

# PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DA CAPACIDADE COM ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NA ÁREA DE INFORMÁTICA<sup>1</sup>

Renato de Paula Freitas Pereira<sup>2</sup>  
José Luiz Fernandes<sup>3</sup>  
Leydervan de Souza Xavier<sup>4</sup>

## Resumo

No planejamento da capacidade dos recursos necessários à produção na área de informática utiliza-se a projeção linear do recurso mais consumido no sistema, como por exemplo, o processador, sendo os demais recursos expandidos na mesma proporção. Dessa forma, o planejamento pode resultar em excessos, ou insuficiências, de capacidades nos recursos expandidos por falta de uma modelagem de desempenho do ambiente computacional mais confiável do que intuitivo. No mercado de software, a modelagem de desempenho é restrita a poucos produtos que são fornecidos em pacotes fechados, sem indicação do modelo teórico usado, do grau de incerteza nas previsões ou da confiabilidade nas alternativas resultantes e com altos custos. Assim sendo, a solução adotada segue uma metodologia aberta, baseada na literatura, incluindo modelagem feita com base na Teoria das Filas em conjunto com a Análise de Confiabilidade, via interferência carga-capacidade. As condições iniciais de carga média e nível de confiabilidade são determinadas com o uso do modelo. Projeções das capacidades máximas e níveis de confiabilidade são obtidos alimentando-se o modelo com a carga projetada. Considerando-se as configurações oferecidas na linha do fornecedor, os investimentos necessários, os aumentos de capacidade máxima, as melhorias no tempo de resposta e os níveis de confiabilidade correspondentes, são analisadas as alternativas existentes e feitas recomendações. A metodologia seguida utiliza microcomputador e “softwares” de baixo custo, facilmente encontrados no mercado.

**Palavras-chave:** Planejamento; Capacidade; Informática; Confiabilidade.

## STATISTICAL CAPACITY PLANNING WITH RELIABILITY ANALYSIS IN THE COMPUTER SCIENCE AREA

### Abstract

In the capacity planning of necessary resources to the production in the computer science area, the linear projection of the more consumed resource in the system, for instance, the processor, is being used to expand the other resources in the same proportion. In that way, the planning can result in excesses, or inadequacies, of capacities in the expanded resources by lack of a performance modeling of the computational environment more reliable than intuitive. In the software market, the performance modeling is restricted to the few products that have been supplied in closed packages, without indication of the used theoretical model, the uncertainty degree in the predictions or resulting alternatives reliability and high cost. In this way, the adopted solution follows an open methodology, based on the available literature, including queuing theory modeling joined to reliability analysis, via interference load-capacity. The initial conditions, average load and reliability level, are determined using the model. Maximum capacities and reliability levels forecasting are made by feeding the model with projected load. Considering configurations availability, the necessary investments, maximum capacity increases, response time improvements and resulting reliability levels, existing alternatives are analyzed and recommendations done. The methodology followed utilizes low cost desktop system and software, easily found in the market.

**Key words:** Capacity planning; Computer science; Reliability.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Engenheiro Eletricista, M.Sc., Analista de Capacidade, Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação – CEFET-RJ– [renatodepaulaf@yahoo.com.br](mailto:renatodepaulaf@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, D.Sc., Professor Associado, Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação – CEFET-RJ– [jlfernandes@cefet-rj.br](mailto:jlfernandes@cefet-rj.br)

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, D.Sc., Professor Associado, Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação – CEFET-RJ– [xavierls@cefet-rj.br](mailto:xavierls@cefet-rj.br)

## INTRODUÇÃO

O planejamento é a parte do processo de melhoria em que são elaborados os métodos para alcançarem objetivos e permitir atuar de forma pró-ativa, por meio de ações preventivas. Na área computacional, o planejamento de capacidade traduz as necessidades futuras dos clientes em recursos computacionais, a fim de assegurar o contínuo atendimento aos níveis de serviços contratados, sem investimentos antecipados. O objetivo é postergar ao máximo possível os investimentos, para que não haja custos desnecessários. Contudo, este tempo e a confiabilidade no cumprimento dos níveis de serviço devem ser cuidadosamente analisados para que as implementações de recursos adicionais sejam transparentes aos usuários.

Quando o serviço oferecido é um sistema interativo (“on-line”), a qualidade do serviço é percebida em tempo real, medida pelo tempo de resposta do sistema e pela continuidade do serviço para o usuário final. Nesse caso, na medida em que se tenha milhares de usuários simultaneamente conectados a nível nacional, o impacto da insatisfação do usuário pode gerar custos adicionais significativos, além de uma imagem negativa e de difícil recuperação. Dessa forma, o processo de planejamento da capacidade deve ser periódico, validando as previsões feitas para pontos mais distantes através de verificações em períodos menores, reduzindo assim, a incerteza nas previsões iniciais. Devido a este controle, o tempo hábil para a tomada de decisão, contratações e efetivações de ajustes na capacidade necessários se torna mais preciso.

De acordo com o exposto anteriormente, adotou-se uma metodologia de planejamento de capacidade baseada nas propostas por Menascé *et al.*<sup>(1)</sup> e Lazowska *et al.*,<sup>(2)</sup> incluindo-se a análise de capacidade via interferência carga-capacidade.<sup>(3)</sup> A modelagem de performance baseou-se na teoria das filas,<sup>(4)</sup> e a análise de agrupamento (“clustering”), pelo método de K-médias,<sup>(5)</sup> foi utilizada na caracterização da carga, na montagem e calibração do modelo. Para a modelagem de performance o fluxo total de chegada de transações solicitadas ao sistema foi decomposto em canais virtuais, cada um seguindo uma distribuição de Poisson particular.<sup>(6)</sup> Uma vez que não são conhecidas distribuições de frequência *a priori*, para não serem necessárias pressuposições de normalidade, testes não-paramétricos de aderência, dos tipos Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov, são utilizados na análise de confiabilidade.

No objeto de estudo deste trabalho a carga inicial é a de um sistema de grande porte que atende em horário comercial a maior parte do mercado de mutuários no sistema de financiamento da casa própria, e as projeções de seu crescimento são referentes à absorção de pequenas parcelas desconsideráveis do mercado restante. As características da carga descrita e o comportamento do sistema são monitorados e coletados em intervalos de uma hora por um período de três meses.

## A METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE

Nos dias atuais dificilmente uma empresa opera sem o apoio da informática. Em especial, as organizações prestadoras de serviços na área da tecnologia de informação têm grande dependência dos seus recursos de informática e, nesse caso, de tal forma que o planejamento de capacidade passa a ser o desdobramento das estratégias corporativas, que suporta a execução dos seus planos de negócios e o cumprimento das suas metas. Com este objetivo, o seguimento da metodologia de planejamento da capacidade adotada possibilita a disponibilidade dos recursos

considerando a demanda, a capacidade instalada, o prazo de implementação e o nível de confiabilidade resultante.

Qualquer que seja o ramo de atividade da empresa, a atividade de planejamento da capacidade dos seus recursos computacionais deve responder a quatro questões básicas:

- Qual é a capacidade do sistema atualmente instalado e sua confiabilidade?
- Quais são os crescimentos em serviços atuais e em novos serviços?
- Quais são os níveis de serviço contratados com os clientes?
- Qual é a configuração de menor custo capaz de processar, com o nível de confiabilidade adequado, os serviços atuais e futuros dentro dos níveis de serviço requeridos?

Essas respostas devem levar em consideração os planos corporativos, os sistemas de informação, os produtos de hardware e software em uso e os oferecidos no mercado, de forma a gerar configurações alternativas para realimentar o planejamento estratégico da empresa e definir a configuração futura. A metodologia de planejamento adotada pode ser decomposta em oito etapas, como é apresentada na Figura 1. As etapas da metodologia são descritas como se segue:

- 1) *Conhecimento do ambiente de tecnologia de informação (TI)*: a metodologia de planejamento de capacidade começa pelo conhecimento global do ambiente computacional e das diretrizes corporativas da empresa;
- 2) *Caracterização da carga*: parte de uma visão geral das características principais para definir os componentes e parâmetros da carga atual e, em seguida, é feita a modelagem da carga usando os dados coletados com as ferramentas de monitoração do sistema;
- 3) *Calibração do modelo de desempenho*: a carga modelada é usada para parametrizar o modelo de desempenho que é então resolvido analiticamente e cuja solução é comparada com as medidas feitas com as informações monitoradas no próprio sistema. A calibração do modelo normalmente requer várias modificações para ajustar iterativamente a carga e o modelo ao comportamento observado do sistema;
- 4) *Análise de confiabilidade*: pela análise de interferência da carga aplicada ao sistema e sua capacidade máxima obtém-se os níveis de confiabilidade no atendimento aos níveis de serviço contratados;
- 5) *Projeção da carga futura*: a demanda de carga futura é então dimensionada com base nas indicações de crescimento dos atuais e em novos serviços;
- 6) *Modelagem da desempenho futura*: neste passo a carga projetada é aplicada no modelo de performance já calibrado. Dessa forma, é predita a desempenho futura do sistema computacional sob diferentes cenários considerando, por exemplo, expansões da capacidade em partes do sistema, crescimentos da carga e novos níveis de serviço. Desta predição são obtidas várias configurações com capacidades para atender às exigências de carga e de confiabilidade em diferentes níveis;
- 7) *Análise de confiabilidade*: as alternativas de carga e capacidade máxima do sistema são analisadas verificando-se os níveis de confiabilidade no cumprimento dos níveis de serviço atuais e futuros;
- 8) *Configurações alternativas*: em um processo iterativo são identificadas as configurações alternativas com seus respectivos níveis de confiabilidade e investimentos que irão alimentar o processo decisório para a escolha daquela que proporcione a melhor relação custo/benefício, em relação ao atendimento ao cliente.

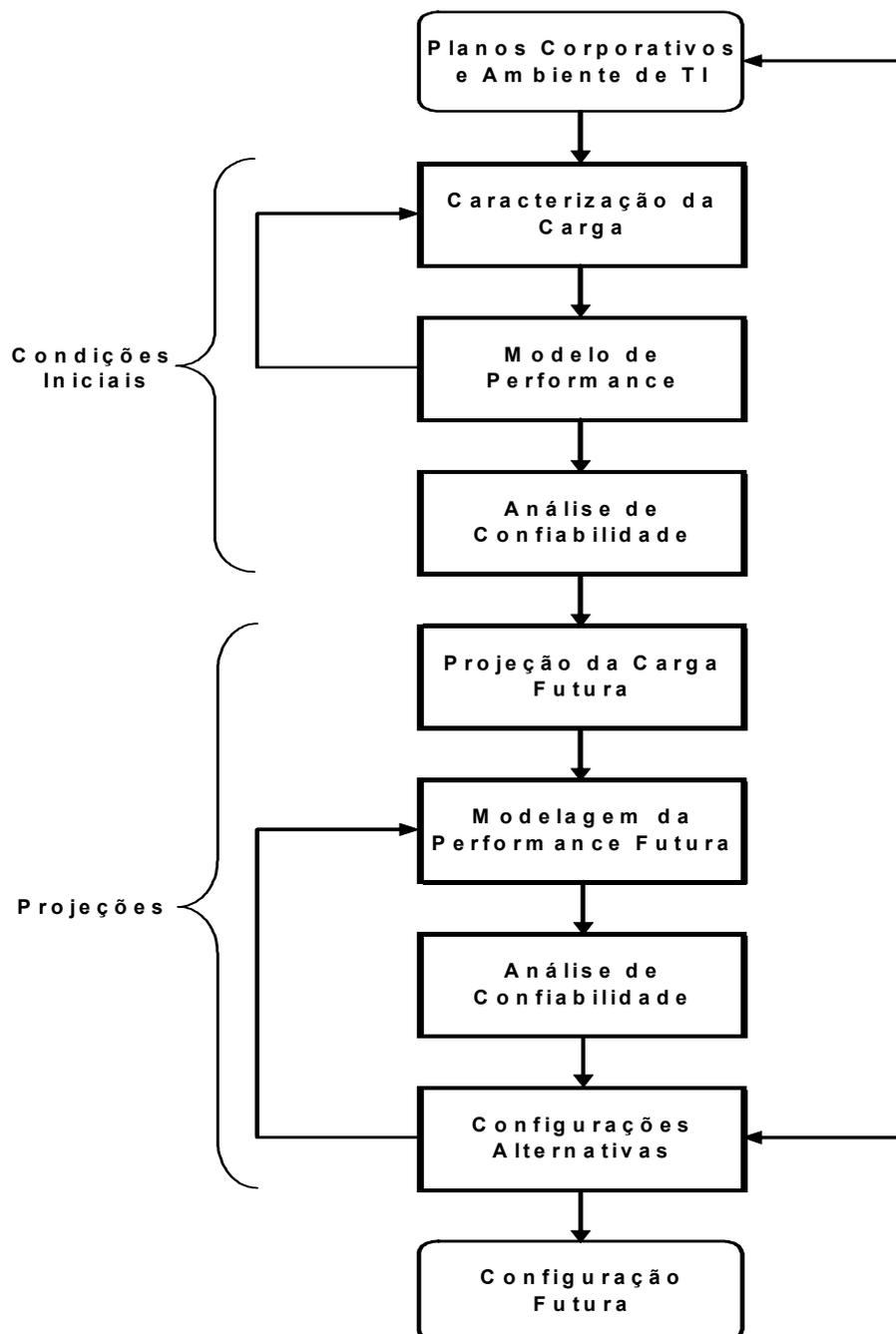


Figura 1. Metodologia de planejamento da capacidade

## CARACTERIZAÇÃO DA CARGA

A caracterização da carga leva em conta o propósito a que se destina. Por exemplo, uma caracterização puramente funcional da carga, descreve o trabalho executado por um serviço ou uma transação sem conter qualquer informação quantitativa. Para fins de planejamento de capacidade, a caracterização deve ser em nível físico, descrevendo os consumos de recursos que têm impacto significativo na desempenho do sistema, com informação quantitativa para aplicar em um modelo analítico.

Segundo Menascé *et al.*,<sup>(4)</sup> o termo “carga de trabalho” significa todas as requisições de processamento submetidas ao sistema pela comunidade de usuários durante algum período de tempo dado.

Para a sua caracterização, o primeiro passo é a identificação dos componentes básicos da carga no sistema de computação em estudo. Um componente básico é uma unidade genérica de trabalho que chega ao sistema, vinda de uma fonte externa. A natureza do serviço prestado pelo sistema determina o tipo de componente básico, nesse caso, uma transação.

Uma vez que os componentes básicos sejam identificados, é necessário definir quais parâmetros caracterizam esses componentes. Tendo em vista um modelo com base na teoria das filas, optou-se pela intensidade da carga caracterizada pela taxa de chegada de usuários.

O próximo passo é a definição das variáveis para a coleta dos dados em intervalos de tempo onde estes são consolidados nas medidas que são armazenadas, este passo inclui também a parametrização dos softwares monitores. Assim, foram coletadas as quantidades de transações chegadas, em fila e tratadas pelo sistema, os valores médios, máximos e mínimos dos tempos de resposta, e de consumo de processador, por tipo de transação, em intervalos de uma hora, por um período de três meses. Na Tabela 1 verifica-se que a amostra coletada ultrapassou 240.000 registros e que os valores de média e variância são incompatíveis com uma distribuição de Poisson.

**Tabela 1.** Tamanho, média e variância da amostra coletada.

<b>Variável</b>	<b>Válidos N</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
TOT_TRAN	243.850	187,2557	701.523,2424

A carga foi decomposta em canais virtuais com distribuições de Poisson que se consolidam em uma única fila de entrada para permitir a determinação do seu parâmetro de intensidade, a taxa de chegada  $\lambda$ . A Figura 2 mostra o processo iterativo de determinação do canal virtual N°1 para sua retirada da base de dados. Na base de dados resultantes é definido o canal virtual N°2, ele é retirado da base de dados, e o procedimento é repetido até o canal N°7.

Para a verificação da aderência à distribuição de Poisson, foram feitos os testes não-paramétricos Qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov nos sete canais virtuais, os resultados alcançados são apresentados na Tabela 2.

Os recursos necessários para a utilização da metodologia adotada, adicionais ao próprio sistema de grande porte em estudo, são os seguintes: sistema microcomputador com processador AMD 1,52GHz, 512MB de RAM; sistema operacional Microsoft Windows; pacote Microsoft Office; programas para análise estatística Statistica e SPSS.

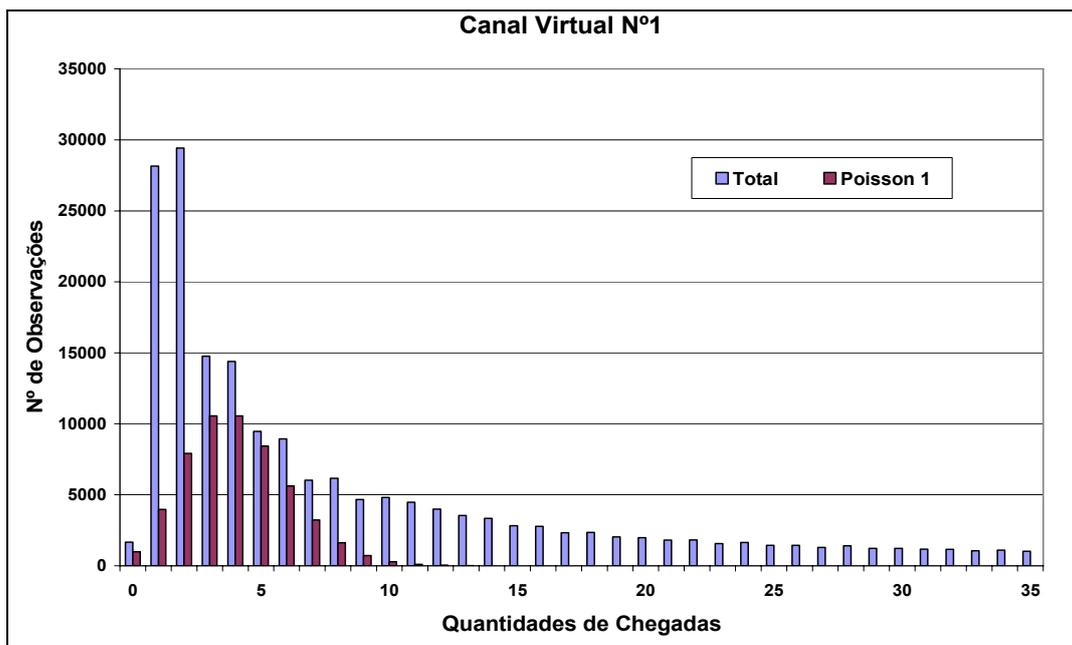


Figura 2. Canal Poisson Nº1 definido dentro da base de dados original.

Tabela 2. Resultados dos testes de aderência à distribuição de Poisson.

Poisson	Kolmogorov-Smirnov			Qui-quadrado		
	n	D <sub>obs</sub>	D <sub>0,05</sub>	gl	χ <sup>2</sup> <sub>obs</sub>	χ <sup>2</sup> <sub>0,05</sub>
1	54000	0,00001	0,00828	12	0,00741	18,3070
2	30000	0,00007	0,01110	23	0,34875	32,6710
3	5000	0,00036	0,02720	7	0,08637	11,0700
4	5000	0,00119	0,02720	18	0,46894	26,2960
5	5000	0,00021	0,02720	26	0,09052	36,4150
6	15000	0,00143	0,01570	38	1,37151	50,9980
7	10000	0,00663	0,01923	28	30,33308	38,8850
Total	124000					

Como se trata de intervalos de uma hora torna-se necessário multiplicar o Lambda total resultante dos canais pela média da quantidade de tipos transações que ocorrem em uma hora e dividir por 3600, para obter-se a taxa de transações por segundo. Utilizando-se o programa Statistica obtém-se o valor médio de 620,1035 tipos de transação por hora. O Lambda total resultante obtido foi de 102,55999 transações por hora e por tipo de transação. O cálculo de Lambda do sistema é feito como se segue:

$$\text{Lambda} = 102,55999 \times 620,1035 / 3600 = 17,6661[\text{transações/s}] \quad (1)$$

## MODELAGEM DO DESEMPENHO

Um modelo é a uma forma de representar artificialmente um sistema real. No caso de computadores, na representação do comportamento em termos de desempenho, são usados modelos que permitam prever os valores de saída, que são as respostas dos sistemas computacionais, a partir dos parâmetros de entrada que descrevem a carga, o software básico e o hardware. As saídas são as medidas de desempenho que demonstram a reação do sistema quando submetido aos parâmetros de entrada. Assim, para estudar as mudanças de comportamento é

construído um modelo de desempenho inicial, que precisa ser calibrado para garantir a representação do sistema com precisão aceitável, antes de provocar variações de parâmetros na entrada do modelo.

O primeiro passo para a montagem do modelo é a construção de um diagrama que descreva os estados em que o sistema pode ser encontrado, de tal forma que, uma vez paralisado, seja possível reiniciar o sistema exatamente do estado em que foi paralisado. Esta tarefa significaria registrar quantos clientes estão no sistema, quanto tempo os clientes que estão sendo atendidos terão ainda de serviço e todos os outros parâmetros que descrevam o comportamento do sistema. No entanto, a tarefa é reduzida por serem assumidas as seguintes premissas simplificadoras:

- Todos os clientes são iguais: não importa qual cliente está presente, mas sim apenas o número de clientes presentes. Esta é a premissa da carga homogênea;
- A história é irrelevante: não importa como o sistema chegou ao estado em que se encontra, ou seja, não interessa o tempo que cada cliente que está sendo atendido já foi servido. Se o sistema for observado antes de um cliente partir e, depois da sua partida, quando outro tiver chegado, não haverá distinção entre estes dois estados. Segundo Clarke e Disney,<sup>(7)</sup> esta é a premissa da falta de memória, que baseia a análise Markoviana. Em uma seqüência dependente de Markov, o conhecimento do presente torna o futuro independente do passado.

Montado o diagrama de estado, como mostrado na Figura 3, as equações de fluxo balanceado são determinadas a partir da condição alcançada quando, após longo tempo o sistema entra em estado estacionário levando em consideração que, em cada estado, o fluxo total é nulo, isto é, o fluxo de entrada no estado é igual ao fluxo de saída deste mesmo estado.

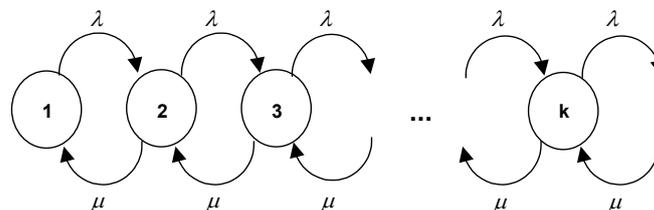


Figura 3. Diagrama de estado para k clientes.

$$\lambda P_{k-1} + \mu P_{k+1} = \lambda P_k + \mu P_k \quad (s^{-1}) \quad (2)$$

Sendo  $\lambda$  e  $\mu$ , respectivamente, as taxas de chegada e de atendimento aos clientes,  $k$  o número de clientes no sistema e  $P_k$  a probabilidade do sistema se encontrar no estado  $k$ . Da equação geral dos fluxos balanceados, que expressa o equilíbrio dos fluxos em estado estacionário, e da equação de conservação da probabilidade total, que é a constatação de que em qualquer instante a soma das probabilidades do sistema ter todos os possíveis estados é sempre um, são deduzidas as expressões das medidas de performance desejadas.

$$Equação \text{ da conservação da probabilidade total } P_0 + P_1 + P_2 + \dots = 1 \quad (3)$$

Por conseguinte, para a resolução do modelo de performance inicialmente é resolvido o sistema de equações (2) e (3) para então resultar o conjunto de equações (4) a (7), no qual são deduzidas das medidas de performance a partir dos parâmetros de entrada  $\lambda$  e  $\mu$ .

$$\text{Utilização} = \lambda / \mu \quad (4)$$

$$\text{Rendimento ("Throughput")} = \mu * \lambda / \mu = \lambda [s^{-1}] \quad (5)$$

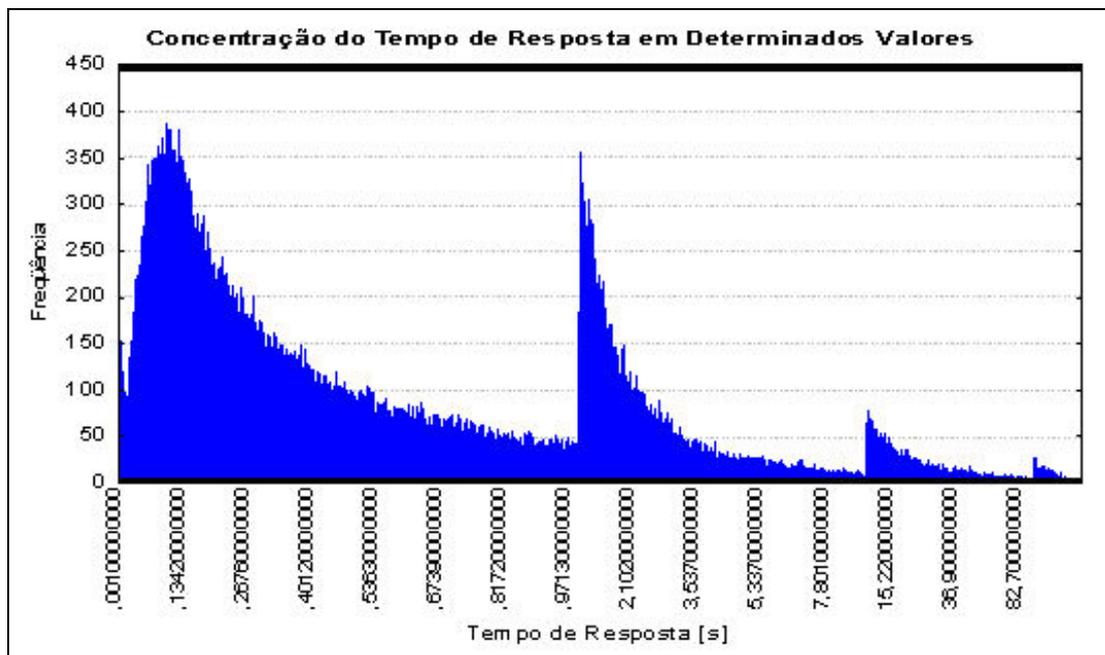
$$\text{Comprimento da fila} = \lambda / (\mu - \lambda) \quad (6)$$

$$\text{Tempo de resposta} = \lambda / (\mu - \lambda) [s] \quad (7)$$

A calibração do modelo é feita comparando as medidas de performance geradas nele com as medidas feitas no próprio sistema, a partir dos mesmos parâmetros de entrada.

Neste trabalho utilizou-se o tempo de resposta para calibrar o modelo ajustando-se a taxa de atendimento  $\mu$ . Assim, em um processo iterativo, a carga é decomposta em classes, para aumentar a representatividade do modelo. Para cada classe, a taxa de atendimento  $\mu$  é ajustada pela calibragem do tempo de resposta. A cada ajuste verifica-se o erro quadrático médio [EQM] total, para então ser adotado o modelo com uma representatividade que apresente o menor desvio da realidade.

A Figura 4 apresenta o gráfico de frequência do tempo de resposta. Observa-se que o sistema operacional realoca mais recursos para os usuários na medida em que o tempo de resposta alcança determinados valores.



**Figura 4.** Tempo de resposta em estágios de alocação de recursos pelo sistema operacional.

Verifica-se que, com a carga decomposta em 16 classes, classificada pelo tempo de resposta, obtém-se um erro de 8,82%, na literatura aceitável até 20%. A taxa de atendimento do sistema  $[\mu_{SIST}]$  é obtida através da computação das demandas de recursos a partir das taxas de atendimento  $[\mu_C]$  e de chegada  $[\lambda_C]$  em cada classe, considerando o número de processadores no sistema (6) e o consumo adicional de recursos pelo próprio sistema operacional (10%). Pela equação (8),  $\mu_{SIST} = 18,0555$  tr/s.

$$\mu_{SIST} = 1 / \sum 1 / (6 \times 1,1 \times \mu_C) \times \lambda_C / \lambda \quad (8)$$

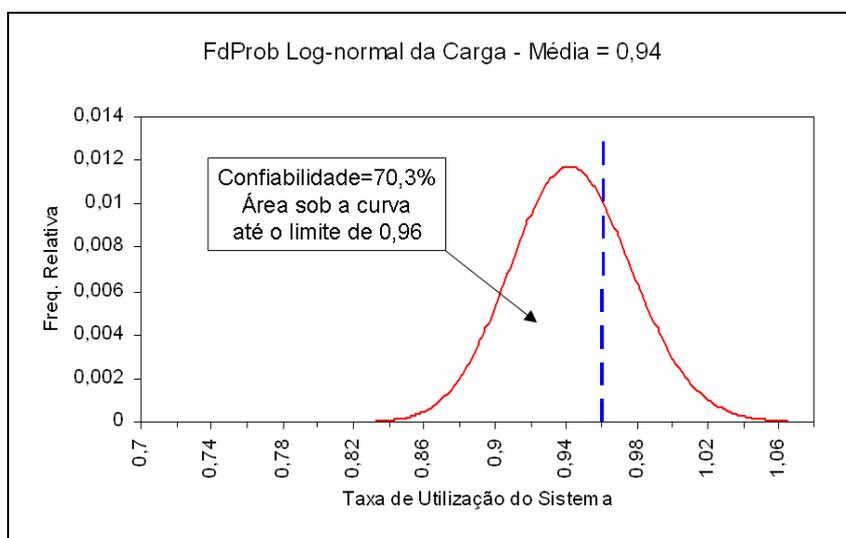
A verificação do ajuste do modelo ao sistema físico é feita através do Índice de Qualidade do Modelo  $[IQ_{MOD}]$  calculado a partir da taxa de utilização média do sistema resultante do modelo  $[\rho_{MEDMOD}]$  e da taxa de utilização média observada  $[\rho_{MEDOBS}]$ .  $IQ_{MOD} = 96,36\%$ .

$$IQ_{MOD} = [ 1 - ( \rho_{MOD} - \rho_{OBS} ) / \rho_{OBS} ] \cdot 100 \quad (9)$$

## ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A análise por interferência carga-capacidade começa pela determinação da distribuição de probabilidade da carga. A taxa de utilização do sistema  $[\rho]$ , ou carga relativa à sua capacidade máxima é obtida do modelo e projetada para além da capacidade máxima. Isto devido a sobrecarga em que o sistema se encontra (carga relativa média=0,94). Sendo o limite operacional do sistema de 0,96, não são observadas cargas acima deste valor pois o sistema se satura. Assim, valores maiores da carga são projetados e reunidos à base de dados originais para compor a distribuição que a carga alcança, pelo método de Lewis.<sup>(3)</sup>

Com a distribuição completa, são feitos testes de aderência observando-se a carga, aproximadamente, distribuída Log-normal. A confiabilidade é então a probabilidade da carga não alcançar 0,96, valor em que o sistema começa a se desequilibrar entrando em saturação, que se obtém calculando-se a área sob a curva da carga até o limite de 0,96. Na Figura 5 verifica-se que a carga, com distribuição Log-normal, nas condições em que se encontra proporciona ao sistema apenas 70,3% de confiabilidade na continuidade da operação.



Com base nas expansões de capacidade disponíveis no mercado, seus respectivos investimentos, efeitos nos demais níveis de serviço e níveis de confiabilidade resultantes, são identificadas as configurações alternativas que são apresentadas à Corporação com recomendações para a tomada de decisões e realimentação ao planejamento estratégico.

## CONCLUSÃO

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho foi baseada em Teoria das Filas e Análise de Confiabilidade para proporcionar ao planejamento da capacidade identificando futuras configurações alternativas, com os respectivos níveis de confiabilidade na continuidade dos serviços, e recomendações, ao gerente que irá decidir no melhor nível da identificação do serviço, considerando, inclusive, as condições de comercialização e os investimentos correspondentes.

Esses recursos requerem um investimento total de, aproximadamente, cinco mil dólares enquanto pacotes para análise de capacidade em sistemas de grande porte requerem investimentos acima de cinquenta mil dólares.

Verifica-se que nas expansões de capacidade disponíveis no mercado (investimentos, efeitos dos níveis de serviço e de confiabilidade), são identificadas as configurações alternativas, demonstradas neste trabalho, que são apresentadas à Empresa como recomendações para a tomada de decisões e realimentação do planejamento estratégico.

## REFERÊNCIAS

- 1 MENASCÉ, DANIEL A.; ALMEIDA, VIRGILIO A.F. e DOWDY, LARRY W.. **Capacity planning and performance modeling; from mainframes to client-server systems**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1994.
- 2 LAZOWSKA, EDWARD D.; ZAHORIAN, JOHN; GRAHAM, G. SCOTT & SEVCIK KENNETH C.. **Quantitative System Performance: Computer System Analysis Using Queueing Network Models**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1984.
- 3 LEWIS, E.E.. **Introduction to Reliability Engineering**, New York, John Wiley & Sons, 1987.
- 4 TRIVEDI, KISHOR S.. **Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications**, 2 ed. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 2001.
- 5 JOHNSON, RICHARD A.; WICHERN, DEAN W.. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 2002.
- 6 WASSERMAN, K.M.; MICHAILIDIS, G.; BAMBOS, N.; Optimal processor allocation to differentiated job flows, *Performance Evaluation: An International Journal*, v.63, n.1, pp.1-14, Jan. 2006.
- 7 CLARKE, A. BRUCE; DISNEY, RALPH L.. **Probabilidade e Processos Estocásticos**. Rio de Janeiro: Ed LTC, 1979.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 MENASCÉ, DANIEL A.; ALMEIDA, VIRGILIO A.F.. **Capacity Planning for Web Performance: Metrics, Models, & Methods**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1998.
- 2 MONTGOMERY, DOUGLAS C.; RUNGER, GEORGE C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro: EdLTC, 2003.