



UNIVERSIDADE SALVADOR – UNIFACS
NÚCLEO DE PESQUISA INTERDEPARTAMENTAL EM REDES DE
COMPUTADORES (NUPERC)
MESTRADO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO

MARCOS PORTNOI

ESTUDO DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA
SIMPLIFICADO DE *CALL CENTER*

Salvador – BA
2004

MARCOS PORTNOI

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA
SIMPLIFICADO DE *CALL CENTER***

Relatório apresentado às cadeiras de Ferramentas de Análise de Desempenho de Sistemas e Análise de Desempenho de Redes no Mestrado em Redes de Computadores, Universidade Salvador – UNIFACS, para avaliação.

Orientador: Prof. José Augusto Suruagy Monteiro

Salvador – BA

2004

SUMÁRIO

1º. ETAPA: Proposta de Sistema para Análise	4
O Sistema	4
Serviços e Respostas	4
Métrica de Desempenho	5
Parâmetros de Carga	5
Parâmetros do Sistema	5
Fatores (Parâmetros a Alterar)	5
Técnica de Avaliação	5
2º. ETAPA: Estudo do Sistema Através de Simulações	6
Modelo de Simulação	6
Recursos	6
Eventos	7
<i>Tokens</i>	7
Resultados	8
3º. ETAPA: Estudo do Sistema Através de Métodos Analíticos	11
Resolução por Teoria de Filas: Redes de Filas M/M/1 na Forma de Produto	11
Estudo através de Projeto Fatorial com Replicações 2^k	15
CONCLUSÕES	18
REFERÊNCIAS	19
ANEXO A: Listagem do Programa em C para SMPL	20
ANEXO B: Resultados das Simulações	26
ANEXO C: Fórmulas da Teoria de Filas (M/M/1)	35

1º. ETAPA: Proposta de Sistema para Análise

O Sistema

O sistema proposto para análise segundo a Teoria de Filas é um pequeno *call center*. Este é composto por três linhas de atendimento (três linhas telefônicas) e está concebido tal que todas as três linhas são primeiramente atendidas por um sistema eletrônico de voz. Após passar por estes sistemas de voz, duas das linhas são então encaminhadas para uma espera forçada que insere um atraso médio de 20 segundos, e são finalmente encaminhadas para o único atendente (telefonista) humano.

A terceira linha de atendimento passa pelo sistema eletrônico de voz e é encaminhada diretamente para a telefonista. Não possui, pois, a espera forçada de 20 segundos médios. Esta modelagem está representada na Figura 1.

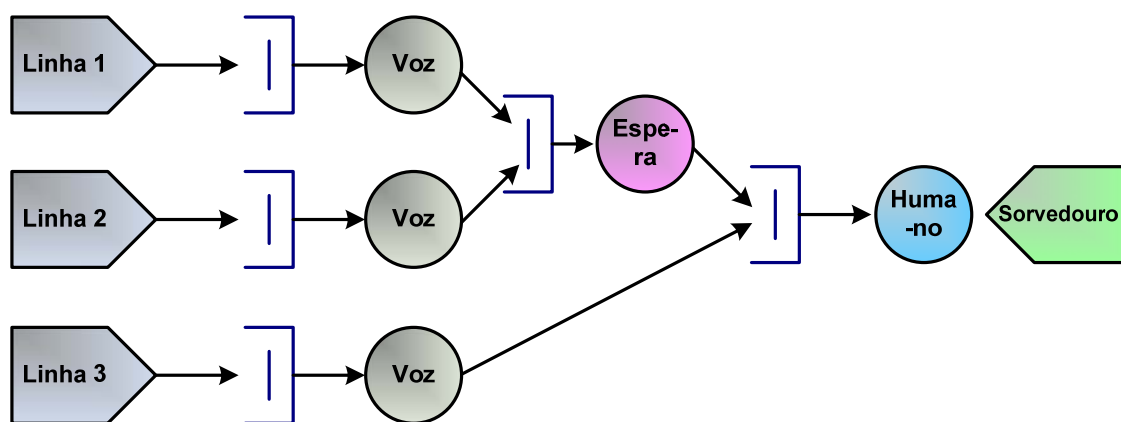


Figura 1: Modelagem do sistema proposto.

Serviços e Respostas

O serviço é o atendimento telefônico de clientes. As respostas possíveis compreendem o “sucesso”, ou ligação atendida pelo operador humano, e “insucesso”, ou ligações que não recebem serviço (ligações não atendidas por “sinal de ocupado” ou ligações interrompidas pelo cliente enquanto estavam no sistema). Neste estudo, a resposta considerada será tão somente “sucesso”.

Métrica de Desempenho

Tempo de espera total, médio, para cada linha de atendimento no *call center* (tempo de resposta). Tamanho máximo de fila (número máximo de ligações em espera) para cada linha de atendimento. Utilização do atendente humano.

Parâmetros de Carga

- Taxa de chegada de ligações (média): 1,5 ligação/minuto em cada linha.

Parâmetros do Sistema

- N. de linhas telefônicas de atendimento: 3.
- Tempo de serviço atendimento eletrônico de voz (média): 25 segundos/ligação. (Obs.: aqui não se considerou a possibilidade de realimentação por parte da carga imediata do sistema; ou seja, o tempo de serviço do atendimento eletrônico de voz, a princípio, não varia conforme a carga imediata do sistema.)
- Tempo de serviço espera forçada (média): 20 segundos/ligação.
- Tempo de serviço atendente humano (média): 10 segundos/ligação.

Os parâmetros de tempo de serviço são médias baseadas na distribuição exponencial, e servirão como valores iniciais para as simulações/cálculos. **Não** serão mantidos constantes.

Fatores (Parâmetros a Alterar)

- Tempo de serviço do atendimento eletrônico de voz (média): de 15 a 30 segundos.
- Tempo de serviço da espera forçada (média): de 15 a 25 segundos.

Técnicas de Avaliação

A avaliação do desempenho do sistema proposto será feita por ferramenta de simulação SMPL (MACDOUGALL, 1987) e de forma analítica.

2º. ETAPA: Estudo do Sistema Através de Simulações

Modelo de Simulação

A Figura 2 traz o modelo a ser usado na simulação, com a identificação dos recursos e eventos.

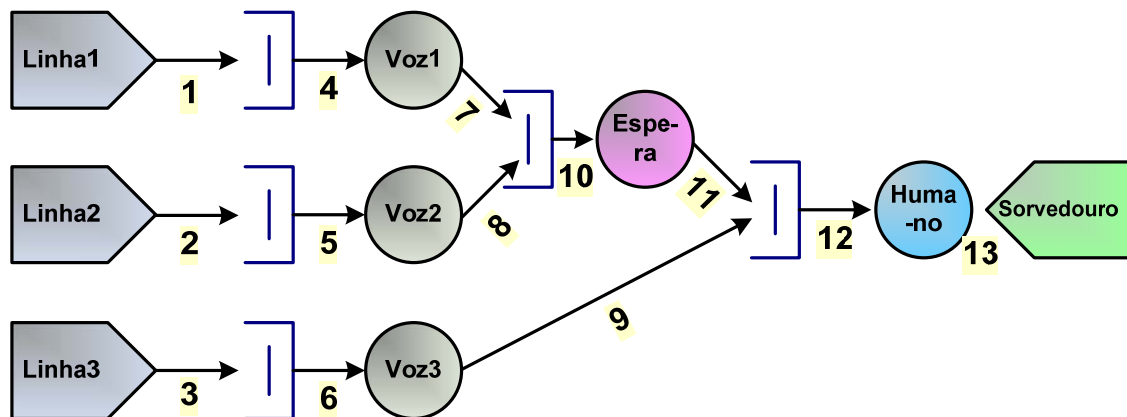


Figura 2: Modelo de Simulação (recursos e eventos).

Recursos

A Tabela 1 relaciona os recursos identificados no modelo de simulação, juntamente com uma breve descrição. Os recursos *Voz1*, *Voz2* e *Voz3* são os atendimentos eletrônicos de voz para cada linha de atendimento; a *Espera* identifica a espera forçada para as linhas de atendimento 1 e 2, e o recurso *Humano* identifica o único atendente humano para as três linhas telefônicas de atendimento.

<i>Nome do Recurso</i>	<i>Descrição</i>
Voz1	Servidor de atendimento eletrônico de voz Voz1;
Voz2	Servidor de atendimento eletrônico de voz Voz2;
Voz3	Servidor de atendimento eletrônico de voz Voz3;
Espera	Servidor de Espera Forçada;
Humano	Atendente Humano.

Tabela 1: Identificação dos Recursos no Modelo de Simulação.

Eventos

Os eventos passíveis de acontecimento no modelo de simulação, numerados na Figura 2, estão relacionados na Tabela 2. O início do ciclo dá-se com os eventos 1, 2 ou 3 (que é a geração de chegadas de ligação) e o fim do ciclo dá-se no evento 13.

Tabela 2: Identificação dos Eventos no Modelo de Simulação.

<i>Evento</i>	<i>Descrição</i>	<i>Ações</i>
1	Chegada de ligação Linha1	Escalonar atendimento no servidor Voz1 (evento 4); Escalonar nova chegada de ligação Linha1 (evento1)
2	Chegada de ligação Linha2	Escalonar atendimento no servidor Voz2 (evento 5); Escalonar nova chegada de ligação Linha2 (evento2)
3	Chegada de ligação Linha3	Escalonar atendimento no servidor Voz3 (evento 6); Escalonar nova chegada de ligação Linha3 (evento3)
4	Solicitação do servidor Voz1	Se servidor de Voz1 estiver livre, escalonar liberação do servidor Voz1 (evento 7) (tempo de serviço do servidor Voz1)
5	Solicitação do servidor Voz2	Se servidor de Voz1 estiver livre, escalonar liberação do servidor Voz2 (evento 8) (tempo de serviço do servidor Voz2)
6	Solicitação do servidor Voz3	Se servidor de Voz1 estiver livre, escalonar liberação do servidor Voz3 (evento 9) (tempo de serviço do servidor Voz3)
7	Liberação do servidor Voz1	Liberar servidor de Voz1; escalonar atendimento no servidor Espera (evento 10)
8	Liberação do Servidor Voz2	Liberar servidor de Voz2; escalonar atendimento no servidor Espera (evento 10)
9	Liberação do Servidor Voz3	Liberar servidor de Voz3; escalonar atendimento no servidor Humano (evento 12)
10	Solicitação do Servidor Espera Forçada	Se servidor Espera Forçada estiver livre, escalonar liberação do servidor Espera (evento 11)
11	Liberação do Servidor Espera Forçada	Liberar servidor Espera Forçada; escalonar atendimento no servidor Humano (evento 12)
12	Solicitação do Servidor Humano	Se servidor Humano estiver livre, escalonar liberação do servidor Humano (evento 13)
13	Liberação do Servidor Humano	Liberar servidor Humano; atualizar estatísticas

Tokens

Os *tokens* representarão as ligações telefônicas que trafegarão pelos servidores e filas do sistema.

Resultados

O ANEXO A contém a listagem do programa confeccionado para simular o modelo proposto do problema, usando a extensão de linguagem SMPL. Este programa gera um relatório de saída contendo diversas estatísticas de desempenho, conforme pode-se ver na Tabela 12.

O ANEXO B traz os resultados de diversas simulações realizadas com diferentes números para os parâmetros do sistema. A seguir, deter-se-á numa análise mais aprofundada de cada grupo de resultados. Para cada conjunto de números definidos nos parâmetros, realizaram-se cinco simulações, mudando-se a semente do gerador de números aleatórios do SMPL (entre os números 1 e 5). Então, calculou-se a média de cada métrica de desempenho obtida, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 90%, usando a distribuição de *Student*. Para dois conjuntos de números nos parâmetros, entretanto, verificou-se ser desnecessário a produção de mais de uma simulação, em vista do desempenho obtido.

A Tabela 11 especifica as cinco simulações realizadas para um tempo de atendimento médio no Atendimento Eletrônico de Voz de 25 segundos e de 20 segundos no servidor de Espera Forçada (valores iniciais). Os tamanhos máximos de fila para o servidor de Espera Forçada, bem como os números de tempo de resposta, indicam que o sistema está com dimensionamento insatisfatório. Na realidade, como se pode observar na Tabela 12 (que está no formato de saída do programa confeccionado para a simulação), os números de taxa de chegada e taxa de serviço no servidor 3 indicam estar o sistema em desequilíbrio. Fez-se necessário escolher outros números para os parâmetros de tempo de serviço, a seguir. Observe-se, também, que o desvio padrão (e, por consequência, o intervalo de confiança) apresenta-se elevado nos resultados da Tabela 11. Isto geralmente é causado por tempos de simulação curtos (onde o sistema ainda não entrou em acomodação, sofrendo influências de valores transitórios, como filas ainda vazias). Não foi este o caso. Aqui, com o sistema em desequilíbrio, a aleatoriedade dos resultados contribuiu fortemente para as estatísticas, como se pode notar nos números significativamente diferentes de tamanhos de fila para a Espera Forçada (usando sementes distintas no simulador).

A Tabela 13 mostra o relatório de saída do programa de simulação para os parâmetros de 30s para o servidor de Atendimento Eletrônico de Voz e 25s para a Espera Forçada (valores máximos para os parâmetros). Novamente, a taxa de chegada e taxa de serviço para o conjunto servidor/fila 3 demonstra estar o sistema em desequilíbrio. Estes números de

parâmetro, portanto, são inadequados e desprezou-se a necessidade de realizar mais simulações com tais números.

Na Tabela 14, os números escolhidos para o Atendimento Eletrônico e Espera Forçada foram, respectivamente, 15 e 25s (valor mínimo para o primeiro parâmetro e máximo para o segundo). Mais uma vez, o conjunto de fila/servidor 3 indica um sistema em desequilíbrio, motivo pelo qual não se realizou as cinco simulações para efeitos de intervalo de confiança. Este resultado, analisado juntamente com o anterior, permite entrever que um tempo de serviço de 25s para a Espera Forçada inviabiliza o sistema, independente do valor do outro parâmetro de Atendimento Eletrônico de Voz.

A fim de adquirir estatísticas para o outro extremo de valores de parâmetros, realizaram-se experimentos com os tempos de Atendimento Eletrônico e Espera forçada em seus mínimos, ou seja, 15 e 15s respectivamente. A Tabela 15 traz os resultados. Os números de tamanho médio de fila (ou número de ligações em espera) para os servidores mostram-se baixos nos servidores de Atendimento Eletrônico, bem como em Espera Forçada e no atendente humano. Os tamanhos máximos de fila são relativamente altos tanto para a Espera Forçada, bem como para o atendente humano, em comparação aos tamanhos máximos para o Atendimento Eletrônico. Os tempos de resposta (ou tempo total de atendimento) para as linhas 1 e 2 são semelhantes (como pode ser previsto, pois os caminhos seguidos por cada uma destas linhas é rigorosamente semelhante em parâmetros de serviço) e o da linha 3, a linha VIP, destaca-se como aproximadamente metade do valor das linhas 1 e 2 (justificando, pois, a denominação desta linha como linha VIP). A utilização do atendente humano, medida em 0,75 ou 75%, como ficou demonstrado em todas as simulações realizadas e que pode ser explicada mais à frente neste trabalho, quando do estudo analítico do modelo, permanece constante, independente dos valores aplicados ao Atendimento Eletrônico e Espera Forçada (e mantendo-se a carga também inalterada).

Conforme demonstraram as simulações com tempo de serviço da Espera Forçada acima de 20s, este parâmetro deve ser mantido abaixo deste valor para que o sistema não atinja o desequilíbrio. Mais um grupo de simulações foi realizado, desta vez com os tempos de Atendimento Eletrônico e Espera Forçada em 30s e 15s, respectivamente (Tabela 16). Apesar do sistema ter-se mantido equilibrado, os números de desempenho mostraram uma piora, particularmente nos tempos de resposta e nos tamanhos médios de fila.

Frente aos números já obtidos de desempenho, decidiu-se por adotar a seguinte estratégia para as próximas simulações, e que servirão de fonte experimental para o estudo analítico, na etapa seguinte deste trabalho: o tempo de serviço do Atendimento Eletrônico tomará dois valores, 25s ou 15s; o tempo de serviço da Espera Forçada limitar-se-á a dois valores, quais sejam, 15s e 18s.

Fez-se as simulações, em grupos de 5, para os parâmetros Atendimento Eletrônico e Espera Forçada conforme segue:

- 25s e 18s, Tabela 17;
- 15s e 18s, Tabela 18;
- 25s e 15s, Tabela 19.

Pela análise destes últimos resultados, bem como as medições para os parâmetros em 15 e 15s, pode-se verificar que, com relação aos *tempos de resposta* das linhas 1 e 2, aparentemente o tempo de serviço da Espera Forçada é o que exerce a maior influência. Para o tempo de resposta da linha 3, o servidor Espera Forçada não deve exercer influência, visto que não participa do caminho percorrido pela linha 3 na rede de filas. Com efeito, o resultado das simulações mostra que a alteração do tempo de serviço da Espera Forçada não traz modificações significativas no tempo de resposta da linha 3, o mesmo não acontecendo para alterações no tempo de serviço do Atendimento Eletrônico. A mudança deste tempo de serviço de 15 para 25s exprime um aumento no tempo de resposta da linha 3 de cerca de 65%.

Os tamanhos máximos de fila medidos nos servidores trazem uma média que pode ser usada para dimensionamento de memória no sistema ou para se ter uma estimativa do número máximo de ligações em espera. O desvio padrão verificado para estas métricas foi mais elevado do que o apresentado nas outras estatísticas colhidas. Na etapa seguinte, a análise experimental permitirá vislumbrar a quantidade de erro experimental contida nestas métricas, de modo a avaliar a viabilidade de se tomar tais números em estudo mais profundo.

De maneira geral, os parâmetros de 15-15s e 25-15s para Atendimento Eletrônico e Espera Forçada, respectivamente, foram os que mostraram melhores resultados no tocante a tempo de resposta para o conjunto de linhas 1, 2 e 3.

3º. ETAPA: Estudo do Sistema Através de Métodos Analíticos

O intuito desta etapa é aplicar as técnicas analíticas ou matemáticas para estudo do sistema, conforme exploradas em (JAIN, 1991). Particularmente, aplicar-se-ão aqui a técnica de redes de filas M/M/1 na forma de produto e projeto fatorial com replicações 2^k .

Resolução por Teoria de Filas: Redes de Filas M/M/1 na Forma de Produto

A topologia do sistema proposto favorece a análise através de grupos de filas do tipo M/M/1, que podem ser trabalhados independente das demais e seus resultados combinados – seja por multiplicação no caso de probabilidades, seja por somatório, no caso de tempos de resposta – de forma a obter o resultado geral.

Três características do sistema permitem realizar a análise na forma de produto de filas M/M/1: (1) o sistema é fechado, sem perdas e está construído em forma de funil, onde cada fila simples M/M/1 desemboca em outra fila também do tipo M/M/1; (2) sendo todas as chegadas baseadas em Poisson, bem como os tempos de serviço de todos os servidores distribuídos exponencialmente, pode-se utilizar a propriedade dos fluxos de Poisson, que garante que as saídas da fila M/M/1 serão iguais às suas taxas de chegada λ (estando o sistema em equilíbrio); (3) pode-se também usar a propriedade dos fluxos de Poisson, onde se verifica que vários fluxos λ_i , combinados, resultam em um fluxo λ que é a soma dos fluxos individuais (ver Figura 3). No caso presente, os fluxos a serem combinados serão as saídas de filas M/M/1 que desembocarão, juntas, em outra fila M/M/1.

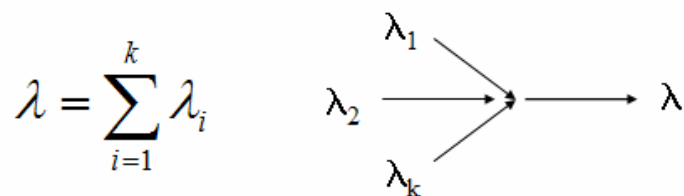


Figura 3: Superposição de fluxos de Poisson (SURUAGY, 2004).

A fim de iniciar a análise, o modelo do sistema foi dividido em 5 blocos de filas individuais do tipo M/M/1, conforme demonstra a Figura 4.

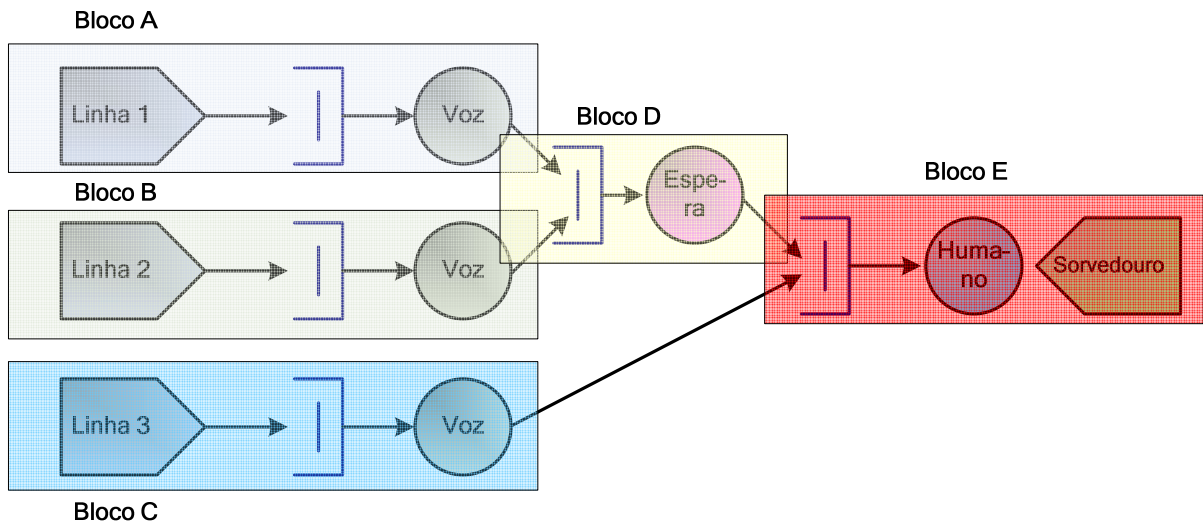


Figura 4: Sistema de Redes de Filas proposto, dividido em 5 blocos de filas M/M/1.

Observar que os Blocos A e B dão saída para o Bloco D. Portanto, a taxa de chegada para a fila M/M/1 do Bloco D será a soma das taxas de chegada dos Blocos A e B (conforme as propriedades descritas anteriormente) (JAIN, 1991). O Bloco E terá como entrada as saídas dos Blocos C e D; por conseguinte, sua taxa de chegada será a soma das taxas de chegada dos Blocos C e D. Aplica-se a cada bloco, individualmente, as fórmulas derivadas da Teoria de Filas para filas M/M/1 (JAIN, 1991), sumarizadas no ANEXO C. Por exemplo, para o Bloco A, com parâmetros de tempo de interchegada de 40s e tempo de serviço de 15s, as medidas de desempenho calculadas pela Teoria de Filas são:

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{40} = 0,025$$

$$\mu = \frac{1}{s} = \frac{1}{15} = 0,067$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 0,375$$

$$\text{Tamanho Médio de Fila} = \frac{\rho^2}{(1-\rho)} = 0,225$$

$$\text{Tempo de Resposta Médio} = \frac{\left(\frac{1}{\lambda}\right)}{(1-\rho)} = 24$$

Para se obter o tempo de resposta médio da linhas 1, 2 e 3, soma-se os tempos de resposta de cada bloco pertencente ao caminho percorrido pela linha até a saída do sistema (sorvedouro). Assim, o tempo de resposta da linha 1 será o somatório dos tempos calculados

para os Blocos A, D e E. Para a linha 2, o somatório dos tempos para os Blocos B, D e E. Finalmente, para a linha 3, o somatório dos tempos de resposta dos Blocos C e E.

A Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 trazem os números de desempenho obtidos através da resolução analítica para as quatro combinações de valores dos dois parâmetros. O tamanho máximo de fila, que a simulação é capaz de estimar, não é calculável pela Teoria de Filas.

Tabela 3: Resolução analítica para Voz 15s, Espera Forçada 15s.

Resolução por Teoria de Filas

Bloco	Tempo Interchegada (segundos)	Tempo Serviço (segundos)	λ (lig/s)	μ (lig/s)	ρ	Tamanho Médio de Fila (ligações)	Tempo Resposta Médio (segundos)
A	40	15	0,025	0,067	0,375	0,225	24
B	40	15	0,025	0,067	0,375	0,225	24
C	40	15	0,025	0,067	0,375	0,225	24
D	(A+B)	15	0,050	0,067	0,750	2,250	60
E	(C+D)	10	0,075	0,100	0,750	2,250	40

Tempo de Resposta Linha 1: 124 s

Tempo de Resposta Linha 2: 124 s

Tempo de Resposta Linha 3: 64 s

Tabela 4: Resolução analítica para Voz 15s, Espera Forçada 18s.

Resolução por Teoria de Filas

Bloco	Tempo Interchegada (segundos)	Tempo Serviço (segundos)	λ (lig/s)	μ (lig/s)	ρ	Tamanho Médio de Fila (ligações)	Tempo Resposta Médio (segundos)
A	40	15	0,025	0,067	0,375	0,225	24
B	40	15	0,025	0,067	0,375	0,225	24
C	40	15	0,025	0,067	0,375	0,225	24
D	(A+B)	18	0,050	0,056	0,900	8,100	180
E	(C+D)	10	0,075	0,100	0,750	2,250	40

Tempo de Resposta Linha 1: 244 s

Tempo de Resposta Linha 2: 244 s

Tempo de Resposta Linha 3: 64 s

Tabela 5: Resolução analítica para Voz 25s, Espera Forçada 15s.

Resolução por Teoria de Filas

Bloco	Tempo Interchegada (segundos)	Tempo Serviço (segundos)	λ (lig/s)	μ (lig/s)	ρ	Tamanho Médio de Fila (ligações)	Tempo Resposta Médio (segundos)
A	40	25	0,025	0,040	0,625	1,042	66,667
B	40	25	0,025	0,040	0,625	1,042	66,667
C	40	25	0,025	0,040	0,625	1,042	66,667
D	(A+B)	15	0,050	0,067	0,750	2,250	60
E	(C+D)	10	0,075	0,100	0,750	2,250	40

Tempo de Resposta Linha 1: 166,667 s

Tempo de Resposta Linha 2: 166,667 s

Tempo de Resposta Linha 3: 106,667 s

Tabela 6: Resolução analítica para Voz 25s, Espera Forçada 18s.

Resolução por Teoria de Filas

Bloco	Tempo Interchegada (segundos)	Tempo Serviço (segundos)	λ (lig/s)	μ (lig/s)	ρ	Tamanho Médio de Fila (ligações)	Tempo Resposta Médio (segundos)
A	40	25	0,025	0,040	0,625	1,042	66,667
B	40	25	0,025	0,040	0,625	1,042	66,667
C	40	25	0,025	0,040	0,625	1,042	66,667
D	(A+B)	18	0,050	0,056	0,900	8,100	180
E	(C+D)	10	0,075	0,100	0,750	2,250	40

Tempo de Resposta Linha 1: 286,667 s

Tempo de Resposta Linha 2: 286,667 s

Tempo de Resposta Linha 3: 106,667 s

Alguns comentários sobre os resultados tornam-se pertinentes. Verifica-se que os valores encontrados estão absolutamente coerentes com os números gerados pela simulação com o SMPL. Ainda, observa-se que a taxa de chegada no Bloco E (Atendente Humano) não muda, independente dos valores de parâmetros adotados. Isso é previsível, pois este bloco é o destino de todos os outros. Sua taxa de chegada é pois a combinação das taxas de chegada dos blocos A, B e C, que nada mais é que o somatório das taxas de chegada de ligações das três linhas de atendimento (parâmetro de carga, que não muda para efeitos de nosso estudo). Assim, a utilização do Atendente Humano será sempre a mesma, pois sua taxa de serviço também não muda. Os resultados das simulações atestam essa conclusão.

A taxa de chegada do Bloco D (Espera Forçada) é constante em 0,05 ligações/segundo. Infere-se que a taxa de serviço do servidor de Espera Forçada tem de ser

menor que 0,05 ligações/segundo, ou 20 segundos/ligação, sob pena de remeter o sistema à instabilidade. Esta mesma dedução foi conquistada na etapa anterior, de estudo através de simulações.

Neste ponto do trabalho, a resolução analítica não oferece mais dados do que os já obtidos pela simulação. A técnica de Projeto Fatorial permitirá tecer mais algumas conclusões acerca do problema.

Estudo através de Projeto Fatorial com Replicações 2^{kr}

A técnica aqui utilizada (JAIN, 1991) pretende obter relações entre os valores dos parâmetros e o nível de influência de cada um desses fatores no desempenho medido. Especificamente, utilizar-se-á o tempo de resposta para a linha 1 (o tempo de resposta da linha 2 é semelhante) e para a linha 3 e os tamanhos máximos de fila dos servidores de Espera Forçada e Atendente Humano. Os experimentos a serem usados são as cinco simulações feitas para cada combinação de valores para os tempos de serviço de Atendimento Eletrônico e Espera Forçada: 15 e 15s; 15 e 18s; 25 e 15s; 25 e 18s. Um total, portanto de $5 \times 4 = 20$ simulações, cujos resultados já foram comentados e estão apresentados no ANEXO B.

Recomenda-se consultar (JAIN, 1991) a fim de checar detalhes a respeito da técnica de projeto fatorial. As seguintes assunções foram tomadas:

- O **Efeito A** será o Atendimento Eletrônico;
- O **Efeito B** será a Espera Forçada;
- O **Efeito AB** será a combinação de ambos efeitos A e B;
- O Efeito A assumirá o valor **-1** para tempo de Atendimento Eletrônico de **15s**, e assumirá o valor **1** para tempo de Atendimento Eletrônico de **25s**;
- O Efeito B assumirá o valor **-1** para tempo de Espera Forçada de **15s**, e assumirá o valor **1** para tempo de Espera Forçada de **18s**.

A Tabela 7 a seguir traz o cálculo para o tempo de resposta da linha 1. As colunas de *Efeitos* especificam todas as combinações possíveis de cada efeito. A coluna *Resposta Estimada* representa uma média das medições obtidas pelas cinco replicações, e que estão indicadas nas colunas *Respostas Medidas*. As colunas *Erros* identificam a diferença entre o valor medido e a resposta estimada para cada replicação. As linhas de *Totais* e *Totais/4* relacionam os valores dos efeitos multiplicados por cada resposta estimada e somados,

conforme (JAIN, 1991). A linha **Totais/4** são os valores dos coeficientes q_0 , q_A , q_B e q_{AB} , que serão usados nos cálculos das variações devidas a A, a B, à combinação de A e B e ao erro experimental. Respectivamente, SSA, SSB, SSAB e SSE. Finalmente cada variação desta será dividida pelo somatório de todas as variações (SST) a fim de se obter o percentual de cada uma sobre o total. Este percentual indicará o percentual de variação explicada, na medida de desempenho em estudo, devido a cada efeito.

Tabela 7: Cálculo da variação nos resultados para Tempo de Resposta Linha 1.

Tempo Resposta Linha 1 (segundos)															
i	Efeitos				Resposta Estimada	Respostas Medidas					Erros				
	I	A	B	AB		y(i,1)	y(i,2)	y(i,3)	y(i,4)	y(i,5)	e(i,1)	e(i,2)	e(i,3)	e(i,4)	e(i,5)
1	1	-1	-1	1	124,486	123,8	125,0	123,8	123,3	126,5	-0,67	0,52	-0,69	-1,19	2,01
2	1	1	-1	-1	168,62	167,4	168,7	169,1	169,5	168,4	-1,22	0,08	0,48	0,88	-0,22
3	1	-1	1	-1	248,62	251,4	272,6	252,9	230,8	235,4	2,78	24	4,28	-17,8	-13,2
4	1	1	1	1	280,786	266,2	285,0	291,8	282,1	278,8	-14,6	4,21	11	1,34	-1,99
Totais	822,512	76,300	236,300	-11,968											
Totais/4	205,628	19,075	59,075	-2,992											
	q0	qA	qB	qAB											
<u>Legenda para os Efeitos:</u>															
A: Atendimento Eletrônico Voz															
B: Espera Forçada															
Voz: -1 para 15s, 1 para 25s															
Espera: -1 para 15s, 1 para 18s															
Variação Explicada:	SSA+	SSB+	SSAB+	SSE	=SST										
	7277,112	69797,113	179,041	1460,175	78713,442										
	9,245%	88,672%	0,227%	1,855%											

Verifica-se que o Efeito B, que é o servidor de Espera Forçada, explica 88,67% da variação do tempo de resposta da linha 1. O tempo de serviço do Atendimento Eletrônico só explica 9,245% da variação. O erro experimental pode ser desprezado para fins do estudo, com 1,855% de influência, bem como a interação entre os dois fatores, de somente 0,227%. Isso permite concluir que o tempo de serviço da Espera Forçada é o parâmetro mais delicado no tocante ao tempo de resposta da linha 1. É desejável, então, se se quer um tempo de resposta o menor possível, que este parâmetro seja fixado em 15s. O estudo para o tempo de resposta da linha 2 é semelhante em valores e resultados ao da linha 1 e dispensa-se a sua realização em separado.

Para o tempo de resposta da linha 3, é possível prever que o tempo de serviço da Espera Forçada praticamente não exerça qualquer influência sobre ele, pois a linha 3 não é servida pela Espera Forçada. Com efeito, sondando-se a Tabela 8, corrobora-se que a Espera Forçada explica tão somente 0,006% da variação do tempo de resposta da linha 3. Praticamente toda a variação das medições feitas são explicadas pelo Atendimento Eletrônico, representando 99,807% da variação. O erro experimental e a interação entre os dois fatores têm influência irrelevante. Assim, para se atingir um tempo de resposta mais baixo para a

linha 3, deve-se ajustar o tempo de serviço do Atendimento Eletrônico para o menor valor (15s), desprezando o valor adotado para a Espera Forçada.

Tabela 8: Cálculo da variação nos resultados para Tempo de Resposta Linha 3.

Tempo Resposta Linha 3 (segundos)																
i	Efeitos				Respostas Estimadas	Respostas Medidas					Erros					
	I	A	B	AB		y(i,1)	y(i,2)	y(i,3)	y(i,4)	y(i,5)	e(i,1)	e(i,2)	e(i,3)	e(i,4)	e(i,5)	
1	1	-1	-1	-1	1	64,434	65,0	64,0	65,0	63,6	64,6	0,58	-0,43	0,53	-0,83	0,17
2	1	1	-1	-1	-1	107,1	107,5	106,6	106,4	107,9	107,1	0,4	-0,5	-0,7	0,8	0
3	1	-1	1	1	-1	64,46	64,8	65,1	63,9	64,0	64,5	0,34	0,64	-0,56	-0,46	0,04
4	1	1	1	1	1	106,44	106,5	103,8	108,1	105,9	107,9	0,06	-2,64	1,66	-0,54	1,46
Totais	342,434	84,646	-0,634	-0,686												
Totais/4	85,609	21,162	-0,159	-0,172												
	q0	qA	qB	qAB												
<u>Legenda para os Efeitos:</u>																
Variação Explicada:		SSA+	SSB+	SSAB+	SSE	=SST	A: Atendimento Eletrônico Voz									
		8956,182	0,502	0,588	16,264	8973,536	B: Espera Forçada									
							Voz: -1 para 15s, 1 para 25s									
							Espera: -1 para 15s, 1 para 18s									
		99,807%	0,006%	0,007%	0,181%											

As próximas análises tratarão do tamanho máximo de fila. A Tabela 9 resume o estudo feito para tamanho máximo de fila no servidor de Espera Forçada. Distingue-se que o tempo de serviço da Espera Forçada é o que mais explica a variação no tamanho máximo de fila, com 80,817%. O erro experimental já não é desprezível, entretanto: 18,685% da variação é pelo erro explicada. Indica-se então cautela ao se utilizar dessa medida de desempenho para manipulação do sistema.

Tabela 9: Cálculo da variação nos resultados para Tamanho Máximo de Fila na Espera Forçada.

Tamanho Máximo de Fila Espera Forçada (ligações)																
i	Efeitos					Respostas Estimadas	Respostas Medidas					Erros				
	I	A	B	AB	y(i,1)		y(i,2)	y(i,3)	y(i,4)	y(i,5)	e(i,1)	e(i,2)	e(i,3)	e(i,4)	e(i,5)	
1	1	-1	-1	-1	1	31,4	28	29	26	30	44	-3,4	-2,4	-5,4	-1,4	12,6
2	1	1	-1	-1	-1	34,8	40	31	37	32	34	5,2	-3,8	2,2	-2,8	-0,8
3	1	-1	1	1	-1	71,4	63	78	94	57	65	-8,4	6,6	22,6	-14,4	-6,4
4	1	1	1	1	1	74,2	56	67	75	86	87	-18,2	-7,2	0,8	11,8	12,8
Totais	211,800	6,200	79,400	-0,600												
Totais/4	52,950	1,550	19,850	-0,150												
	q0	qA	qB	qAB												
<u>Legenda para os Efeitos:</u>																
Variação Explicada:	SSA+	SSB+	SSAB+	SSE	=SST	A: Atendimento Eletrônico Voz										
	48,050	7880,450	0,450	1822,000	9750,950	B: Espera Forçada										
						Voz: -1 para 15s, 1 para 25s										
						Espera: -1 para 15s, 1 para 18s										
	0,493%	80,817%	0,005%	18,685%												

Para o estudo do tamanho máximo de fila do Atendente Humano, os resultados são ainda mais drásticos. Aqui, o erro experimental explica 69,44% da variação nas medições feitas por simulação. Erros dessa magnitude tornam esta medida de desempenho inadequada para análises do sistema proposto além do que já foi feito na etapa de simulação (considerando o número de replicações realizadas). Este resultado sugere que esta métrica em

especial não é influenciada pelos fatores considerados de forma mais acentuada que a própria aleatoriedade dos resultados (ou seja, a aleatoriedade dos resultados tende a exercer maior influência que os fatores manipulados no sistema). Efetivamente, o Atendente Humano não é influenciado nem pelo Atendimento Eletrônico de Voz, nem pela Espera Forçada (Suruagy, 2004).

Tabela 10: Cálculo da variação nos resultados para Tamanho Máximo de Fila Atendente Humano.

Tamanho Máximo de Fila Atendente Humano (ligações)															
i	Efeitos				Respostas Estimadas	Respostas Medidas					Erros				
	I	A	B	AB		y(i,1)	y(i,2)	y(i,3)	y(i,4)	y(i,5)	e(i,1)	e(i,2)	e(i,3)	e(i,4)	e(i,5)
1	1	-1	-1	1	40,8	51	31	45	32	45	10,2	-9,8	4,2	-8,8	4,2
2	1	1	-1	-1	34	34	33	38	35	30	0	-1	4	1	-4
3	1	-1	1	-1	33,4	28	36	33	37	33	-5,4	2,6	-0,4	3,6	-0,4
4	1	1	1	1	33	28	38	33	36	30	-5	5	0	3	-3
Totais	141,200	-7,200	-8,400	6,400											
Totais/4	35,300	-1,800	-2,100	1,600											
	q0	qA	qB	qAB											

Varição Explicada:

SSA+

64,800

9,698%

SSB+

88,200

13,200%

SSAB+

51,200

7,662%

SSE

464,000

69,440%

=SST

668,200

Legenda para os Efeitos:

A: Atendimento Eletrônico Voz

B: Espera Forçada

Voz: -1 para 15s, 1 para 25s

Espera: -1 para 15s, 1 para 18s

CONCLUSÕES

As simulações e os estudos feitos através da técnica de projeto fatorial permitiram prover um bom entendimento da influência dos valores tomados para os parâmetros tempo de serviço nas medidas de desempenho escolhidas. A resolução analítica pela Teoria de Filas, por sua vez, possibilitou validar os resultados das simulações.

Como dedução prática, os estudos consentem a escolha dos valores dos parâmetros, para a obtenção do menor tempo de resposta em todas as linhas de atendimento (dentro a carta de valores previamente estipulados como possíveis), como sendo de 15s para o tempo de serviço do servidor de Atendimento Eletrônico de Voz, e de 15s para o tempo de serviço par ao servidor de Espera Forçada.

REFERÊNCIAS

- JAIN, Raj. **The art of computer systems performance analysis**. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- MACDOUGALL, Myron H. **Simulating computer systems**. The Massachusetts Institute of Technology (MIT) Press, 1987.
- SURUAGY Monteiro, José Augusto. Material de aulas das cadeiras de Ferramentas de Avaliação de Desempenho de Sistemas e Avaliação de Desempenho de Redes do curso de Mestrado em Redes de Computadores, Universidade Salvador – UNIFACS, 2004.

ANEXO A: Listagem do Programa em C para SMPL

O código a seguir, em linguagem C, foi desenvolvido usando da extensão de linguagem para simulação SMPL, conforme descrita em (MACDOUGALL, 1987). O compilador utilizado foi o *Borland C++ BuilderX*¹, para ambiente Windows.

O código original do SMPL sofreu algumas alterações a fim de se adaptar a requerimentos mais atuais. As principais alterações foram:

- A função *time()* foi renomeada para *stime()* nos arquivos *smpl.h* e *smpl.c*, de modo a evitar conflito com funções já reservadas nos compiladores C;
- O tamanho dos parâmetros internos *nl* e *ns* do SMPL foram alterados para 65535 no arquivo *smpl.c*, com vistas a ampliar a capacidade de simulação de mais eventos sem causar estouro de espaço, principalmente em sistemas em desequilíbrio.

A listagem do código está a seguir.

```

/*  Simulação de um Sistema de Call Center
    (para disciplina de Ferramentas de Análise de Desempenho de Sistemas,
    Mestrado em Redes de Computadores, Unifacs 2004)

    2004 by Marcos Portnoi
*/

#include <stdio.h>
#include "smpl.h"
#include <stdlib.h>

#define N_sources 3 //número de fontes no modelo
#define N_facilities 5 //número de facilities no modelo
#define Name_facilities {"Voz1", "Voz2", "Voz3", "Espera", "Humano"}
#define Tau {40, 40, 40} //tempos de interchegada
#define S {25, 25, 25, 18, 10} //tempos de serviço atendimento eletrônico
//de voz, espera forçada e atendente humano
#define Max_time 2600000 //tempo máximo de simulação
#define Max_jobs 1750000 //número máximo de jobs ou clientes a gerar
#define SEED 5 //especifica o stream do gerador de números aleatórios do
//SMPL a usar (1 a 15)

void main()
{
    /*job é o número do token ou cliente; não há diferenciação entre eles
    num_cheg_fila[] é um contador para o número de chegadas por
    fila/facility

```

¹ <http://www.borland.com>

```

    tam_max_fila[] é um acumulador para armazenar o tamanho máximo medido
por fila/facility
    num_job_serv[] é um contador para o número de jobs servidos por
facility
    num_jobs_gerados[] é um contador de jobs gerados por fonte de geração
    name_facility contém o nome de cada facility
    tot_jobs_gerados é o acumulador global de jobs gerados por todas as
fontes
    tx_cheg_fila[] representa o cálculo da taxa de chegada por fila
*/
int job=1, event, server[N_facilities];
int i, num_cheg_fila[N_facilities], tam_max_fila[N_facilities],
num_job_serv[N_facilities];
int num_jobs_gerados[N_sources], tot_jobs_gerados=0;
char name_facility[][10]=Name_facilities, file_out[35]; //file_out ->
nome de saída do arquivo de resultados
float tx_cheg_fila[N_facilities], tau_source[]=Tau, s_server[]=S;
float t_espera_linha1, t_espera_linha2, t_espera_linha3;
FILE *fp;

//inicialização de todos os contadores/acumuladores
for (i=0;i<N_facilities;i++) {
    num_cheg_fila[i]=tam_max_fila[i]=num_job_serv[i]=tx_cheg_fila[i]=0;
}
for (i=0;i<N_sources;i++) {
    num_jobs_gerados[i]=0;
}

//colocar aqui o nome do arquivo de saída de resultados. o valor do
SEED será acrescentado
sprintf(file_out, "callcenter.out.seed%d.txt", SEED);
fp = fopen(file_out,"w");

smp1(0,"Simulacao de um Call Center");
//inicialização das facilities
for (i=0; i<N_facilities; i++) {
    server[i]=facility(name_facility[i],1); //Voz1=0; Voz2=1; Voz3=2;
Espera=3; Humano=4
}
//geração dos eventos iniciais para todas as fontes
for (i=0; i<N_sources; i++) {
    schedule(i+1,expntl(tau_source[i]),job);
}
stream(SEED); //alimenta (seed) o gerador de números aleatórios do SMPL

while (stime()<Max_time && tot_jobs_gerados<Max_jobs) //para a
simulação no primeiro estouro de tempo ou geração
{
    cause(&event,&job);
    switch(event)
    {
        case 1: //chegada no Voz1 (vindo da Linha1)
            schedule(4,0.0,job); //escalona atendimento no Voz1
            num_cheg_fila[0]++; //incrementa acumulador de jobs que
chegaram para a fila Voz1
            num_jobs_gerados[0]++; //incrementa número de jobs gerados
pela fonte
            tot_jobs_gerados++; //incrementa acumulador de jobs gerados
total
            schedule(1,expntl(tau_source[0]),job); //escalona nova
chegada na Linha1

```

```

        break;
    case 2: //chegada no Voz2 (vindo da Linha2)
        schedule(5,0.0,job); //escalona atendimento no Voz2
        num_cheg_fila[1]++; //incrementa acumulador de jobs que
chegaram para a fila Voz2
        num_jobs_gerados[1]++; //incrementa número de jobs gerados
pela fonte
        tot_jobs_gerados++; //incrementa acumulador de jobs gerados
total
        schedule(2,expntl(tau_source[1]),job); //escalona nova
chegada na Linha2
        break;
    case 3: //chegada no Voz3 (vindo da Linha3)
        schedule(6,0.0,job); //escalona atendimento no Voz3
        num_cheg_fila[2]++; //incrementa acumulador de jobs que
chegaram para a fila Voz3
        num_jobs_gerados[2]++; //incrementa número de jobs gerados
pela fonte
        tot_jobs_gerados++; //incrementa acumulador de jobs gerados
total
        schedule(3,expntl(tau_source[2]),job); //escalona nova
chegada na Linha3
        break;
    case 4: //reserva servidor Voz1
        if (request(server[0],job,0)==0)
            schedule(7,expntl(s_server[0]),job); //se estiver livre,
escalona final de serviço
        else
        {
            if (inq(server[0])>tam_max_fila[0]) tam_max_fila[0] =
inq(server[0]); //atualiza tamanho máximo de fila
        }
        break;
    case 5: //reserva servidor Voz2
        if (request(server[1],job,0)==0)
            schedule(8,expntl(s_server[1]),job); //se estiver livre,
escalona final de serviço
        else
        {
            if (inq(server[1])>tam_max_fila[1]) tam_max_fila[1] =
inq(server[1]); //atualiza tamanho máximo de fila
        }
        break;
    case 6: //reserva servidor Voz3
        if (request(server[2],job,0)==0)
            schedule(9,expntl(s_server[2]),job); //se estiver livre,
escalona final de serviço
        else
        {
            if (inq(server[2])>tam_max_fila[2]) tam_max_fila[2] =
inq(server[2]); //atualiza tamanho máximo de fila
        }
        break;
    case 7: //chegada no Espera Forçada (vindo do Voz1)
        num_job_serv[0]++; //incrementa acumulador de jobs servidos
        release(server[0],job);
        schedule(10,0.0,job); //escalona atendimento no Espera
        num_cheg_fila[3]++; //incrementa acumulador de jobs que
chegaram para a fila Espera
        break;
    case 8: //chegada no Espera Forçada (vindo do Voz2)

```

```

        num_job_serv[1]++; //incrementa acumulador de jobs servidos
        release(server[1],job);
        schedule(10,0.0,job); //escalona atendimento no Espera
        num_cheg_fila[3]++; //incrementa acumulador de jobs que
chegaram para a fila Espera
        break;
    case 9: //chegada no Atendimento Humano (vindo do Voz3)
        num_job_serv[2]++; //incrementa acumulador de jobs servidos
        release(server[2],job);
        schedule(12,0.0,job); //escalona atendimento no Humano
        num_cheg_fila[4]++; //incrementa acumulador de jobs que
chegaram para a fila Humano
        break;
    case 10: //reserva servidor Espera
        if (request(server[3],job,0)==0)
            schedule(11,expntl(s_server[3]),job); //se estiver livre,
escalona final de serviço
        else
        {
            if (inq(server[3])>tam_max_fila[3]) tam_max_fila[3] =
inq(server[3]); //atualiza tamanho máximo de fila
        }
        break;
    case 11: //chegada no Atendimento Humano (vindo do Espera)
        num_job_serv[3]++; //incrementa acumulador de jobs servidos
        release(server[3],job);
        schedule(12,0.0,job); //escalona atendimento no Humano
        num_cheg_fila[4]++; //incrementa acumulador de jobs que
chegaram para a fila Humano
        break;
    case 12: //reserva servidor Humano
        if (request(server[4],job,0)==0)
            schedule(13,expntl(s_server[4]),job); //se estiver livre,
escalona final de serviço
        else
        {
            if (inq(server[4])>tam_max_fila[4]) tam_max_fila[4] =
inq(server[4]); //atualiza tamanho máximo de fila
        }
        break;
    case 13: //saída servidor Humano
        num_job_serv[4]++; //incrementa acumulador de jobs servidos
        release(server[4],job);
        break;
    }
}
//report();

fprintf(fp,"Simulacao de um Call Center com SPML\n2004 por Marcos
Portnoi");
fprintf(fp,"\n\nTempo Simulado          : %.2f\nNumero de Jobs
Gerados: %d", stime(), tot_jobs_gerados);
fprintf(fp, "\nSeed Utilizado          : %d", stream(0));
fprintf(fp, "\n\n *** FONTES ***\n");
fprintf(fp, "\nFONTE - NUM.JOBS.GER. - TAXA DE GERACAO");
fprintf(fp, "\n          [jobs]          [uts/jobs]");
fprintf(fp, "\n-----
");
for(i=0;i<N_sources;i++) {

```

```

        fprintf(fp, "\n      %d %13d      %8.4f", i, num_jobs_gerados[i],
tau_source[i]);
    }

    fprintf(fp, "\n\n\n *** SERVIDORES ***\n");
    fprintf(fp, "\nSERV. -   NOME   - UTILIZ. - JOB.SERV. - TX SERVICO -
TEMPO SERVICO - OCUP.FINAL");
    fprintf(fp, "\n                                     [jobs]      [jobs/uts]
[uts/jobs]   [0-livre;1-ocup.]");
    fprintf(fp, "\n-----");
    for(i=0; i<N_facilities; i++) {
        fprintf(fp, "\n      %d      %-8.8s %10.4f %10d %12.4f      %8.4f
%d",
            i, fname(server[i]), U(server[i]), num_job_serv[i],
num_job_serv[i]/(stime()*U(server[i])), s_server[i], status(server[i]));
    }

    fprintf(fp, "\n\n\n *** FILAS ***\n");
    fprintf(fp, "\nFILA -   NAME   - TX.CHG. - TAM.MED.FIL - TEM.MED.FIL -
TAM.MAX - CLI.FINAL");
    fprintf(fp, "\n                                     [jobs/uts]      [jobs]      [uts]
[jobs]      [jobs]");
    fprintf(fp, "\n-----");
    for(i=0; i<N_facilities; i++) {
        tx_cheg_fila[i]=num_cheg_fila[i]/stime();
        fprintf(fp, "\n      %d      %-8.8s %10.4f %10.4f %10.4f %10d %6d",
            i, fname(server[i]), tx_cheg_fila[i], Lq(server[i]),
Lq(server[i])/tx_cheg_fila[i], tam_max_fila[i], inq(server[i]));
    }

    fprintf(fp, "\n\n\nOUTRAS ESTATISTICAS:");
    fprintf(fp, "\n\nLinha1:");

    t_espera_linha1=Lq(server[0])/tx_cheg_fila[0]+Lq(server[3])/tx_cheg_fila[3]
+Lq(server[4])/tx_cheg_fila[4]+
        s_server[0]+s_server[3];
    fprintf(fp, "\n\nTempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano
[uts]: %8.4f", t_espera_linha1);
    fprintf(fp, "\nTempo de Resposta Total ate final atendimento [uts]
: %8.4f", t_espera_linha1+s_server[4]);
    fprintf(fp, "\n\nLinha2:");

    t_espera_linha2=Lq(server[1])/tx_cheg_fila[1]+Lq(server[3])/tx_cheg_fila[3]
+Lq(server[4])/tx_cheg_fila[4]+
        s_server[1]+s_server[3];
    fprintf(fp, "\n\nTempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano
[uts]: %8.4f", t_espera_linha2);
    fprintf(fp, "\nTempo de Resposta Total ate final atendimento [uts]
: %8.4f", t_espera_linha2+s_server[4]);
    fprintf(fp, "\n\nLinha3:");

    t_espera_linha3=Lq(server[2])/tx_cheg_fila[2]+Lq(server[4])/tx_cheg_fila[4]
+s_server[2];
    fprintf(fp, "\n\nTempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano
[uts]: %8.4f", t_espera_linha3);
    fprintf(fp, "\nTempo de Resposta Total ate final atendimento [uts]
: %8.4f", t_espera_linha3+s_server[4]);

    fprintf(fp, "\n\n\nLEGENDA:");

```



```

    fprintf(fp, "\n\nNUM.JOBS.GER.    = Numero de Jobs Gerados por Fonte");
    fprintf(fp, "\nTAXA DE GERACAO = Taxa de Chegada de Jobs por Fonte");
    fprintf(fp, "\nUTILIZACAO    = Utilizacao por Servidor");
    fprintf(fp, "\nJOB.SERV      = Numero de Jobs Servidos por
Servidor");
    fprintf(fp, "\nTX SERVICO    = Taxa de Servico por Servidor");
    fprintf(fp, "\nTEMPO SERVICO = Tempo Medio de Servico por Servidor");
    fprintf(fp, "\nOCUP.FINAL    = Estado do Servidor ao Final da
Simulacao (ocupado ou livre)");
    fprintf(fp, "\nTX.CHG.      = Taxa de Chegada de Jobs por Fila");
    fprintf(fp, "\nTAM.MED.FIL    = Tamanho Medio da Fila");
    fprintf(fp, "\nTEM.MED.FIL    = Tempo Medio de Espera em Fila");
    fprintf(fp, "\nTAM.MAX      = Tamanho Maximo Atingido pela Fila
durante Simulacao");
    fprintf(fp, "\nCLI.FINAL    = Numero de Jobs em Fila ao termino da
Simulacao");
    fclose(fp);
}

```

ANEXO B: Resultados das Simulações

Tabela 11: Atendimento Eletrônico Voz - 25 s; Espera Forçada - 20 s.

Resultados da Simulação

Tempos de Serviço:
Voz: 25 s
Espera Forçada: 20 s

Simulação	Tamanho Máximo de Fila (ligações)						Tamanho Médio de Fila (ligações)						Tempo de Resposta (ou Espera Total) (segundos)						Utilização Humano
	Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano		Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano		Linha1	Linha2	Linha3				
1	21	19	18	1.105	33		1,1	1,1	1,0	454,3	2,3		9.141,9	9.140,9	105,7				0,75
2	19	22	20	826	30		1,0	1,0	1,1	189,5	2,3		3.902,3	3.902,1	107,3				0,75
3	31	24	27	1.101	35		1,1	1,1	1,1	691,9	2,3		13.880,9	13.880,8	107,5				0,75
4	21	20	20	459	41		1,1	1,0	1,1	82,8	2,2		1.788,8	1.785,1	107,1				0,75
5	20	37	22	409	30		1,1	1,1	1,1	151,5	2,3		3.160,8	3.160,7	107,4				0,75
Média:	22,40	24,40	21,40	780,00	33,80		1,08	1,06	1,08	314,00	2,29		6.374,94	6.373,92	107,00				0,75
Desvio Padrão:	4,88	7,30	3,44	335,96	4,55		0,04	0,05	0,04	253,90	0,05		5.036,69	5.037,39	0,74				0,00
Intervalo Confiança:	4,65	6,96	3,28	320,32	4,34		0,04	0,05	0,04	242,08	0,05		4.802,28	4.802,95	0,71				0,00

*intervalo de confiança (Student) de 90%

Tabela 12: Atendimento Eletrônico de Voz - 25 s; Espera Forçada - 20 s.

Simulacao de um Call Center com SPML

2004 por Marcos Portnoi

Tempo Simulado : 2600001.46
 Numero de Jobs Gerados: 196069
 Seed Utilizado : 1

*** FONTES ***

FONTE - NUM.JOBS.GER. - TAXA DE GERACAO
 [jobs] [uts/jobs]

0	65408	40.0000
1	65676	40.0000
2	64985	40.0000

*** SERVIDORES ***

SERV. - NOME - UTILIZ. - JOB.SERV. - TX SERVICO - TEMPO SERVICO - OCUP.FINAL
 [jobs] [jobs/uts] [uts/jobs] [0-livre;1-ocup.]

0	Voz1	0.6325	65408	0.0398	25.0000	0
1	Voz2	0.6333	65674	0.0399	25.0000	1
2	Voz3	0.6194	64985	0.0404	25.0000	0
3	Espera	0.9978	130010	0.0501	20.0000	1
4	Humano	0.7506	194995	0.0999	10.0000	0

*** FILAS ***

FILA - NAME - TX.CHG. - TAM.MED.FIL - TEM.MED.FIL - TAM.MAX - CLI.FINAL
 [jobs/uts] [jobs] [uts] [jobs] [jobs]

0	Voz1	0.0252	1.0985	43.6663	21	0
1	Voz2	0.0253	1.0793	42.7293	19	1
2	Voz3	0.0250	0.9962	39.8580	18	0
3	Espera	0.0504	454.3711	9012.4157	1105	1071
4	Humano	0.0750	2.3109	30.8127	33	0

OUTRAS ESTATISTICAS:

Linha1:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 9131.8945
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 9141.8945

Linha2:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 9130.9580
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 9140.9580

Linha3:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 95.6707
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 105.6707

LEGENDA:

NUM.JOBS.GER. = Numero de Jobs Gerados por Fonte
 TAXA DE GERACAO = Taxa de Chegada de Jobs por Fonte
 UTILIZACAO = Utilizacao por Servidor
 JOB.SERV = Numero de Jobs Servidos por Servidor
 TX SERVICO = Taxa de Servico por Servidor
 TEMPO SERVICO = Tempo Medio de Servico por Servidor
 OCUP.FINAL = Estado do Servidor ao Final da Simulacao (ocupado ou livre)
 TX.CHG. = Taxa de Chegada de Jobs por Fila
 TAM.MED.FIL = Tamanho Medio da Fila
 TEM.MED.FIL = Tempo Medio de Espera em Fila
 TAM.MAX = Tamanho Maximo Atingido pela Fila durante Simulacao
 CLI.FINAL = Numero de Jobs em Fila ao termino da Simulacao

Tabela 13: Atendimento Eletrônico de Voz - 30 s; Espera Forçada - 25 s.

Simulacao de um Call Center com SPML

2004 por Marcos Portnoi

Tempo Simulado : 2600005.71
 Numero de Jobs Gerados: 195209
 Seed Utilizado : 1

*** FONTES ***

FONTE - NUM.JOBS.GER. - TAXA DE GERACAO
 [jobs] [uts/jobs]

0	64874	40.0000
1	64657	40.0000
2	65678	40.0000

*** SERVIDORES ***

SERV. - NOME - UTILIZ. - JOB.SERV. - TX SERVICO - TEMPO SERVICO - OCUP.FINAL
 [jobs] [jobs/uts] [uts/jobs] [0-livre;1-ocup.]

0	Voz1	0.7436	64874	0.0336	30.0000	0
1	Voz2	0.7432	64656	0.0335	30.0000	1
2	Voz3	0.7566	65678	0.0334	30.0000	0
3	Espera	0.9999	104174	0.0401	25.0000	1
4	Humano	0.6535	169851	0.1000	10.0000	0

*** FILAS ***

FILA - NAME - TX.CHG. - TAM.MED.FIL - TEM.MED.FIL - TAM.MAX - CLI.FINAL
 [jobs/uts] [jobs] [uts] [jobs] [jobs]

0	Voz1	0.0250	2.1951	87.9761	26	0
1	Voz2	0.0249	2.2228	89.3821	34	0
2	Voz3	0.0253	2.3760	94.0595	26	0
3	Espera	0.0498	12750.5590	255937.0432	25355	25355
4	Humano	0.0653	1.2277	18.7932	24	0

OUTRAS ESTATISTICAS:

Linha1:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 256098.8125
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 256108.8125

Linha2:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 256100.2188
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 256110.2188

Linha3:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 142.8526
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 152.8526

LEGENDA:

NUM.JOBS.GER. = Numero de Jobs Gerados por Fonte
 TAXA DE GERACAO = Taxa de Chegada de Jobs por Fonte
 UTILIZACAO = Utilizacao por Servidor
 JOB.SERV = Numero de Jobs Servidos por Servidor
 TX SERVICO = Taxa de Servico por Servidor
 TEMPO SERVICO = Tempo Medio de Servico por Servidor
 OCUP.FINAL = Estado do Servidor ao Final da Simulacao (ocupado ou livre)
 TX.CHG. = Taxa de Chegada de Jobs por Fila
 TAM.MED.FIL = Tamanho Medio da Fila
 TEM.MED.FIL = Tempo Medio de Espera em Fila
 TAM.MAX = Tamanho Maximo Atingido pela Fila durante Simulacao
 CLI.FINAL = Numero de Jobs em Fila ao termino da Simulação

Tabela 14: Atendimento Eletrônico de Voz - 15 s; Espera Forçada - 25 s.

Simulacao de um Call Center com SPML

2004 por Marcos Portnoi

Tempo Simulado : 2600000.08
 Numero de Jobs Gerados: 195637
 Seed Utilizado : 1

*** FONTES ***

FONTE - NUM.JOBS.GER. - TAXA DE GERACAO
 [jobs] [uts/jobs]

0	65166	40.0000
1	65306	40.0000
2	65165	40.0000

*** SERVIDORES ***

SERV. - NOME - UTILIZ. - JOB.SERV. - TX SERVICO - TEMPO SERVICO - OCUP.FINAL
 [jobs] [jobs/uts] [uts/jobs] [0-livre;1-ocup.]

0	Voz1	0.3743	65165	0.0670	15.0000	1
1	Voz2	0.3773	65304	0.0666	15.0000	1
2	Voz3	0.3763	65165	0.0666	15.0000	0
3	Espera	1.0000	103955	0.0400	25.0000	1
4	Humano	0.6490	169117	0.1002	10.0000	0

*** FILAS ***

FILA - NAME - TX.CHG. - TAM.MED.FIL - TEM.MED.FIL - TAM.MAX - CLI.FINAL
 [jobs/uts] [jobs] [uts] [jobs] [jobs]

0	Voz1	0.0251	0.2215	8.8382	10	0
1	Voz2	0.0251	0.2264	9.0154	13	1
2	Voz3	0.0251	0.2302	9.1862	10	0
3	Espera	0.0502	13439.3875	267821.5405	26546	26513
4	Humano	0.0650	1.1969	18.4000	23	2

OUTRAS ESTATISTICAS:

Linha1:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 267888.7812
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 267898.7812

Linha2:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 267888.9688
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 267898.9688

Linha3:

Tempo de Espera ate ser atendido pelo Atendente Humano [uts]: 42.5862
 Tempo de Resposta Total ate final atendimento [uts] : 52.5862

LEGENDA:

NUM.JOBS.GER. = Numero de Jobs Gerados por Fonte
 TAXA DE GERACAO = Taxa de Chegada de Jobs por Fonte
 UTILIZACAO = Utilizacao por Servidor
 JOB.SERV = Numero de Jobs Servidos por Servidor
 TX SERVICO = Taxa de Servico por Servidor
 TEMPO SERVICO = Tempo Medio de Servico por Servidor
 OCUP.FINAL = Estado do Servidor ao Final da Simulacao (ocupado ou livre)
 TX.CHG. = Taxa de Chegada de Jobs por Fila
 TAM.MED.FIL = Tamanho Medio da Fila
 TEM.MED.FIL = Tempo Medio de Espera em Fila
 TAM.MAX = Tamanho Maximo Atingido pela Fila durante Simulacao
 CLI.FINAL = Numero de Jobs em Fila ao termino da Simulação

Tabela 15: Atendimento Eletrônico de Voz - 15 s; Espera Forçada - 15 s.

Resultados da Simulação

Tempos de Serviço:
Voz: 15 s
Espera Forçada: 15 s

Simulação	Tamanho Máximo de Fila (ligações)						Tamanho Médio de Fila (ligações)						Tempo de Resposta (ou Espera Total) (segundos)			Utilização Humano
	Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano		Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano		Linha1	Linha2	Linha3	
1	12	10	10	28	51		0,2	0,2	0,2	2,2	2,3		123,8	123,8	65,0	0,75
2	10	10	9	29	31		0,2	0,2	0,2	2,3	2,3		125,0	124,9	64,0	0,75
3	10	11	10	26	45		0,2	0,2	0,2	2,2	2,3		123,8	123,8	65,0	0,75
4	12	10	10	30	32		0,2	0,2	0,2	2,2	2,2		123,3	123,1	63,6	0,74
5	13	9	11	44	45		0,2	0,2	0,2	2,4	2,3		126,5	126,4	64,6	0,75
Média:	11,40	10,00	10,00	31,40	40,80		0,20	0,20	0,20	2,26	2,28		124,49	124,40	64,43	0,75
Desvio Padrão:	1,34	0,71	0,71	7,20	8,84		0,00	0,00	0,00	0,09	0,04		1,29	1,29	0,62	0,00
Intervalo Confiança:	1,28	0,67	0,67	6,86	8,43		0,00	0,00	0,00	0,09	0,04		1,23	1,23	0,59	0,00

*intervalo de confiança (Student) de 90%

Tabela 16: Atendimento Eletrônico de Voz - 30 s; Espera Forçada - 15 s.

Resultados da Simulação

Tempos de Serviço:
Voz: 30 s
Espera Forçada: 15 s

Simulação	Tamanho Máximo de Fila (ligações)						Tamanho Médio de Fila (ligações)						Tempo de Resposta (ou Espera Total) (segundos)			Utilização Humano
	Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano		Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano		Linha1	Linha2	Linha3	
1	44	31	35	28	29		2,4	2,3	2,3	2,3	2,2		223,4	219,5	161,3	0,75
2	30	30	25	30	36		2,2	2,2	2,2	2,3	2,3		219,9	219,5	156,9	0,75
3	30	33	28	28	29		2,4	2,3	2,1	2,3	2,2		227,1	219,5	153,8	0,75
4	25	30	31	32	38		2,2	2,3	2,2	2,2	2,2		217,9	219,5	158,0	0,75
5	25	29	27	45	29		2,1	2,2	2,1	2,2	2,2		215,8	218,6	155,5	0,75
Média:	30,80	30,60	29,20	32,60	32,20		2,26	2,26	2,18	2,26	2,22		220,82	219,32	157,10	0,75
Desvio Padrão:	7,79	1,52	3,90	7,13	4,44		0,13	0,05	0,08	0,05	0,04		4,49	0,40	2,83	0,00
Intervalo Confiança:	7,43	1,45	3,72	6,80	4,23		0,13	0,05	0,08	0,05	0,04		4,28	0,38	2,69	0,00

*intervalo de confiança (Student) de 90%

Tabela 17: Atendimento Eletrônico de Voz - 25 s; Espera Forçada - 18 s.

Resultados da Simulação

Tempos de Serviço:
Voz: 25 s
Espera Forçada: 18 s

Simulação	Tamanho Máximo de Fila (ligações)					Tamanho Médio de Fila (ligações)					Tempo de Resposta (ou Espera Total) (segundos)			Utilização Humanc
	Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano	Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano	Linha1	Linha2	Linha3	
1	20	29	22	56	28	1,0	1,0	1,1	7,1	2,2	266,2	266,2	106,5	0,75
2	16	21	17	67	38	1,0	1,1	1,0	8,2	2,2	285,0	287,9	103,8	0,74
3	20	16	18	75	33	1,0	1,0	1,1	8,3	2,3	291,8	291,3	108,1	0,75
4	18	21	20	86	36	1,1	1,1	1,0	7,9	2,2	282,1	283,0	105,9	0,75
5	17	17	19	87	30	1,0	1,0	1,1	7,7	2,3	278,8	278,3	107,9	0,75
Média:	18,24	20,80	19,20	74,20	33,00	1,02	1,04	1,06	7,85	2,24	280,79	281,34	106,44	0,75
Desvio Padrão:	1,79	5,12	1,92	13,10	4,12	0,04	0,05	0,05	0,47	0,05	9,45	9,79	1,74	0,00
Intervalo Confiança:	1,70	4,88	1,83	12,49	3,93	0,04	0,05	0,05	0,44	0,05	9,01	9,34	1,66	0,00

*Intervalo de confiança (Student) de 90%

Tabela 18: Atendimento Eletrônico de Voz - 15 s; Espera Forçada - 18 s.

Resultados da Simulação

Tempos de Serviço:
Voz: 15 s
Espera Forçada: 18 s

Simulação	Tamanho Máximo de Fila (ligações)					Tamanho Médio de Fila (ligações)					Tempo de Resposta (ou Espera Total) (segundos)				
	Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano	Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano	Linha1	Linha2	Linha3	Utilização Humano	Utilização Humano
1	10	9	11	63	28	0,2	0,2	0,2	8,5	2,3	251,4	251,7	64,8		0,76
2	10	10	10	78	36	0,2	0,2	0,2	9,6	2,3	272,6	272,7	65,1		0,75
3	11	11	11	94	33	0,2	0,2	0,2	8,6	2,2	252,9	252,8	63,9		0,75
4	10	12	10	57	37	0,2	0,2	0,2	7,4	2,3	230,8	230,9	64,0		0,75
5	10	10	10	65	33	0,2	0,2	0,2	7,6	2,3	235,4	235,3	64,5		0,75
Média:	10,20	10,40	10,40	71,40	33,40	0,20	0,20	0,20	8,34	2,28	248,62	248,68	64,46		0,75
Desvio Padrão:	0,45	1,14	0,55	14,77	3,51	0,00	0,00	0,00	0,88	0,04	16,53	16,57	0,51		0,00
Intervalo Confiança:	0,43	1,09	0,52	14,09	3,34	0,00	0,00	0,00	0,84	0,04	15,76	15,80	0,49		0,00

*Intervalo de confiança (Student) de 90%

Tabela 19: Atendimento Eletrônico de Voz - 25 s; Espera Forçada - 15 s.

Resultados da Simulação

Tempos de Serviço:
Voz: 25 s
Espera Forçada: 15 s

Simulação	Tamanho Máximo de Fila (ligações)						Tamanho Médio de Fila (ligações)						Tempo de Resposta (ou Espera Total) (segundos)				Utilização Humano
	Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano		Voz1	Voz2	Voz3	Espera	Humano		Linha1	Linha2	Linha3		
1	20	18	17	40	34		1,0	1,0	1,1	2,3	2,3		167,4	167,2	107,5		0,75
2	16	27	17	31	33		1,1	1,1	1,0	2,3	2,3		168,7	168,1	106,6		0,75
3	19	21	17	37	38		1,1	1,0	1,0	2,2	2,3		169,1	166,5	106,4		0,75
4	23	23	28	32	35		1,1	1,0	1,1	2,3	2,2		169,5	167,5	107,9		0,75
5	22	19	17	34	30		1,1	1,1	1,1	2,3	2,2		168,4	168,3	107,1		0,75
Média:	20,00	21,60	19,20	34,80	34,00		1,08	1,04	1,06	2,28	2,26		168,62	167,52	107,10		0,75
Desvio Padrão:	2,74	3,58	4,92	3,70	2,92		0,04	0,05	0,05	0,04	0,05		0,80	0,72	0,62		0,00
Intervalo Confiança:	2,61	3,41	4,69	3,53	2,78		0,04	0,05	0,05	0,04	0,05		0,76	0,69	0,59		0,00

*Intervalo de confiança (Student) de 90%

ANEXO C: Fórmulas da Teoria de Filas (M/M/1)

1. Intensidade de Tráfego (Utilização): $\rho = \lambda/\mu$
2. Probabilidade de zero *jobs* no sistema: $\rho_0 = 1 - \rho$
3. Probabilidade de n *jobs* no sistema: $\rho_n = (1 - \rho)\rho^n, n = 0, 1, \dots, \infty$
4. Número médio de *jobs* no sistema: $E[n] = \rho/(1 - \rho)$
5. Variância do número de *jobs* no sistema: $Var[n] = \rho/(1 - \rho)^2$
6. Probabilidade de k *jobs* na fila: $P(n_q = k) = \begin{cases} 1 - \rho^2, & k = 0 \\ (1 - \rho)\rho^{k+1}, & k > 0 \end{cases}$
7. Número médio de *jobs* na fila (tamanho médio de fila): $E[n_q] = \rho^2/(1 - \rho)$
8. Tempo médio de resposta: $E[r] = \frac{(1/\mu)}{1 - \rho}$
9. Tempo médio de espera em fila: $E[w] = \rho \frac{(1/\mu)}{1 - \rho}$
10. Probabilidade de se encontrar n ou *mais jobs* no sistema: ρ^n
11. Número médio de *jobs* servidor em um período ocupado: $\frac{1}{1 - \rho}$
12. Duração média do período ocupado: $\frac{1}{\mu(1 - \rho)}$