do sistema. Sendo assim, Grosu define:

$$W_i(A) = \frac{T(A, M_i)}{\max_{i=1}^n \{T(A, M_i)\}} \quad \text{Equação 5.4}$$

onde  $i=1, \dots, n$  e  $T(A, M_i)$  é o tempo de execução da aplicação  $A$  na máquina  $M_i$ .



Deste modo, as equações 5.1 e 5.2 formam as bases para o cálculo da potência computacional das máquinas, levando-se em consideração que a máquina padrão é a máquina mais rápida do sistema, sendo chamada de  $W_i^f$  (f - fast). Por outro lado, as equações 5.3 e 5.4 são utilizadas para o cálculo da potência computacional das máquinas levando-se em consideração que a máquina padrão é agora a máquina mais lenta do sistema, sendo representada por  $W_i^s$  (s - slow). Em (Zhang & Yan, 1995) e (Grosu, 1996) quatro modos de quantificar a heterogeneidade em um sistema baseado nos valores de  $W$  são propostos. O primeiro e o segundo caso fazem uso do desvio padrão  $H_1$  (que pode ser calculado baseado na potência computacional relativa a máquina mais rápida ou mais lenta do sistema)

$$H_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{med} - W_i)^2}{n}} \quad \text{Equação 5.5}$$

ou do desvio padrão absoluto, chamado de  $H_2$  (também calculado baseado na potência computacional relativa a máquina mais rápida ou mais lenta do sistema)

$$H_2 = \frac{\sum_{i=1}^n |W_{med} - W_i|}{n} \quad \text{Equação 5.6}$$

onde  $W_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{n}$ .

Entretanto, em ambos  $H_1$  e  $H_2$  os valores são observados e analisados de maneira uniforme, fazendo-se uso da média para obter tanto o desvio padrão como o desvio padrão absoluto. Essas métricas são, entretanto, inadequadas quando existe uma diferença razoável entre as potências computacionais das máquinas, uma vez que tanto  $H_1$  quanto  $H_2$  não refletem apropriadamente o efeito causado pela presença de máquinas mais rápidas ou mais lentas.

Tomando-se como base as restrições das métricas  $H_1$  and  $H_2$ , Zhang e Yan (Zhang & Yan, 1995) propuseram uma terceira métrica,  $H_3$ , calculada a partir da

potência computacional das máquina obtida relativamente à máquina mais rápida do sistema:

$$H_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - W_i^f(A))}{n} \quad \text{Equação 5.7}$$

De modo similar, Grosu (Grosu, 1996) define  $H_4$  baseado na potência computacional das máquinas obtida relativamente à máquina mais lenta do sistema:

$$H_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - W_i^s(A))}{n} \quad \text{Equação 5.8}$$

Em  $H_3$ , a potência computacional da máquina mais rápida do sistema é igual a 1, enquanto que em  $H_4$  a máquina mais lenta é que possui potência computacional igual a 1. Desse modo,  $H_4$  representa a distância (em termos de potência computacional) entre cada máquina e a máquina mais rápida do sistema, e  $H_3$  calcula a mesma distância entre cada máquina e a máquina mais lenta do sistema.

Baseado nesses experimentos, Grosu determina que a métrica  $H_4$  é mais apropriada do que  $H_3$ . Entretanto, alguns estudos de caso realizados no decorrer deste trabalho revelaram que essa afirmação não é correta para todas as situações como pode ser observado nas tabelas 5.1 a 5.3 e correspondentes figuras 5.3 a 5.5.

**Tabela 5.1- Potência computacional das máquinas é iniciada em 1 e então gradualmente decrementada.**

| * | $W_{(M1)}$ | $W_{(M2)}$ | $W_{(M3)}$ | $W_{(M4)}$ | $W_{(M5)}$ | $W_{(M6)}$ | $W_{(M7)}$ | $W_{(M8)}$ | $W_{(M9)}$ | $W_{(M10)}$ | $H_1$ | $H_2$ | $H_3$ | $H_4$ |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1          | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.03  | 0.018 | 0.09  | 0.01  |
| 2 | 1          | 0.75       | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.06  | 0.029 | 0.105 | 0.161 |
| 3 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.1   | 0.068 | 0.13  | 0.24  |
| 4 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.14  | 0.111 | 0.165 | 0.321 |
| 5 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.19  | 0.158 | 0.215 | 0.452 |
| 6 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.23  | 0.194 | 0.27  | 0.46  |
| 7 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.27  | 0.225 | 0.34  | 0.54  |
| 8 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.15       | 0.9        | 0.9         | 0.3   | 0.25  | 0.41  | 0.64  |
| 9 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.15       | 0.1        | 0.9         | 0.31  | 0.26  | 0.49  | 0.67  |

\* Configuração

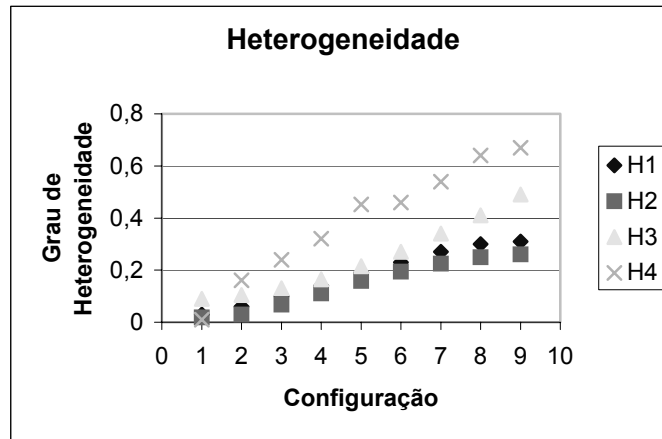


Figura 5.3 – Grau de heterogeneidade quando todas as potências computacionais estão próximas de 1.

A figura 5.3 mostra quando a maioria das potências computacionais das máquinas tende a 1 todas as métricas são satisfatórias, por exemplo, o grau de heterogeneidade aumenta conforme aumenta a variação das potências computacionais.

Tabela 5.2 – Todas as potências computacionais das máquinas são iniciadas distantes do valor da potência computacional da máquina mais rápida e são então gradualmente incrementadas, mas ainda mantendo uma distância da máquina mais rápida.

| * | $W_{(M1)}$ | $W_{(M2)}$ | $W_{(M3)}$ | $W_{(M4)}$ | $W_{(M5)}$ | $W_{(M6)}$ | $W_{(M7)}$ | $W_{(M8)}$ | $W_{(M9)}$ | $W_{(M10)}$ | H <sub>1</sub> | H <sub>2</sub> | H <sub>3</sub> | H <sub>4</sub> |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 1          | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.15           | 0.09           | 0.45           | 0.05           |
| 2 | 1          | 0.75       | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.16           | 0.12           | 0.425          | 0.084          |
| 3 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.17           | 0.13           | 0.41           | 0.107          |
| 4 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.17           | 0.12           | 0.405          | 0.116          |
| 5 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.17           | 0.13           | 0.415          | 0.271          |
| 6 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.19           | 0.14           | 0.43           | 0.333          |
| 7 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.21           | 0.15           | 0.46           | 0.474          |
| 8 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.15       | 0.5        | 0.5         | 0.25           | 0.18           | 0.49           | 0.614          |
| 9 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.15       | 0.1        | 0.5         | 0.28           | 0.22           | 0.53           | 0.664          |

\* Configuração

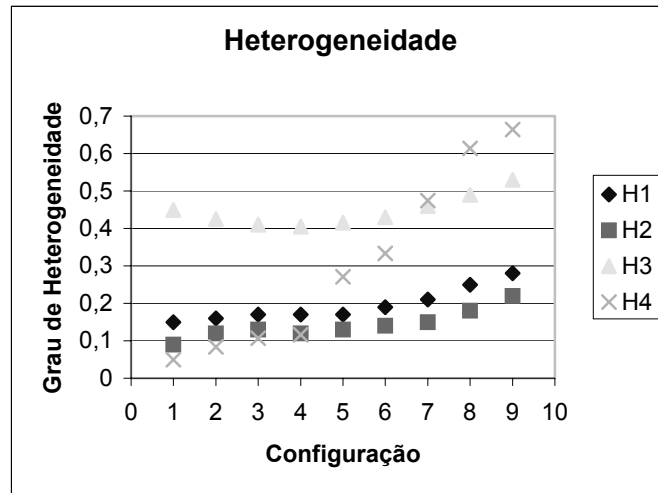


Figura 5.4 – Grau de Heterogeneidade quando todas as potências computacionais das máquinas estão distantes de 1.

Neste caso, a métrica  $H_3$  não representa apropriadamente o quão heterogêneo é o sistema; por outro lado, a métrica  $H_4$  produz bons resultados. Tomando como base somente esses resultados, poder-se-ia inferir erradamente que a métrica  $H_4$  é a que melhor caracteriza a heterogeneidade de um sistema computacional. Essa inferência está errada uma vez que mostra apenas uma visão parcial e os resultados não podem ser generalizados.

Tabela 5.3 – A configuração das máquinas leva a uma situação onde metade das máquinas possui potência computacional abaixo da média e metade das máquinas possui potência computacional acima dessa média. Dois casos diferentes são também apresentados nesta tabela: uma máquina com potência computacional alta e todas as outras com potência computacional baixa, e uma com potência computacional baixa e todas as outras com potência computacional alta.

| * | $W_{(M1)}$ | $W_{(M2)}$ | $W_{(M3)}$ | $W_{(M4)}$ | $W_{(M5)}$ | $W_{(M6)}$ | $W_{(M7)}$ | $W_{(M8)}$ | $W_{(M9)}$ | $W_{(M10)}$ | $H_1$ | $H_2$ | $H_3$ | $H_4$ |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1          | 0,9        | 0,9        | 0,9        | 0,9        | 0,9        | 0,9        | 0,9        | 0,9        | 0,9         | 0,16  | 0,09  | 0,45  | 0,05  |
| 2 | 1          | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 0,5         | 0,16  | 0,09  | 0,05  | 0,45  |
| 3 | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 0,5        | 0,5         | 0,26  | 0,25  | 0,25  | 0,25  |
| 4 | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          | 0,3        | 0,3        | 0,3        | 0,3        | 0,3         | 0,37  | 0,35  | 0,35  | 0,35  |

\* Configuração

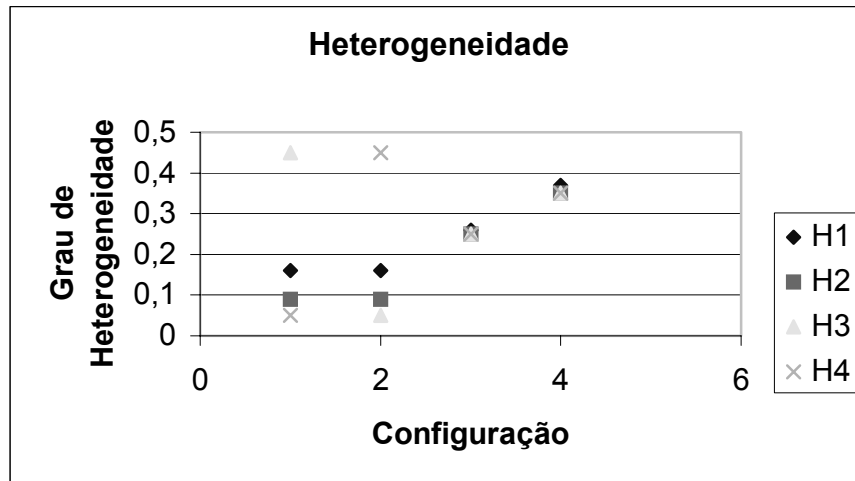


Figura 5.5 – Grau de heterogeneidade onde 4 situações são impostas.

A figura 5.5 mostra que existem dois casos ((1) nove máquinas com potência computacional igual a 1 e uma máquina com potência computacional igual a 0,5; (2) 9 máquinas com potência computacional igual a 0,5 e 1 máquina com potência computacional igual a 1), onde os graus de heterogeneidade em H<sub>3</sub> e H<sub>4</sub> deveriam ser similares, mas eles são contraditórios. Por essa razão, novos estudos fazem-se necessários de modo que possam espelhar a realidade com mais exatidão.

### 5.3.1 Análise Matemática

Buscando averiguar a incompatibilidade dos resultados apresentados pelas duas métricas H<sub>3</sub> e H<sub>4</sub> foi feita uma análise matemática dessas métricas, análise que demonstrou que ambas as equações referem-se ao mesmo tipo de medida e que essas medidas não são complementares ou contraditórias como podem parecer nas equações 5.9 e 5.10.

Ainda tomando como base a análise matemática das métricas H<sub>3</sub> e H<sub>4</sub>, pode-se verificar também que um dado sistema pode ser totalmente homogêneo (valores de H<sub>3</sub> e H<sub>4</sub> iguais a 0), mas nunca vai atingir o ápice da heterogeneidade (valores de H<sub>3</sub> e H<sub>4</sub> iguais a 1). Isto ocorre devido ao fato que não existe um número máximo de computadores que possa compor o sistema e, além disso, o sistema pode sempre assumir uma configuração de maior grau de heterogeneidade.

Para o cálculo a partir da máquina mais rápida do sistema, segue:

$$(W_1)_f = \frac{S_1}{S_M}, (W_2)_f = \frac{S_2}{S_M}, \dots, (W_n)_f = \frac{S_n}{S_M} \text{ e } 0 < (W_i)_f \leq 1$$

$$M_f = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i)_f}{n} = \frac{1}{S_M} \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{n} = \frac{1}{S_M} * M_i \quad \text{sendo } 1 = \frac{S_M}{S_M}$$

$$H_f = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - (W_i)_f)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{S_M}{S_M} - \frac{S_i}{S_M})}{n} = \frac{1}{S_M} \frac{\sum_{i=1}^n (S_M - S_i)}{\frac{n}{1}} = \frac{1}{S_M} \sum_{i=1}^n \frac{(S_M - S_i)}{n} \quad \text{Equação 5.9}$$

onde  $S_i$  é a maior velocidade de  $i$ ,  $W_i$  é a potência computacional da máquina  $i$ ,  $M_f$  é a media das potências computacionais baseadas na máquina mais rápida do sistema, e  $H_f$  é o grau de heterogeneidade do sistema quando a potência computacional de cada máquina é obtida a partir da velocidade da máquina mais rápida do sistema.

Para o cálculo a partir da máquina mais lenta do sistema segue:

$$(W_1)_s = \frac{S_m}{S_1}, (W_2)_s = \frac{S_m}{S_2}, \dots, (W_n)_s = \frac{S_m}{S_n} \quad \text{e } 0 < (W_i)_s \leq 1$$

$$M_s = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i)_s}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{S_m}{S_i} = \frac{S_m}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i} \quad \text{sendo } 1 = \frac{S_m}{S_m}$$

$$H_s = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - (W_i)_s)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{S_m}{S_m} - \frac{S_m}{S_i})}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{S_i S_m - S_m S_m}{S_m S_i})}{n} = \frac{S_m}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_m} - \frac{1}{S_i} = \frac{S_m}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_m} - \frac{1}{S_i} \quad \text{Equação 5.10}$$

Partindo-se da análise efetuada pode-se observar que as métricas não são idênticas, o que implica na necessidade do uso da métrica certa para determinado sistema. Além disso, pode-se observar que as duas métricas não proporcionam valores complementares.

Adicionalmente pode ser observado também que  $H_f = 1 - M_f$ , e  $H_s = 1 - M_s$ . Assim, se  $S_m \approx S_M$  então o sistema é homogêneo, e  $H_f \sim 0$  como segue:

$$\text{uma vez que } H_f = 1 - M_f \text{ e } (W_i)_f = \frac{S_i}{S_M} \geq \frac{S_m}{S_M}.$$

$$M_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_i)_f = \frac{1}{n} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (W_i)_f \right) \geq \frac{1}{n} \left( 1 + (n-1) \frac{S_m}{S_M} \right) = \left( \frac{1}{n} + \left( \frac{n-1}{n} \right) \left( \frac{S_m}{S_M} \right) \right)$$

$$H_f = 1 - M_f \leq 1 - \left( \frac{1}{n} + \frac{n-1}{n} \left( \frac{S_m}{S_M} \right) \right)$$

e uma vez que  $H_s = 1 - M_s$  e  $(W_i)_s = \frac{S_m}{S_i} \geq \frac{S_m}{S_M}$

$$M_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_i)_s = \frac{1}{n} \left( 1 + \sum_{i=1}^n (W_i)_s \right) = \frac{1}{n} \left( 1 + (n-1) \frac{S_m}{S_i} \right) \geq \frac{1}{n} + (n-1) \left( \frac{S_m}{S_M} \right) = \frac{1}{n} + \left( \frac{n-1}{n} \right) \left( \frac{S_m}{S_M} \right)$$

$$H_s = 1 - M_s \leq 1 - \left( \frac{1}{n} + \left( \frac{n-1}{n} \right) \left( \frac{S_m}{S_M} \right) \right) \quad \text{então} \quad 0 \leq H_f, H_s \leq \frac{1}{n} + \left( \frac{n-1}{n} \right) \left( \frac{S_m}{S_M} \right)$$

Assim, sendo  $S_1, S_2, \dots, S_n$  as velocidades das máquinas que compõem o sistema, a média das velocidades pode ser dada por  $\bar{S} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n S_i \right)$ .

### 5.3.2 Estudos de Caso

Para averiguar a veracidade dos resultados analisados anteriormente, quatro estudos de caso empíricos foram realizados.

O primeiro estudo de caso apresenta um sistema composto por 10 máquinas onde 9 têm velocidade alta e idênticas e uma tem velocidade baixa. No segundo estudo de caso é considerado um sistema com 9 máquinas de velocidades baixas e uma máquina de velocidade alta. O terceiro e o quarto estudo de caso apresentam uma análise de 10 diferentes máquinas em um sistema (altamente heterogêneo). Os resultados desses estudos de caso são apresentados nas tabelas 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7.

Considerando que  $H_3$  e  $H_4$  produzem resultados distintos quando aplicados ao mesmo sistema, foi averiguado qual valor leva à melhor métrica. Assim, a necessidade prática requer uma heurística que considere a média das velocidades das máquinas. Sendo assim, se mais de 50% das velocidades das máquinas estiverem abaixo da média, então a métrica  $H_3$  deve ser escolhida para calcular o grau de heterogeneidade do sistema, senão, considerando que mais de 50% das

velocidades das máquinas estarão acima da média, então a métrica  $H_4$  deve ser escolhida para calcular o grau de heterogeneidade.

Portanto, baseado nessa heurística e partindo do cálculo da média das velocidades (650 no primeiro estudo de caso) e verificando que este valor se aproxima do valor da máquina mais rápida (700), o grau de heterogeneidade deve ser calculado pela métrica  $H_3$  e o valor da potência computacional das máquinas deve ser calculado em relação à máquina mais rápida do sistema. Isso vem ao encontro dos resultados obtidos intuitivamente, já que 9 das 10 máquinas são idênticas e dessa maneira o sistema deve estar mais próximo de ser homogêneo do que heterogêneo.

No segundo estudo de caso, também considerando a média das velocidades das máquinas (250) e observando que essa média está próxima do valor da máquina mais lenta do sistema (200), o cálculo da heterogeneidade deve ser efetuado a partir da métrica  $H_4$ , bem como os valores das potências computacionais deverão ser considerados relativamente à máquina mais lenta do sistema. Neste caso, os resultados obtidos vêm novamente ao encontro dos resultados intuitivos, uma vez que 9 das 10 máquinas são idênticas e, novamente, o sistema deverá ser considerado mais homogêneo do que heterogêneo.

No terceiro estudo de caso as velocidades são definidas objetivando um alto grau de heterogeneidade em um sistema de 10 máquinas, que a partir da heurística e também intuitivamente pode-se ver que a melhor métrica é  $H_4$ .

No quarto estudo de caso, onde as velocidades das máquinas são aleatoriamente definidas em um sistema de 10 máquinas, pode ser concluído intuitivamente que o cálculo do grau de heterogeneidade de um sistema é mais apropriadamente obtido a partir de  $H_4$ . Entretanto, usar somente a média como um parâmetro para escolha da métrica para ser utilizada para obter o grau de heterogeneidade do sistema não é suficiente porque, como observado no terceiro e no quarto estudos de caso, o número de máquinas com velocidades acima e abaixo da média das velocidades é exatamente o mesmo e a escolha de uma ou de outra métrica não estaria levando em consideração as distâncias das máquinas à máquina



padrão, o que deixa evidente a necessidade da utilização ou proposição de uma nova métrica.

**Tabela 5.4 – Primeiro estudo de caso com 9 máquinas rápidas e 1 máquina lenta.**

|                | Máquina1           | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|----------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade(Si) | 700                | 700                         | 700      | 700        | 700                | 700                         | 700      | 700      | 700      | 200       | 650   |
| Carga (wi)fast | 1                  | 1                           | 1        | 1          | 1                  | 1                           | 1        | 1        | 1        | 0.2857143 | –     |
| Carga (wi)slow | 0.285714286        | 0.285714                    | 0.285714 | 0.285714   | 0.28571429         | 0.285714                    | 0.285714 | 0.285714 | 0.285714 | 1         | –     |
| Média Fast     | Desvio Padrão Fast | Desvio Padrão Absoluto fast | –        | Média slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | –        | H4_slow  | –         | –     |
| 0.928571429    | 0.225876976        | 0.128571                    |          | 0.357143   | 0.22587698         | 0.128571                    | 0.071429 |          | 0.642857 |           |       |

**Tabela 5.5 – Segundo estudo de caso com 9 máquinas lentas e 1 máquina rápida.**

|                 | Máquina1          | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|-----------------|-------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade (Si) | 200               | 200                         | 200      | 200        | 200                | 200                         | 200      | 200      | 200      | 700       | 250   |
| Carga (wi)fast  | 0.285714286       | 0.285714                    | 0.285714 | 0.285714   | 0.28571429         | 0.285714                    | 0.285714 | 0.285714 | 0.285714 | 1         | –     |
| Carga (wi)slow  | 1                 | 1                           | 1        | 1          | 1                  | 1                           | 1        | 1        | 1        | 0.2857143 | –     |
| Média fast      | Desvio PadrãoFast | Desvio Padrão Absoluto fast | –        | Média Slow | Desvio Padrão Slow | Desvio Padrão Absoluto Slow | H3_fast  | –        | H4_slow  | –         | –     |
| 0.357142857     | 0.225876976       | 0.128571                    |          | 0.928571   | 0.22587698         | 0.128571                    | 0.642857 |          | 0.071429 |           |       |

**Tabela 5.6 – Terceiro estudo de caso com 10 máquinas de velocidades diferentes e com um alto grau de heterogeneidade.**

|                 | Máquina1           | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade (Si) | 100                | 200                         | 300      | 400        | 500                | 600                         | 700      | 800      | 900      | 1000      | 550   |
| Carga (wi) fast | 0.1                | 0.2                         | 0.3      | 0.4        | 0.5                | 0.6                         | 0.7      | 0.8      | 0.9      | 1         | –     |
| Carga (wi) slow | 1                  | 0.5                         | 0.333333 | 0.25       | 0.2                | 0.166667                    | 0.142857 | 0.125    | 0.111111 | 0.1       | –     |
| Média fast      | Desvio Padrão fast | Desvio Padrão Absoluto Fast | –        | Média slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | –        | H4_slow  | –         | –     |
| 0.55            | 0.302765035        | 0.25                        |          | 0.292897   | 0.27726486         | 0.190929                    | 0.45     |          | 0.707103 |           |       |

Tabela 5.7 – Quarto estudo de caso com 10 máquinas diferentes onde as velocidades são aleatórias.

|                 | Máquina1           | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10   | Média |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-------------|-------|
| Velocidade (Si) | 540                | 760                         | 210      | 115        | 700                | 150                         | 930      | 300      | 425      | 66          | 419.6 |
| Carga (wi) fast | 0.580645161        | 0.817204                    | 0.225806 | 0.123656   | 0.75268817         | 0.16129                     | 1        | 0.322581 | 0.456989 | 0.070967742 | –     |
| Carga (wi) slow | 0.122222222        | 0.086842                    | 0.314286 | 0.573913   | 0.09428571         | 0.44                        | 0.070968 | 0.22     | 0.155294 | 1           | –     |
| Média fast      | Desvio Padrão Fast | Desvio Padrão Absoluto fast | –        | Média slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | –        | H4_slow  | –           | –     |
| 0.451182796     | 0.324222108        | 0.270323                    |          | 0.307781   | 0.29502959         | 0.219415                    | 0.548817 |          | 0.692219 |             |       |

#### 5.4 Modelando a Heterogeneidade

Como preconizado por Zhang e Yan (Zhang & Yan, 1995), uma expressão que quantifique a heterogeneidade de um sistema computacional deve levar em conta não somente a variância da capacidade computacional das máquinas, mas também o efeito causado no sistema pela presença de máquinas mais lentas e mais rápidas.

Sendo assim, o estudo de equações que avaliem o grau de heterogeneidade de um sistema é alvo de investigação neste trabalho uma vez que as métricas anteriormente apresentadas e avaliadas não apresentam resultados satisfatórios no contexto em que se insere este trabalho.

Com o intuito de suprir as deficiências apresentadas pelas métricas analisadas na seção 5.3, propõe-se uma métrica que quantifique a heterogeneidade de modo a refletir não somente a variação da potência computacional, mas também os efeitos dinâmicos do sistema. Neste trabalho, isto implica em inspecionar qual o impacto da presença de máquinas mais rápidas e mais lentas no sistema e qual o impacto em se retirar essas máquinas do sistema a fim de torná-los homogêneo.

Alguns estudos desenvolvidos levaram aos estudos de caso aqui apresentados e levaram em consideração as fórmulas propostas por (Zhang & Yan, 1995) e (Grosu, 1996) fazendo uso, entretanto, da máquina média e da mediana como sendo as máquinas padrões (ou máquina de referência) para o cálculo da

potência computacional  $W$ . Entretanto, essa adoção não proporcionou resultados adequados para o escopo deste trabalho.

No caso da adoção da média, os valores de  $H_3$  são sempre iguais a zero para qualquer conjunto de dados, e o valor de  $H_4$  apresenta valores negativos, não indicando adequadamente o grau de heterogeneidade do sistema.

A mediana, quando adotada como máquina padrão propicia resultados semelhantes aos da média, uma vez que os valores de  $H_3$  e  $H_4$  apresentam valores menores que zero, além das métricas manterem a incompatibilidade de valores como apresentado nas tabelas de 5.8 a 5.15.

**Tabela 5.8 – Primeiro estudo de caso com 9 máquinas rápidas e 1 máquina lenta (fazendo uso da média como máquina de referência).**

|                | Máquina1           | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|----------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade(Si) | 700                | 700                         | 700      | 700        | 700                | 700                         | 700      | 700      | 700      | 200       | 650   |
| Carga (wi)fast | 1,076923           | 1,076923                    | 1,076923 | 1,076923   | 1,076923           | 1,076923                    | 1,076923 | 1,076923 | 1,076923 | 0,307692  | _     |
| Carga(wi)slow  | 0,928571           | 0,928571                    | 0,928571 | 0,928571   | 0,928571           | 0,928571                    | 0,928571 | 0,928571 | 0,928571 | 3,25      | _     |
| Média Fast     | Desvio Padrão Fast | Desvio Padrão Absoluto fast | -        | Média slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | -        | H4_slow  | -         | -     |
| 1              | 0,243252           | 0,138462                    |          | 1,16       | 0,7341             | 0,417857                    | 0        |          | -0,16    |           |       |

**Tabela 5.9 – Segundo estudo de caso com 9 máquinas lentas e 1 máquina rápida (fazendo uso da média como máquina de referência).**

|                 | Máquina1          | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|-----------------|-------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade (Si) | 200               | 200                         | 200      | 200        | 200                | 200                         | 200      | 200      | 200      | 700       | 250   |
| Carga (wi)fast  | 0,8               | 0,8                         | 0,8      | 0,8        | 0,8                | 0,8                         | 0,8      | 0,8      | 0,8      | 2,8       | _     |
| Carga (wi)slow  | 1,25              | 1,25                        | 1,25     | 1,25       | 1,25               | 1,25                        | 1,25     | 1,25     | 1,25     | 0,357     | _     |
| Média fast      | Desvio PadrãoFast | Desvio Padrão Absoluto fast | -        | Média Slow | Desvio Padrão Slow | Desvio Padrão Absoluto Slow | H3_fast  | -        | H4_slow  | -         | -     |
| 1               | 0,632             | 0,36                        |          | 1,16       | 0,282              | 0,16                        | 0        |          | -0,16    |           |       |

**Tabela 5.10 – Terceiro estudo de caso com 10 máquinas de velocidades diferentes e com um alto grau de heterogeneidade (fazendo uso da média como máquina de referência).**

|                 | Máquina1           | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade (Si) | 100                | 200                         | 300      | 400        | 500                | 600                         | 700      | 800      | 900      | 1000      | 550   |
| Carga (wi) fast | 0,1818             | 0,3636                      | 0,5454   | 0,7272     | 0,9090             | 1,0909                      | 1,2727   | 1,4545   | 1,6363   | 1,8181    | _     |
| Carga (wi) slow | 5,5                | 2,75                        | 1,83     | 1,375      | 1,1                | 0,9166                      | 0,7857   | 0,6875   | 0,611    | 0,55      | _     |
| Média fast      | Desvio Padrão fast | Desvio Padrão Absoluto Fast | -        | Média Slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | -        | H4_slow  | -         | -     |
| 1               | 0,55               | 0,4545                      |          | 1,61       | 1,525              | 1,05                        | 0        |          | -0,61    |           |       |

**Tabela 5.11 – Quarto estudo de caso com 10 máquinas diferentes onde as velocidades são aleatórias (fazendo uso da média como máquina de referência).**

|                 | Máquina1           | Máquina 2                   | Máquina 3 | Máquina 4  | Máquina5           | Máquina 6                   | Máquina7 | Máquina 8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|-----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|-----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade (Si) | 540                | 760                         | 210       | 115        | 700                | 150                         | 930      | 300       | 425      | 66        | 419.6 |
| Carga (wi) fast | 1,286              | 1,81                        | 0,50      | 0,27       | 1,67               | 0,36                        | 2,22     | 0,71      | 1,01     | 0,16      | _     |
| Carga (wi) slow | 0,77               | 0,55                        | 1,998     | 3,65       | 0,60               | 2,80                        | 0,451    | 1,40      | 0,99     | 6,36      | _     |
| Média fast      | Desvio Padrão Fast | Desvio Padrão Absoluto fast | -         | Média slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | -         | H4_slow  | -         | -     |
| 1               | 0,72               | 0,60                        |           | 1,96       | 1,87               | 1,40                        | 0        |           | -0,96    |           |       |

**Tabela 5.12– Primeiro estudo de caso com 9 máquinas rápidas e 1 máquina lenta (fazendo uso da mediana como máquina de referência).**

|                | Máquina1           | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|----------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade(Si) | 700                | 700                         | 700      | 700        | 700                | 700                         | 700      | 700      | 700      | 200       | 650   |
| Carga (wi)fast | 1                  | 1                           | 1        | 1          | 1                  | 1                           | 1        | 1        | 1        | 0,29      | _     |
| Carga(wi)slow  | 1                  | 1                           | 1        | 1          | 1                  | 1                           | 1        | 1        | 1        | 3,5       | _     |
| Média Fast     | Desvio Padrão Fast | Desvio Padrão Absoluto fast | -        | Média slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | -        | H4_slow  | -         | -     |
| 0,93           | 0,23               | 0,13                        |          | 1,25       | 0,80               | 0,45                        | 0,07     |          | -0,25    |           |       |

**Tabela 5.13 – Segundo estudo de caso com 9 máquinas lentas e 1 máquina rápida (fazendo uso da mediana como máquina de referência).**

|                 | Máquina1          | Máquina 2                   | Máquina 3 | Máquina 4  | Máquina5           | Máquina 6                   | Máquina 7 | Máquina 8 | Máquina 9 | Máquina1 0 | Média |
|-----------------|-------------------|-----------------------------|-----------|------------|--------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|
| Velocidade (Si) | 200               | 200                         | 200       | 200        | 200                | 200                         | 200       | 200       | 200       | 700        | 250   |
| Carga (wi)fast  | 1                 | 1                           | 1         | 1          | 1                  | 1                           | 1         | 1         | 1         | 3,5        | _     |
| Carga (wi)slow  | 1                 | 1                           | 1         | 1          | 1                  | 1                           | 1         | 1         | 1         | 0,29       | _     |
| Média fast      | Desvio PadrãoFast | Desvio Padrão Absoluto fast | -         | Média Slow | Desvio Padrão Slow | Desvio Padrão Absoluto Slow | H3_fast   | -         | H4_slow   | -          | -     |
| 1,25            | 0,8               | 0,45                        |           | 0,93       | 0,23               | 0,13                        | -0,25     |           | 0,07      |            |       |

**Tabela 5.14 – Terceiro estudo de caso com 10 máquinas de velocidades diferentes e com um alto grau de heterogeneidade (fazendo uso da mediana como máquina de referência).**

|                 | Máquina1           | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade (Si) | 100                | 200                         | 300      | 400        | 500                | 600                         | 700      | 800      | 900      | 1000      | 550   |
| Carga (wi) fast | 0,1818             | 0,3636                      | 0,5454   | 0,7272     | 0,9090             | 1,0909                      | 1,2727   | 1,4545   | 1,6363   | 1,1818    | —     |
| Carga (wi) slow | 5,5                | 2,75                        | 1,83     | 1,375      | 1,1                | 0,9166                      | 0,7857   | 0,6875   | 0,611    | 0,55      | —     |
| Média fast      | Desvio Padrão fast | Desvio Padrão Absoluto Fast | —        | Média slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | —        | H4_slow  | —         | —     |
| 1               | 0,55               | 0,4545                      |          | 1,61       | 1,525              | 1,05                        | 0        |          | -0,61    |           |       |

**Tabela 5.15 – Quarto estudo de caso com 10 máquinas diferentes onde as velocidades são aleatórias (fazendo uso da mediana como máquina de referência).**

|                 | Máquina1           | Máquina2                    | Máquina3 | Máquina4   | Máquina5           | Máquina6                    | Máquina7 | Máquina8 | Máquina9 | Máquina10 | Média |
|-----------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------|--------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------|-------|
| Velocidade (Si) | 540                | 760                         | 210      | 115        | 700                | 150                         | 930      | 300      | 425      | 66        | 419,6 |
| Carga (wi) fast | 1,49               | 2,10                        | 0,58     | 0,32       | 1,93               | 0,41                        | 2,57     | 0,83     | 1,17     | 0,18      | —     |
| Carga (wi) slow | 0,67               | 0,48                        | 1,73     | 3,15       | 0,52               | 2,42                        | 0,39     | 1,21     | 0,85     | 5,5       | —     |
| Média fast      | Desvio Padrão Fast | Desvio Padrão Absoluto fast | —        | Média slow | Desvio Padrão slow | Desvio Padrão Absoluto slow | H3_fast  | —        | H4_slow  | —         | —     |
| 1,6             | 0,83               | 0,69                        |          | 1,69       | 1,62               | 1,21                        | -0,16    |          | -0,69    |           |       |

Uma vez que esses estudos mostraram-se inadequados, optou-se por utilizar uma outra métrica.

A métrica a ser utilizada neste trabalho é simples e busca averiguar a dispersão das máquinas em torno de um padrão, como efetuado em (Zhang & Yan, 1995) e (Grosu, 1996), mas procurando-se uma referência mais adequada que substitua a máquina mais rápida e a máquina mais lenta. Essa nova referência leva em consideração as distâncias das máquinas que compõem o sistema para a nova máquina padrão.

#### 5.4.1 Modelo para obtenção do grau de heterogeneidade

Sendo tomado como padrão uma máquina padrão virtual<sup>6</sup>, verificou-se que o uso do desvio padrão absoluto (que corresponde à distância média entre as potências computacionais das máquinas para a máquina padrão), observado com

<sup>6</sup> Entende-se por *máquina padrão virtual* a máquina que possui a velocidade média dentre as máquinas que compõe o sistema a ser avaliado.

relação à máquina padrão, leva à obtenção de um grau de heterogeneidade adequado para os propósitos deste trabalho.

Assim, o grau de heterogeneidade/homogeneidade de um dado sistema pode ser obtido a partir de:

$$\frac{\sum_{i=1}^n W_{(M_i)}}{n}$$

**Equação 5.11**

A utilização da velocidade média como padrão, leva a adoção de uma máquina padrão virtual, ajustada automática e dinamicamente para cada conjunto, contemplando assim as variações ocorridas quando são inseridas mais máquinas (sejam elas com velocidades altas ou com velocidades baixas) (Branco et al, 2003a; Branco et al, 2003c).

Isso é exatamente o que não ocorre com as métricas propostas anteriormente já que consideram sempre a máquina de velocidade mais baixa ou mais alta, restringindo a flexibilidade do padrão e, conseqüentemente, o ajuste correto do grau de heterogeneidade. Os estudos de casos que seguem visam elucidar a métrica proposta neste trabalho em comparação às já apresentadas anteriormente.

As figuras 5.5 a 5.7 apresentam os mesmos estudos de caso apresentados anteriormente acrescentados da nova métrica proposta neste trabalho.

**Tabela 5.16- Potência computacional das máquinas é iniciada em 1 e então gradualmente decrementada.**

| * | $W_{(M1)}$ | $W_{(M2)}$ | $W_{(M3)}$ | $W_{(M4)}$ | $W_{(M5)}$ | $W_{(M6)}$ | $W_{(M7)}$ | $W_{(M8)}$ | $W_{(M9)}$ | $W_{(M10)}$ | H <sub>1</sub> | H <sub>2</sub> | H <sub>3</sub> | H <sub>4</sub> | GH    |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| 1 | 1          | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.03           | 0.018          | 0.09           | 0.01           | 0.019 |
| 2 | 1          | 0.75       | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.06           | 0.029          | 0.105          | 0.161          | 0.036 |
| 3 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.1            | 0.068          | 0.13           | 0.24           | 0.06  |
| 4 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.14           | 0.111          | 0.165          | 0.321          | 0.061 |
| 5 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.19           | 0.158          | 0.215          | 0.452          | 0.062 |
| 6 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.23           | 0.194          | 0.27           | 0.46           | 0.06  |
| 7 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.27           | 0.225          | 0.34           | 0.54           | 0.07  |
| 8 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.15       | 0.9        | 0.9         | 0.3            | 0.25           | 0.41           | 0.64           | 0.12  |
| 9 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.15       | 0.1        | 0.9         | 0.31           | 0.26           | 0.49           | 0.67           | 0.18  |

\* Configuração

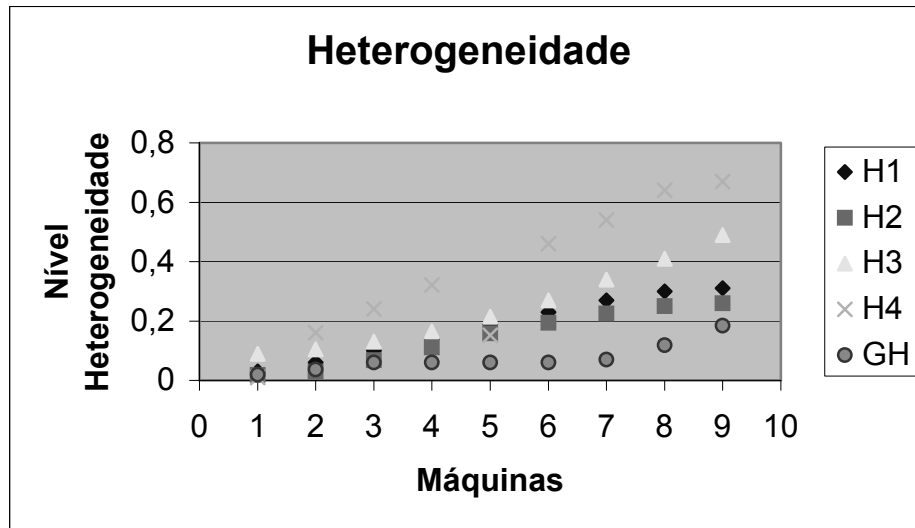


Figura 5.6 – Grau de heterogeneidade quando todas as potências computacionais estão próximas de 1.

A figura 5.6 mostra quando a maioria das potências computacionais das máquinas tende a 1 todas as métricas são satisfatórias, por exemplo, o grau de heterogeneidade aumenta conforme aumenta a variação das potências computacionais.

Tabela 5.17 – Todas as potências computacionais das máquinas são iniciadas distantes do valor da potência computacional da máquina mais rápida e são então gradualmente incrementadas, mas ainda mantendo uma distância da máquina mais rápida.

| * | $W_{(M1)}$ | $W_{(M2)}$ | $W_{(M3)}$ | $W_{(M4)}$ | $W_{(M5)}$ | $W_{(M6)}$ | $W_{(M7)}$ | $W_{(M8)}$ | $W_{(M9)}$ | $W_{(M10)}$ | H <sub>1</sub> | H <sub>2</sub> | H <sub>3</sub> | H <sub>4</sub> | GH    |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| 1 | 1          | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.15           | 0.09           | 0.45           | 0.05           | 0.011 |
| 2 | 1          | 0.75       | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.16           | 0.12           | 0.425          | 0.084          | 0.012 |
| 3 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.17           | 0.13           | 0.41           | 0.107          | 0.051 |
| 4 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.17           | 0.12           | 0.405          | 0.116          | 0.115 |
| 5 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.17           | 0.13           | 0.415          | 0.271          | 0.122 |
| 6 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.19           | 0.14           | 0.43           | 0.333          | 0.133 |
| 7 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.21           | 0.15           | 0.46           | 0.474          | 0.153 |
| 8 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.15       | 0.5        | 0.5         | 0.25           | 0.18           | 0.49           | 0.614          | 0.184 |
| 9 | 1          | 0.75       | 0.65       | 0.55       | 0.4        | 0.35       | 0.25       | 0.15       | 0.1        | 0.5         | 0.28           | 0.22           | 0.53           | 0.664          | 0.225 |

\* Configuração

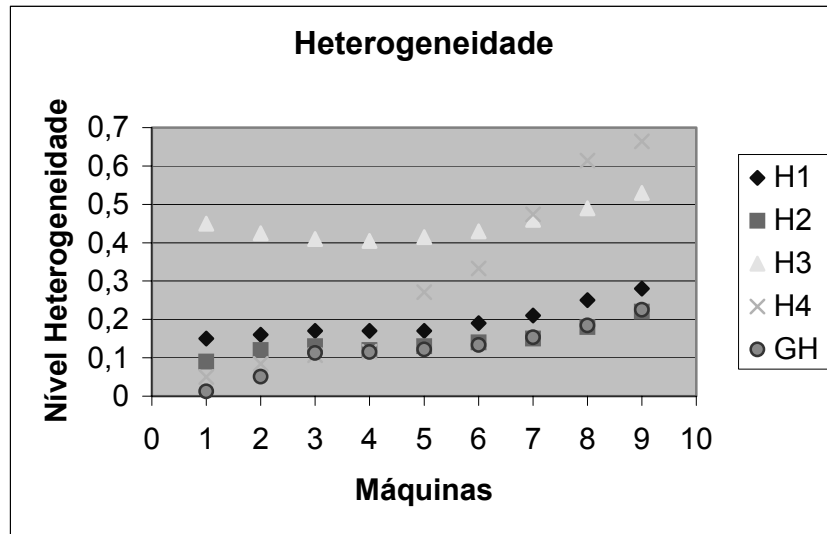


Figura 5.7 – Grau de Heterogeneidade quando todas as potências computacionais das máquinas estão distantes de 1.

Para este caso, em que as máquinas distam de 1, o grau de heterogeneidade também se comporta de forma adequada, representando a heterogeneidade do sistema.

Tabela 5.18 – A configuração das máquinas leva a uma situação onde metade das máquinas possui potência computacional abaixo da média e metade das máquinas possui potência computacional acima dessa média. Dois casos diferentes são também apresentados nesta tabela: uma máquina com potência computacional alta e todas as outras com potência computacional baixa, e uma com potência computacional baixa e todas as outras com potência computacional alta.

| * | $W_{(M1)}$ | $W_{(M2)}$ | $W_{(M3)}$ | $W_{(M4)}$ | $W_{(M5)}$ | $W_{(M6)}$ | $W_{(M7)}$ | $W_{(M8)}$ | $W_{(M9)}$ | $W_{(M10)}$ | H <sub>1</sub> | H <sub>2</sub> | H <sub>3</sub> | H <sub>4</sub> | GH    |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| 1 | 1          | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9        | 0.9         | 0.16           | 0.09           | 0.45           | 0.05           | 0.019 |
| 2 | 1          | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.16           | 0.09           | 0.05           | 0.45           | 0.112 |
| 3 | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5         | 0.26           | 0.25           | 0.25           | 0.25           | 0.127 |
| 4 | 1          | 1          | 1          | 1          | 1          | 0.3        | 0.3        | 0.3        | 0.3        | 0.3         | 0.37           | 0.35           | 0.35           | 0.35           | 0.172 |

\* Configuração



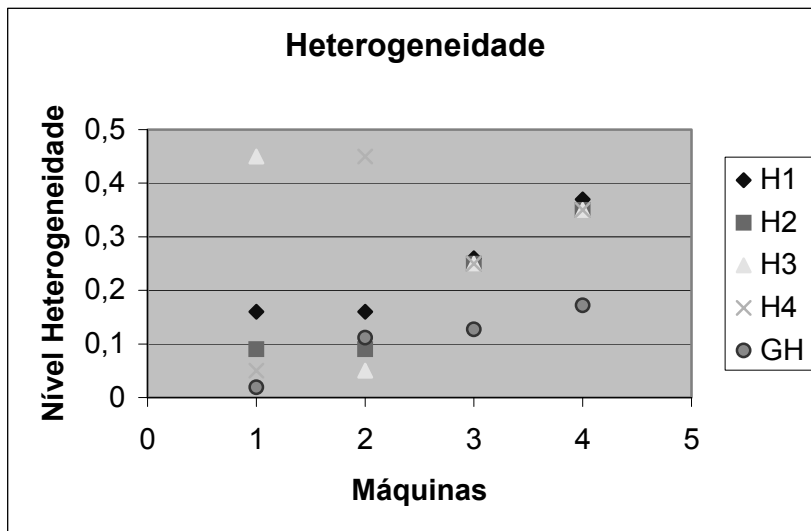
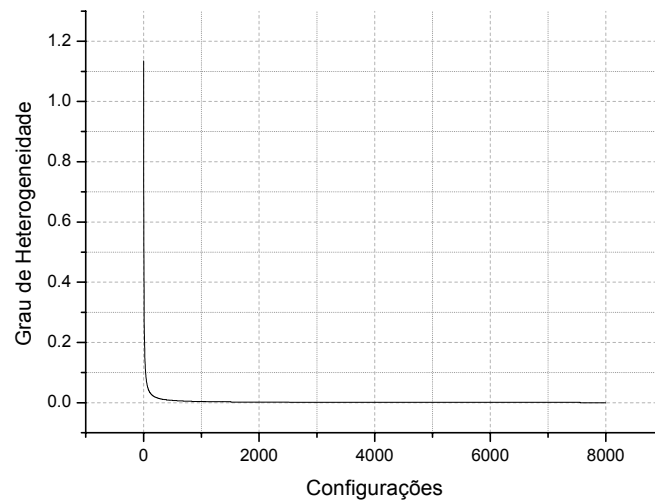


Figura 5.8 – Grau de heterogeneidade onde quatro situações distintas são impostas.

Em contraposição aos graus H<sub>3</sub> e H<sub>4</sub>, o grau de heterogeneidade aqui proposto produz bons resultados em todos os estudos de caso realizados, vindo ao encontro do desejado.

#### 5.4.2 Comportamento do Modelo

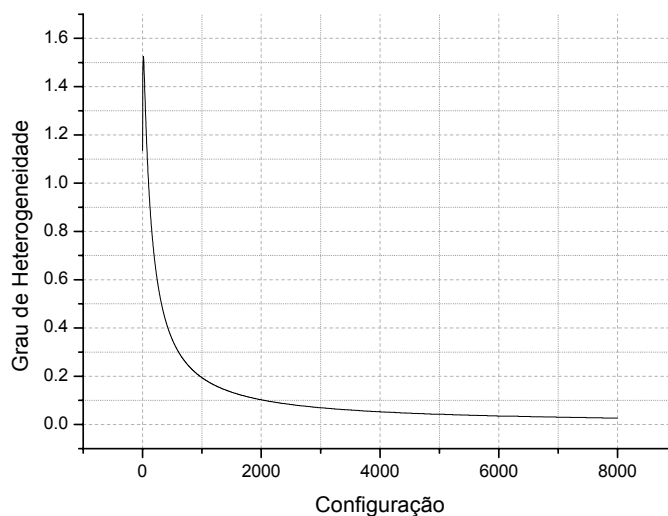
Para representar o comportamento do modelo introduzido foram executados alguns testes. O primeiro é composto inicialmente por três máquinas com velocidades distintas e iguais a 10, 100 e 1000, e uma a uma são acrescentadas máquinas idênticas às máquinas de maior velocidade. Inicialmente, na primeira configuração o grau de heterogeneidade é alto (1,18), e à medida que se vai incluindo mais máquinas idênticas à máquina mais veloz, esse grau de heterogeneidade tende a zero, como apresentado na Figura 5.9.



**Figura 5.9 – Comportamento do grau de heterogeneidade quando inseridas máquinas idênticas à máquina mais rápida do sistema (velocidades iniciais iguais a 10, 100 e 1000).**

O comportamento do grau de heterogeneidade é coerente, pois à medida que máquinas semelhantes e com alta velocidade são inseridas o grau de heterogeneidade do sistema cai. Esse tipo de sistema é contemplado de forma coerente pela métrica proposta por Zhang (Zhang & Yan, 1995), entretanto, não é contemplado pela métrica de Grosu (Grosu, 1996). Isso ocorre justamente pela influência na seleção do padrão (como já apresentados nas tabelas de 5.4 a 5.7).

No segundo estudo, a configuração inicial é novamente de três máquinas sendo as velocidades de 10, 100 e 1000, e uma a uma são inseridas máquinas idênticas à máquina mais lenta do sistema. O grau de heterogeneidade inicial é exatamente idêntico ao do estudo anterior (1,18), entretanto o comportamento deste é diferente quando ocorre a inserção gradativa das máquinas, ilustrando o impacto da heterogeneidade do sistema levando em consideração as grandes diferenças de velocidade existente entre as máquinas, Figura 5.10.



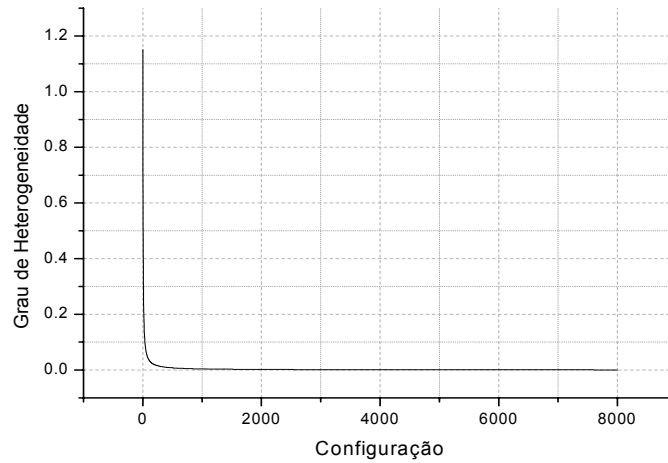
**Figura 5.10 – Comportamento do grau de heterogeneidade quando inseridas máquinas idênticas à máquina mais lenta do sistema (velocidades iniciais iguais a 10, 100, e 1000).**

Quando inseridas máquinas idênticas à máquina mais lenta do sistema o comportamento do grau de heterogeneidade, segundo a métrica proposta, mostra que até um certo número de máquinas inseridas, o impacto de retirá-las do sistema a fim de que esse sistema se torne homogêneo é pequeno. Mostra ainda que a partir de um certo número de máquinas, mesmo que essas máquinas sejam máquinas idênticas à máquina mais lenta do sistema, o impacto de retirá-las do sistema é grande (uma vez que a soma da potência computacional dessas máquinas mais lentas sobrepõem-se às máquinas mais rápidas), podendo acarretar variações no desempenho do mesmo.

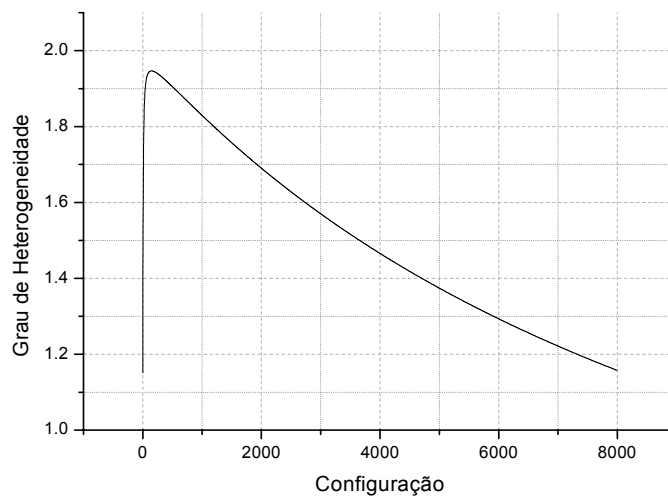
De modo análogo ao anterior, esse tipo de sistema é contemplado pela métrica de Grosu (Grosu, 1996), mas não pela métrica de Zhang (Zhang & Yan, 1995).

Repetindo-se os dois estudos anteriormente descritos, alterando-se apenas a configuração inicial das velocidades das máquinas para 10, 10000 e 100000, tem-se para a inserção de máquinas idênticas à mais rápida e, posteriormente, máquinas idênticas à mais lenta, comportamentos similares aos apresentados nas figuras 5.9 e 5.10, alterando-se apenas os valores dos índices e o número de máquinas

necessárias, para alterar a possibilidade de descarte, como pode ser observado nas figura 5.11 e 5.12.



**Figura 5.11 - Comportamento do grau de heterogeneidade quando inseridas máquinas idênticas à máquina mais rápida do sistema (velocidades iniciais iguais a 10, 10000 e 100000).**



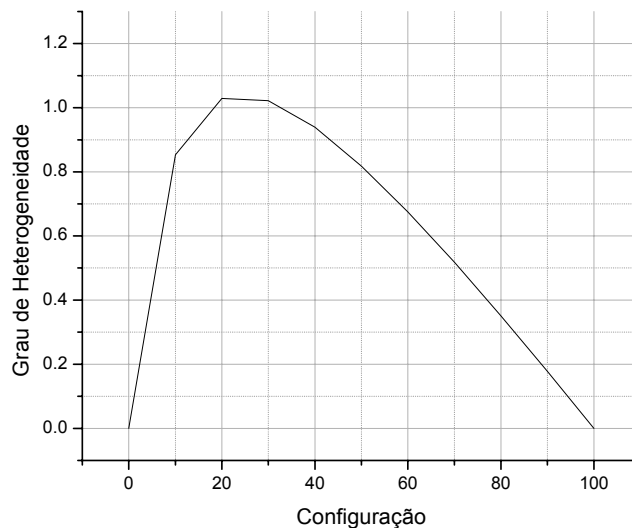
**Figura 5.12 - Comportamento do grau de heterogeneidade quando inseridas máquinas idênticas à máquina mais lenta do sistema (velocidades iniciais iguais a 10, 10000, e 100000).**

Outro estudo de caso realizado buscou averiguar o comportamento do grau de heterogeneidade obtido pela métrica proposta quando o sistema é iniciado com uma determinada capacidade de processamento (em termos de velocidade total de processamento) e essa capacidade de processamento é mantida, alterando-se

simplesmente a configuração das máquinas. Isto é, a soma das potências computacionais tomadas em termos da velocidade é mantida constante durante todo o experimento.

A primeira configuração é composta de nenhuma máquina de velocidade igual a 10 e 10 máquinas de velocidade iguais a 100, de modo a ter uma velocidade total de 1000. Mudanças sucessivas são efetuadas nas configurações de modo a ter 10 máquinas de 10 e 99 máquinas de 100, até atingir 100 máquinas de 10 e nenhuma máquina de 100.

O comportamento da métrica é apresentado na Figura 5.13:

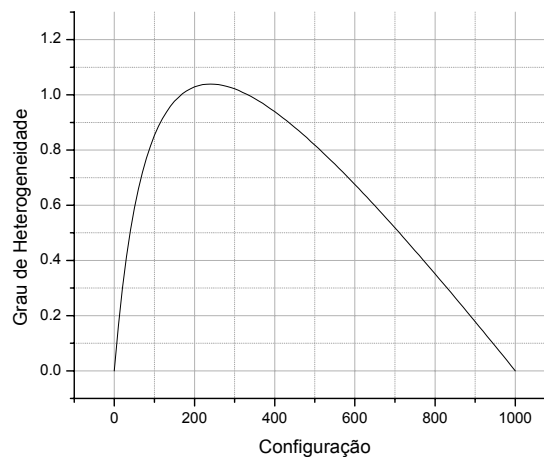


**Figura 5.13 - Comportamento do grau de heterogeneidade quando inseridas máquinas de baixa e alta velocidades no sistema de modo a manter a mesma velocidade total do sistema apenas alterando a quantidade de máquinas de alta e baixa velocidade (configuração inicial igual a 0 máquinas de velocidade igual 10 e 10 máquinas de velocidades iguais a 100).**

O gráfico mostra que o grau de heterogeneidade varia de acordo com a presença de máquinas com velocidades idênticas ou com velocidades distintas, refletindo o quanto essas máquinas distam de um padrão e qual a influência do sistema ser constituído de um número maior de máquinas lentas ou máquinas rápidas, em relação ao conceito de heterogeneidade.

Diferentemente, as métricas anteriormente propostas e apresentadas na literatura (Zhang & Yang, 1995) (Grosu, 1996) apresentam valores conflitantes, alguns complementares para configurações que deveriam apresentar mesmo grau de heterogeneidade.

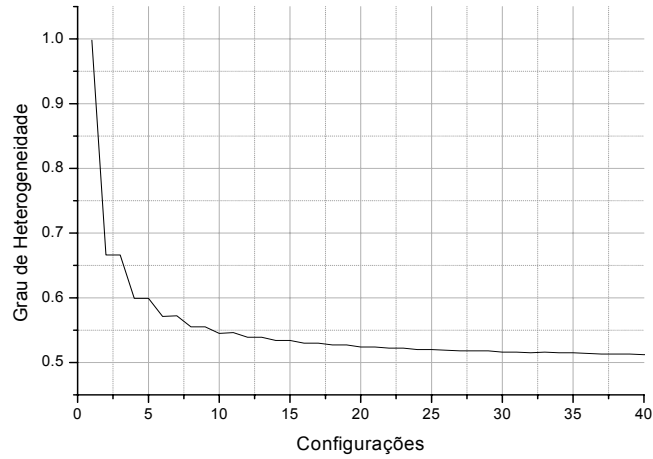
A figura 5.14 representa o mesmo experimento realizado anteriormente só que com 0 máquinas de velocidade igual a 10 e 100 máquinas de velocidades iguais a 100 e, assim por diante, até se ter 1000 máquinas com velocidades iguais a 10 e 0 máquinas com velocidades igual a 100 ( o pico de heterogeneidade equivale a cerca de 200 a 300 máquinas).



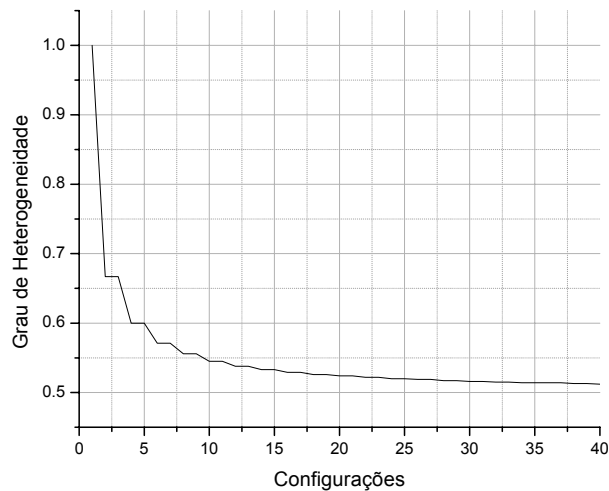
**Figura 5.14 - Comportamento do grau de heterogeneidade quando inseridas máquinas de baixa e alta velocidades no sistema de modo a manter a mesma velocidade total do sistema apenas alterando a quantidade de máquinas de alta e baixa velocidade (configuração inicial igual a 0 máquinas de velocidade igual 10 e 100 máquinas de velocidades iguais a 100).**

Dois estudos adicionais foram executados, tomando-se como configurações iniciais, no primeiro caso, duas máquinas, uma com velocidade 1 e outra com velocidade 1000, e no segundo caso uma com velocidade 1 e outra com velocidade 10000. A partir dessa configuração inicial dividiu-se a velocidade da máquina mais rápida pelo número de máquinas existentes, e esse valor foi inserido como uma nova máquina; a cada passo sempre mais uma máquina é inserida, de modo que se consiga chegar a um sistema heterogêneo que apresente no primeiro caso, 1000 máquinas distando entre si de uma unidade de velocidade e, no segundo caso, 1000

máquinas distando entre si de dez unidades de velocidade. Esses experimentos são apresentados nas figuras 5.15 e 5.16.



**Figura 5.15 - Comportamento do grau de heterogeneidade quando inseridas máquinas com velocidades intermediárias no sistema, até que a inserção atinja valores de velocidades que distem de uma unidade entre uma máquina e outra (configuração inicial sendo uma máquina de velocidade 1 e uma máquina de velocidade 1000).**



**Figura 5.16 - Comportamento do grau de heterogeneidade quando inseridas máquinas com velocidades intermediárias no sistema, até que a inserção atinja valores de velocidades que distem de dez unidades entre uma máquina e outra (configuração inicial sendo de uma máquina com velocidade 1 e uma máquina com velocidade 10000).**

Com esse experimento consegue-se observar que a média das máquinas em qualquer das situações permanece praticamente a mesma, mesmo com configurações diferentes e número de máquinas diferentes. Isto demonstra que à medida em que a distância média entre as máquinas diminui o grau de heterogeneidade também diminui, até atingir-se um grau de heterogeneidade igual a 0,5.

Esse comportamento não pode ser observado nas demais métricas (Zhang & Yan, 1995) (Grosu, 1996), uma vez que a máquina tida como padrão não é flexível e sim fixada como sendo a máquina mais rápida no primeiro caso e a máquina mais lenta no segundo.

### **5.5 Novos Estudos de Caso**

Existem sistemas caracterizados pela variedade de arquiteturas de CPU, diferentes velocidades de execução, diferentes sistemas operacionais, diferentes recursos de entrada e saída, diferentes capacidade de armazenamento, diferentes meios de interconexão.

O objetivo principal dos experimentos é delimitar quando um sistema pode ser considerado homogêneo, parcialmente homogêneo ou heterogêneo. Para isso aliou-se o grau de heterogeneidade do sistema, as relações de tempo de resposta quando um mesmo sistema heterogêneo é tratado de forma homogênea e de forma heterogênea diante da maneira que os processos são escalonados.

Foi considerado um sistema heterogêneo o qual foi tratado como homogêneo (efetuando-se simplesmente uma distribuição das cargas de modo round-robin (Tanenbaum, 1997), posteriormente o mesmo sistema foi devidamente tratado como heterogêneo (atribuindo pesos na distribuição de acordo com a velocidade de cada máquina) conforme dados apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18.



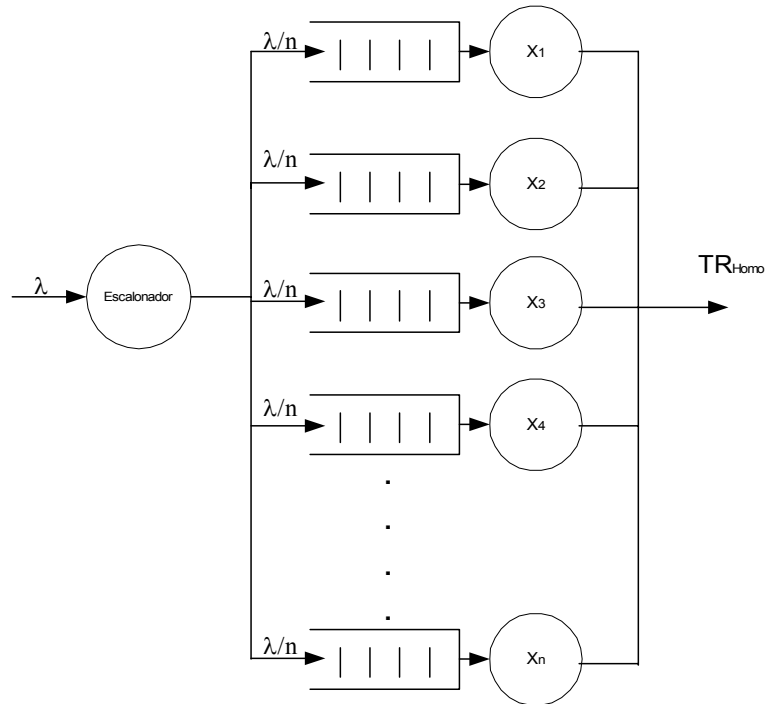


Figura 5.17 – Modelo de filas para sistema composto por máquinas heterogêneas tratado pelo escalonador como se fosse homogêneo.

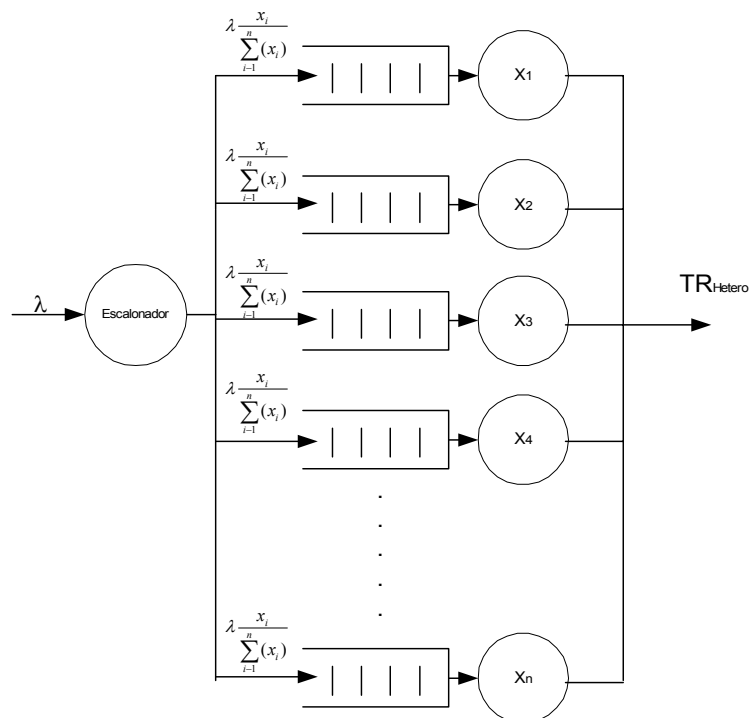


Figura 5.18 – Modelo de filas para sistema composto por máquinas heterogêneas tratado pelo escalonador como se fosse heterogêneo.

Em ambos os modelos,  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , correspondem às velocidades das máquinas,  $n$  ao número de máquinas que compõem o sistema,  $\lambda$  ao número de aplicações que chegam para ser escalonadas,  $TR_{\text{Homo}}$  e  $TR_{\text{Hetero}}$  aos tempos de resposta do sistema tratado como homogêneo e heterogêneo respectivamente.

## **5.6 Resultados**

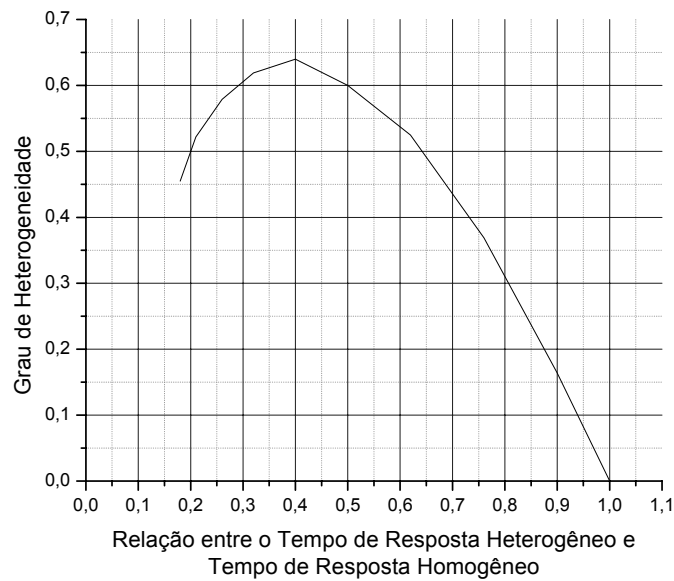
Supondo-se que as aplicações a serem distribuídas são todas homogêneas e interativas, utilizou-se o tempo de resposta para se avaliar o desempenho do sistema. O tempo de resposta foi utilizado porque é uma medida de quantidade fixa de acordo com a configuração do sistema.

Assim, em todos os estudos de caso considerados, foi obtido o grau de heterogeneidade, segundo a métrica definida na seção anterior e os tempos de resposta do sistema tratado ora como homogêneo, ora como heterogêneo, para cada configuração.

No primeiro estudo realizado buscou-se averiguar qual o comportamento do grau de heterogeneidade em relação ao tempo de resposta heterogêneo e homogêneo, quando se inicia o sistema com dez máquinas de velocidades idênticas à 100 e posteriormente as velocidades das máquinas são alteradas de forma gradativa, mantendo-se, entretanto, o número de máquinas inalterado. Sendo assim, as configurações partem de dez máquinas de mesma velocidade (100) e segue com nove máquinas de velocidade 100 e uma de velocidade 200, oito máquinas de velocidade igual a 100, uma de velocidade 200 e uma de velocidade 300, e assim sucessivamente até que se obtenha 10 máquinas com velocidades distintas de 100 a 1000, obtendo-se um sistema heterogêneo.

O comportamento observado é apresentado na Figura 5.19.

Na figura 5.19 pode-se notar que o grau de heterogeneidade inicia no valor de 0 e à medida que esse valor cresce, a relação entre os tempos de resposta heterogêneo e homogêneo decresce. Isso ilustra a possível perda de desempenho acarretada por um sistema que, apesar de ser heterogêneo é tratado como homogêneo.



**Figura 5.19 - Grau de heterogeneidade em relação ao Tempo de resposta heterogêneo/homogêneo, sendo as configurações alternadas de 10 máquinas de velocidades idênticas para 10 máquinas de velocidades distintas, substituindo as máquinas de modo a acrescer o valor das velocidades.**

Pode-se observar que, quando o sistema é tratado como homogêneo (mas é heterogêneo), o tempo de resposta total do sistema é sempre dado pelo tempo de resposta da máquina mais lenta, ao passo que, quando o sistema é tratado como heterogêneo, o tempo de resposta melhora significativamente.

Nas métricas apresentadas na literatura, o comportamento do gráfico para o mesmo conjunto de máquinas apresentado na Figura 5.19 são contraditórios. Para a métricas de Zhang (Zhang & Yan, 1995) o grau de heterogeneidade, assim como na Figura 5.19 aumenta à medida que a relação entre os tempos de resposta heterogêneo e homogêneo decrescem.

Entretanto, para a métrica de Grosu (Grosu, 1996), à medida que o grau de heterogeneidade decresce, a relação entre os tempos de resposta heterogêneo e homogêneo também aumenta, uma vez que as métricas não mantêm uma constância como mostrado em estudos já apresentados.

A métrica proposta neste trabalho permite avaliar de forma semelhante, sistemas que devem ter o mesmo comportamento, uma vez que tem como padrão a máquina média virtual e não a máquina mais rápida ou mais lenta.

Um outro fator interessante do grau de heterogeneidade proposto neste trabalho, é que ele permite demonstrar o impacto não só da heterogeneidade do sistema, mas também se essa heterogeneidade é positiva para o sistema ou negativa. A heterogeneidade é considerada, neste trabalho, como positiva, quando se têm diversas máquinas com velocidades (ou potências computacionais) idênticas e uma máquina com velocidade maior que as demais. Nesse caso, essa máquina melhora o sistema.

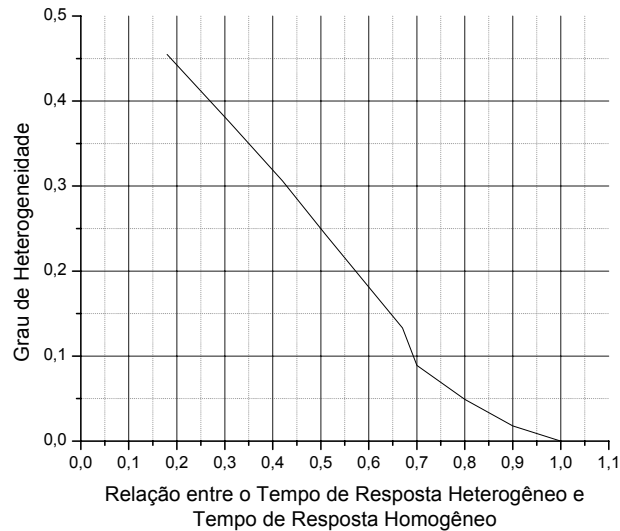
O grau de heterogeneidade do sistema quando tratado como homogêneo ou como heterogêneo é o mesmo, entretanto, a utilização do sistema cai à medida que são inseridas máquinas mais velozes quando o sistema é tratado como homogêneo, sendo heterogêneo, o que implica em uma heterogeneidade negativa.

Isso pode ser observado no gráfico, quando se insere uma máquina de velocidade igual a 200 em um conjunto de máquinas de velocidades iguais a 100; o grau de heterogeneidade sobe, entretanto a perda em tratar o sistema como sendo homogêneo não agrava substancialmente o desempenho do sistema.

Por outro lado, quando o grau de heterogeneidade cresce implica que, para que o sistema possa ser considerado homogêneo, uma ou mais máquinas devem ser retiradas do conjunto. Normalmente as máquinas mais lentas é que devem ser retiradas e mesmo estando elas em uma quantidade razoavelmente grande, dependendo da distância entre as velocidades dessas para as mais rápidas do sistema, a retirada pode implicar em um ganho considerável de desempenho.

Analogamente à Figura 5.19, a Figura 5.20 apresenta o comportamento do grau de heterogeneidade, também em relação aos tempos de execução em ambientes heterogêneos e homogêneos, em uma configuração de máquinas que parte de máquinas que possuem todas as velocidades distintas (partindo de 100 e terminando em 1000) e chega a uma configuração onde todas as máquinas são idênticas à máquina mais rápida do sistema.

A substituição das máquinas é feita partindo-se da máquina mais lenta para a máquina mais rápida, justamente com o intuito de demonstrar o comportamento do grau de heterogeneidade quando da inserção e retirada de máquinas lentas do sistema.



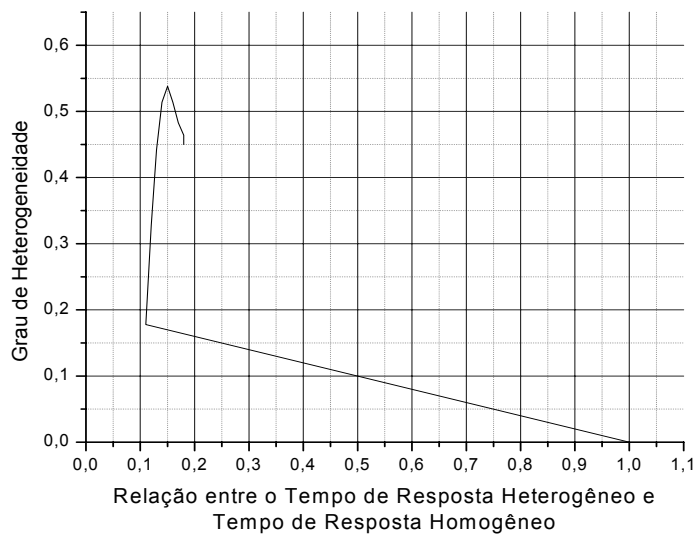
**Figura 5.20 - Grau de heterogeneidade em relação ao Tempo de resposta heterogêneo/homogêneo, sendo as configurações alternadas de 10 máquinas de velocidades idênticas para 10 máquinas de velocidades distintas, substituindo-se as máquinas de menor velocidade.**

Pode-se notar que à medida que o número de máquinas de velocidades mais rápidas vai aumentando, o grau de heterogeneidade diminui, demonstrando que o impacto de se retirar máquinas de menores velocidades não implicaria em queda de desempenho, ao contrário, implicaria em ganho.

À medida que são inseridas máquinas diferentes no sistema, mas que não distam muito da média, tem-se que, conforme o grau de heterogeneidade aumenta, diminui-se a proporção entre os tempos de resposta heterogêneo/homogêneo. Isto indica que tratar um sistema mais heterogêneo como se fosse homogêneo pode acarretar uma grande perda de desempenho (maior que 60% em termos de utilização desse sistema).

De modo análogo, quando o grau de heterogeneidade é baixo, a razão entre os tempos heterogêneo/homogêneo é pequena, implicando uma perda pequena de desempenho.

Os resultados apresentados nas figuras 5.21 e 5.22 vêm, mais uma vez, ao encontro dos valores observados anteriormente e visam alicerçar as conclusões obtidas.



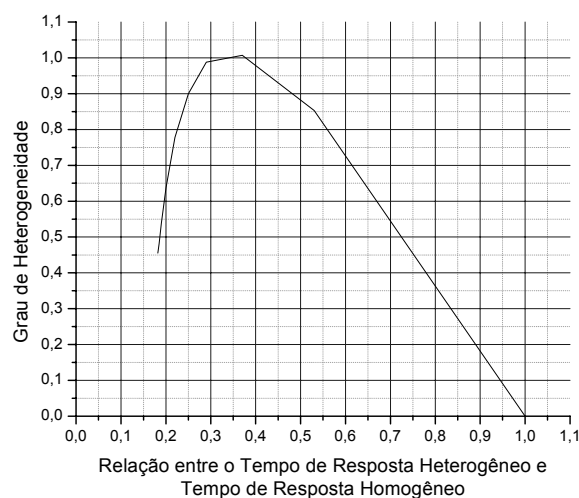
**Figura 5.21 - Grau de heterogeneidade em relação ao Tempo de resposta heterogêneo/homogêneo, sendo as configurações alternadas de 10 máquinas de velocidades idênticas para 10 máquinas de velocidades distintas, substituindo-se as máquinas uma a uma por máquinas muito lentas, partindo-se da mais lenta.**

No exemplo apresentado na figura 5.21 a configuração inicial é composta por 10 máquinas de velocidades iguais a 1000 e, em seguida, a configuração é alterada para nove máquinas de velocidade 1000 e uma máquina de velocidade igual a 100. Sucessivamente a configuração é alterada até que se obtenha um conjunto de máquinas com velocidades distintas que variam de 100 a 1000.

Observa-se que ao inserir uma máquina mais lenta no sistema o grau de heterogeneidade não é aumentado sensivelmente, entretanto, a relação entre os tempos de heterogêneo/homogêneo é diminuída consideravelmente, implicando em uma grande perda de desempenho caso o sistema seja tratado como homogêneo.

Essa heterogeneidade pode, dessa maneira, ser vista como negativa, uma vez que se a máquina mais lenta fosse suprimida o sistema poderia ser tratado (e passaria a ser) como homogêneo (Branco et al, 2003c).

Já na figura 5.22, a configuração inicia-se em 10 máquinas de velocidades iguais a 100, e uma a uma as máquinas são substituídas por máquinas de velocidades mais altas, partindo-se da mais alta para a mais baixa, até que se obtenha uma configuração de máquinas distintas que variam de 10 a 1000.



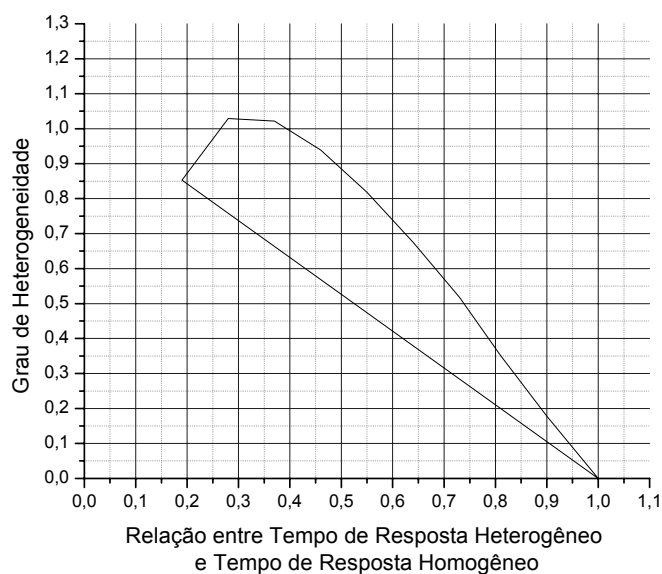
**Figura 5.22 - Grau de heterogeneidade em relação ao Tempo de resposta heterogêneo/homogêneo, sendo as configurações alternadas de 10 máquinas de velocidades idênticas para 10 máquinas de velocidades distintas, substituindo-se as máquinas de menor velocidade.**

Pode-se então notar que, da mesma forma que no exemplo anterior, à medida que o número de máquinas de velocidades mais rápidas vai aumentando o grau de heterogeneidade vai diminuindo e demonstra que o impacto em se retirar as máquinas de menores velocidades não implica em queda de desempenho, ao contrário, implica em ganho.

Um outro estudo de caso foi realizado iniciando-se o sistema com uma determinada capacidade de processamento (em termos de velocidade total de processamento) e mantendo-se essa capacidade de processamento, entretanto, alterando-se não só a configuração das máquinas, mas também o número de máquinas existentes no sistema. A primeira configuração é composta de nenhuma

máquina de velocidade igual a 10 e 10 máquinas de velocidade iguais a 100, de modo a ter uma velocidade total de 1000. Mudanças sucessivas são efetuadas nas configurações de modo a ter 100 máquinas de velocidade 10 e nenhuma máquina de velocidade 100.

O comportamento dessa relação é apresentado na figura 5.23:



**Figura 5.23 - Representação do comportamento do grau de heterogeneidade de um sistema em relação à proporção Tempo de resposta heterogêneo/Tempo de resposta homogêneo.**

Esse estudo demonstra a possibilidade de se obter do grau de heterogeneidade o impacto dessa heterogeneidade (se positiva ou negativa). Quando se têm dez máquinas de velocidade iguais a 90 e uma máquina com velocidade igual a 100, o grau de heterogeneidade é baixo<sup>7</sup>, pois o impacto causado

<sup>7</sup> O grau de heterogeneidade é baixo levando-se em consideração que a grande maioria das máquinas são iguais. Assim, o impacto causado pela máquina de maior potência computacional pode ser considerado como positivo já que essa máquina vem auxiliar o aumento de desempenho do sistema quando este é tratado como heterogêneo e a distribuição da carga leva em conta esse fato.



por essa máquina é positivo, já que ela vem auxiliar o aumento de desempenho quando o sistema é tratado de forma heterogênea.

De modo análogo, quando se têm dez máquinas de velocidade 10 e nove máquinas de velocidade 100, o que se observa é que, apesar do número de máquinas lentas ser maior, seria melhor, em termos de desempenho, que essas máquinas de velocidade inferior fossem retiradas do sistema, indicando uma heterogeneidade negativa. Isto ocorre porque a utilização dessas máquinas será praticamente nula quando o sistema for tratado como heterogêneo.

Dessa maneira, quando se pensa em distribuição das aplicações através do sistema, têm-se que:

- se o número de processos alocados é pequeno, a utilização das máquinas cai, pois todos os processos são alocadas para as máquinas mais velozes;
- se o número de processos é aumentado, aumenta a utilização das máquinas;
- com o número fixo de processos (alterando-se a mesma configuração das máquinas), chega-se a um estágio em que o fato do sistema ser heterogêneo e o fato dele ser tratado como heterogêneo implica em uma utilização próxima a 100% para o sistema como um todo. A partir desse ponto, a utilização começa a cair, já que as máquinas mais lentas passaram a ser desprezadas pelo sistema quando da alocação das cargas.

Essas características podem ser observadas tanto quando as máquinas a serem inseridas no sistema são em sua maioria máquinas mais lentas ou máquinas mais velozes.

### **5.7 Heterogeneidade Temporal ou Dinâmica**

Todas as políticas de distribuição de carga consideram um subconjunto de recursos do sistema como base para a distribuição da carga. Existem algumas

características principais que dependem da configuração física do sistema distribuído.

- Sistemas que são homogêneos tanto em capacidade quanto em compatibilidade, tendem a concentrar a obtenção da carga em um único recurso, que de acordo com a literatura é considerado suficiente para a obtenção de um índice de carga (Kunz, 1991) (Harchol-Balter & Downey, 1997);
- Sistemas que são homogêneos em termos de compatibilidade de recursos, mas heterogêneos em termos da capacidade dos recursos podem ainda fazer uso somente de valores obtidos de um único recurso para representar a carga, fazendo a normalização apropriada dos valores (por exemplo a DPWP (Araújo, 1999)), o que não quer dizer que a utilização de índices que levem em conta mais de um recurso esteja incorreta ou que não apresente valores melhores que o uso de um único recurso;
- Sistemas puramente heterogêneos, que diferem tanto em capacidade quanto em compatibilidade, tendem a considerar a capacidade de uma máquina através da obtenção de índices que considerem diversos recursos e dessa forma poder-se efetuar a distribuição apropriada da carga.

Diante de tais diferenças com relação à heterogeneidade e da explanação apresentada, pode-se afirmar que além das heterogeneidades arquiteturas e

configuracionais, também existe uma heterogeneidade Temporal<sup>8</sup> ou Dinâmica (Branco et al, 2003a; Branco et al, 2003b). Isto é, em um determinado instante, mesmo considerando máquinas arquiteturalmente e configuracionalmente homogêneas, as cargas e a capacidade momentânea dos recursos as tornam máquinas temporalmente ou dinamicamente heterogêneas.

Analogamente, ambientes heterogêneos podem apresentar uma homogeneidade temporal.

Desse modo, um sistema computacional pode **estar** ou **não estar** heterogêneo (Branco, 2003a). Essas considerações implicam que não somente os requisitos dos processos a serem mapeados para sistema heterogêneos devem ser considerados, mas também sistemas homogêneos podem se beneficiar da obtenção de índices de vários recursos e pelo controle dos tipos de aplicações (mistura de CPU, I/O e memória em qualquer máquina).

Em particular, um processo executando em uma máquina é combinado com as características da mesma, de maneira a produzir um conjunto de recursos disponíveis (ou particularmente disponíveis) perante as demais máquinas do sistema. Assim, mesmo quando as máquinas possuem características e capacidades iniciais iguais, essas capacidades restantes podem ser diferentes.

Como exemplo, podem-se ter 3 máquinas completamente homogêneas onde são alocadas quatro tarefas, dentre as quais 2 são CPU-Bound e 2 são I/O bound. Um índice de carga baseado somente na CPU alocaria cada um dos 2 processos

---

<sup>8</sup> Neste trabalho, diferentemente da Heterogeneidade Temporal utilizada por (Ekemecic et al 1996) que indica a alteração do modo de execução de uma determinada máquina através de instruções de máquinas, a Heterogeneidade Temporal ou Dinâmica aqui apresentada, visa demonstrar que todos os conjuntos de máquinas que compõem um sistema computacional, mesmo que possuam homogeneidade configuracional, arquitetural ou de sistemas operacional, possuem uma heterogeneidade Temporal ou Dinâmica no tocante a capacidade de carga aliada á carga momentânea.

nas 2 primeiras máquinas e os outros dois processos de I/O na terceira máquina, enquanto que na realidade pelo menos um dos processo de I/O deveria ser alocado em uma das 2 primeiras máquinas de modo a não sobrecarregar a terceira máquina.

Dessa forma, não somente a CPU se torna um gargalo no tocante à degradação da potência de um recurso, mas também os dispositivos de I/O, memória e rede, tanto em sistemas homogêneos quanto heterogêneos no contexto de capacidade.

Ainda no tocante à heterogeneidade, outra coisa que pode ser observada na prática (e que vem ao encontro dos estudos desenvolvidos) é que em um ambiente heterogêneo, caso existam grandes números de máquinas lentas, e um número reduzido de máquinas rápidas, se as potências das máquinas lentas não for razoável (chegar a atingir um valor limite) mesmo que estas máquinas lentas sejam retiradas (uma vez que sejam ou não a maioria no sistema) o sistema como um todo não será prejudicado (em termos de tempo de resposta) e muitas vezes obtém-se melhor desempenho (Grosu, 1996) (Zhang & Yan, 1995) (Siegel & Ali, 1999).

A obtenção de cargas em ambientes cujos sistemas operacionais não são homogêneos, torna-se ainda mais complexa. Visto sob esse enfoque, pode-se observar que a obtenção de índices de carga, mesmo em ambientes homogêneos, não é tão trivial quanto possa aparentar, uma vez que temporariamente esses recursos são heterogêneos no que concerne à quantidade de carga existente em cada recurso, o que introduz um novo conceito, o de heterogeneidade temporal ou dinâmica, não considerado na literatura existente.

## **5.8 Considerações Finais**

Este capítulo descreveu as principais métricas de heterogeneidade existentes na literatura, buscando avaliar as diferenças entre elas e a real conotação infligida pelos dados obtidos nos respectivos sistemas analisados. Uma nova métrica para obtenção do grau de heterogeneidade baseada na máquina padrão virtual foi proposta e descrita. Além disso, foram apresentadas as restrições dessas métricas com relação à métrica proposta. Essa nova métrica tem como objetivo averiguar a dispersão das máquinas em torno de um padrão virtual.

Os efeitos causados pela escolha adequada de uma métrica para obtenção do grau de heterogeneidade de um sistema computacional distribuído foram examinados. Foi mostrado que, dado o crescente interesse em sistemas distribuídos e a evolução desses sistemas levar à existência de alta heterogeneidade, investigações sobre métricas apropriadas à heterogeneidade devem ser consideradas.

Resultados de pesquisas empíricas foram apresentados em forma de estudos de caso que investigaram a utilidade do uso do grau de heterogeneidade. Apesar dos estudos de caso para validação da métrica focarem como parâmetros a velocidade das máquinas, essa métrica pode assumir diversos parâmetros como tamanho de memória, capacidade de processamento, entre outros, o que a torna mais flexível e genérica que as apresentadas anteriormente na literatura.

Os estudos discutidos neste capítulo proporcionaram ainda a definição de uma Heterogeneidade Temporal ou Dinâmica, observada em sistemas que podem ou não ser configuracional e até mesmo arquiteturalmente homogêneos. O uso dessa heterogeneidade temporal facilitará a confecção de métricas de desempenho que fazem uso de características dinâmicas do sistema. Desse modo, todo sistema computacional distribuído pode ser considerado heterogêneo podendo ou não ter momentos de homogeneidade.

Resultados de pesquisas empíricas foram apresentados na forma de estudos de caso, os quais permitiram investigar o impacto do grau de heterogeneidade em um sistema. Os resultados mais significativos podem ser resumidos como:

- a natureza dos sistemas computacionais distribuídos tratados de maneira homogênea ou heterogênea ocasionam impacto no desempenho do sistema como um todo;
- a natureza dos sistemas distribuídos heterogêneos tem um efeito considerável no escalonamento de processos;
- não somente a configuração física dos recursos que compõem os sistemas devem ser considerados no que diz respeito à

heterogeneidade (heterogeneidade arquitetural e configuracional), mas também a heterogeneidade temporal ou dinâmica deve ser avaliada.

Observa-se que o uso de computação baseada em sistemas computacionais distribuídos heterogêneos tem crescido ao longo das últimas décadas. Isso é compreensível, uma vez que os sistemas modernos têm sua composição variando constantemente uma vez que novas máquinas podem ser acrescentadas, conforme necessário.

Levando-se em conta a complexidade e sobrecarga imposta no mapeamento de tarefas para ambientes heterogêneos, e tendo em vista a inexistência de índices de carga que possibilitem esse mapeamento de forma flexível e confiável, o próximo capítulo apresenta o índice de desempenho, desenvolvido para permitir a alocação de tarefas de maneira mais adequada a ambientes tanto homogêneos quanto heterogêneos.