



SUPLEMENTO DO EXCEL DESENVOLVIDO EM LINGUAGEM VBA PARA SIMULAÇÃO DISCRETA DE SISTEMAS DE FILAS M/M/1

Dayvid Wesley P. Martins

Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas
Av. Universitária 1440, Área III, Bloco D – Goiânia – Goiás – Brasil – CEP 74605-010
dayvidwesley@gmail.com

Maria Jose P. Dantas

Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas
Av. Universitária 1440, Área III, Bloco D – Goiânia – Goiás – Brasil – CEP 74605-010
mjpdantas@gmail.com

RESUMO

O presente artigo emprega técnicas de simulação ao modelo de fila M|M|1 por meio do desenvolvimento de um suplemento do Excel com a linguagem VBA (Visual Basic for Applications), para auxiliar o ensino da natureza da simulação, utilizando sistemas de filas. Os dados obtidos na execução da simulação são armazenados e confrontados com cálculos obtidos por intermédio do modelo teórico. É possível experimentar cenários para um melhor entendimento de regime estável, tempo de aquecimento, dinâmica da fila. Os gráficos são utilizados para uma melhor compreensão dos conceitos importantes que podem ser discutidos via simulação ao invés das fórmulas da teoria das filas.

PALAVRAS CHAVE. Suplemento do Excel, VBA, Teoria das Filas, simulação discreta, ensino.

Tópicos (EDU - OR in Education // EDU - IO en Educación // EDU - PO na Educação, SIM - Simulation // SI Simulación // SIM - Simulação)

ABSTRACT

This article is about using M|M|1 queue model simulation by developing an Excel add-in with the VBA language (Visual Basic for Applications), to help teach the nature of the simulation, using queuing systems. The data obtained during execution of the simulation are stored and compared with calculations obtained through the theoretical model. You can try out scenarios for a better understanding of stable regime, warm-up time, queue dynamics. The graphs are used to better understand the important concepts that can be discussed via simulation rather than the formulas of queuing theory.

KEYWORDS. Excel supplement, queue theory, learning object, discrete simulation

Paper topics (EDU - OR in Education // EDU - IO en Educación // EDU - PO na Educação, SIM - Simulation // SI Simulación // SIM - Simulação)



1 Introdução

O estudo das filas de espera é um problema clássico em engenharia de fluxo e pesquisa operacional. A fila possui formação aleatória e não estando bem dimensionada pode acarretar congestionamentos e desperdícios financeiros, dentre outras consequências indesejáveis [Michel *et al.* 2011; Viti e van Zuylen 2010] .

Em [1952] Lindley já salientava o interesse que estudo das filas desperta em matemáticos e engenheiros, existindo uma extensa literatura sobre o assunto. As aplicações da teoria são muitas e variadas, do trabalho original de Erlang em engenharia telefônica, aos atuais estudos na concepção de aeroportos. Um Sistema de filas possui geralmente duas entidades básicas, a que espera pelo atendimento, denominada de cliente, e aquela que executar os procedimentos de atendimento requerido, denominada de servidor [Akhavian e Behzadan 2014] .

Para obter uma perspectiva analítica de sistemas ou processos que resultam em espera é universal abordar a modelagem por meio da simulação e Teoria das Filas. Entretanto, o número de trabalhos que lidam com o lado teórico educacional do tema é relativamente pequeno, e, portanto, parece ser desejável uma tentativa de disponibilizar informações básicas referente a Teoria das Filas compilados em um Objeto de aprendizagem, que é um suplemento do Excel desenvolvido com a linguagem de macros VBA.

Porém, é válido ressaltar que a última atualização significativa na linguagem VBA, ocorreu em meados de 1999. No entanto, este ainda vem como padrão no Office 2016, e é uma alternativa única para se criar nativamente macros automatizada no pacote Office. Apesar de possíveis inviabilidades, quanto ao desenvolvimento de “algoritmos robustos”, a integração nativa com Excel viabiliza uma visualização facilitada das entradas e saídas. Esta peculiaridade a faz ideal para o desenvolvimento de objetos de aprendizados bem como automatizações de “*Office Applications*” [Sana 2017].

A proposta deste trabalho é caracterizar processos e conceitos de geração de fila, seus componentes e fundamentos estatísticos implementados a uma rotina computacional que pode ser utilizada para experimentos que mostram a dinâmica das filas de espera.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Teoria das Filas

Há ocorrência de filas sempre que a demanda de serviço é maior que a capacidade ofertada pelo sistema. Os sistemas de filas são representados por uma entidade de chegada – clientes ou produtos – a um sistema de atendimento – processamento, beneficiamento ou produção – requisitando um ou mais serviços, executados por um ou mais servidores sequencialmente ou paralelamente dispostos [Lindley 1952].

Chubachi e Gomes [2016], tipifica que Teoria das Filas é a modelagem analítica dos processos ou sistemas de espera com uma abordagem probabilística, enfatizando a minimização dos impactos negativos das esperas nos processos, evitando desperdícios e destacando os gargalos para então sugerir melhorias.

A abordagem probabilística permite capturar o comportamento temporal para filas de espera. Esta interpelação concede a mensuração da incerteza de uma previsão de estado da fila. Para tal, usa-se o cálculo da evolução de probabilidade no tempo, assumido distribuições de probabilidade para descrever o comportamento das chegadas e dos atendimentos. As aplicações são diversificada, da confiabilidade de uma rede, *design* e planejamento das áreas urbanas, bem como para estimar efeitos complexos que podem ser observadas em redes congestionadas [Viti e van Zuylen 2010].

Associam-se as medidas de desempenho ao “*modus operandi*” do sistema de filas, tais como tempo médio de permanência dos clientes na fila, probabilidade que o sistema esteja operando em sua capacidade máxima, dentre outras. Portanto, através de análises matemáticas detalhadas, a teoria das filas objetiva encontrar o equilíbrio pontual entre satisfazer o cliente – ou



linha de produção – de forma economicamente viável. Os elementos de uma fila são descritos a seguir [Prado 2014a].

- **Cliente:** Elemento que chega e requer atendimento. Os clientes podem ser pessoas, máquinas, peças, cartas de processos etc.
- **Canal de atendimento:** Entidade que realiza o atendimento – processo ou pessoa – do cliente. Usualmente termo atendente é denotado ao canal de atendimento. Pode-se apresentar como exemplo uma impressora que efetua as requisições de impressões em uma rede de computadores, bem como um vendedor de ingressos, o carteiro, etc.
- **Disciplina da Fila:** Princípio que serve como padrão, norma utilizada pelo canal de atendimento na escolha do próximo cliente da fila sempre que o servidor completa o atendimento podendo ocorrer segundo os seguintes princípios: *First In, First Out* – FIFO; *Last In, First Out* – LIFO e Prioridade (atendimentos realizados por princípio de importância ou embasada na urgência de serviço).

O sistema de filas de espera possui algumas variações referente a disciplina, dimensionamento limitado ou ilimitado, número de servidores dispostos no sistema dentre outros. Essa variação sistêmica implica em a uma variedade de modelos de filas, alguns deles de árduo entendimento analítico. A análise dos sistemas de filas pode ser simplificada pela notação de Kendall-Lee. Esta notação considera seis características (as três primeiras foram inicialmente definidas por D. Kendall em 1953, e as três últimas foram adicionadas por A. Lee em 1968. O “*modus operandi*” de um sistema de filas segundo a notação de Kendall-Lee é compendia como A/B/c/K/m/Z, em que [Arenales *et al.* 2011]:

- (A) distribuição de probabilidade do processo de chegada;
- (B) distribuição de probabilidade do processo de serviço;
- (m) indica o número de servidores em paralelo;
- (c) disciplina da fila, por exemplo, c = FCFS, LCFS, SIRO;
- (K) indica o número máximo de usuários no sistema;
- (N) indica o tamanho da população (fonte de usuários).

2.2 Modelo analítico M/M/s

O modelo M/M/s possibilita grande aplicação teórica, pois permite que se construa toda uma teoria sobre filas, possibilitando calcular tempos e efetuar dimensionamentos com base em filas. Possui a mais simples estruturação da fila de espera, em que o comportamento padrão da distribuição de chegadas e dos serviços é solucionado com fórmulas diretas. Apesar de ter poucas aplicações práticas a importância didática deste modelo é bastante significativa. Em aplicações práticas, os problemas de filas reais podem ser solucionados através da aplicação de simulação computacional [Artalejo *et al.* 2007].

O modelo M/M/1 possui equações fundamentadas em características decorrentes dos processos de chegada e atendimento: as chegadas procedem de acordo distribuição de Poisson com média λ chegadas/unidade de tempo, a taxa de serviço segue a distribuição Exponencial negativa com média μ , o cliente na fila é atendido por ordem de chegada, o número de clientes potenciais deve ser suficientemente grande de modo que a população seja considerada infinita. São três (3) os eventos possíveis na variação do tempo [Chwif e Medina 2015; Prado 2014b]:

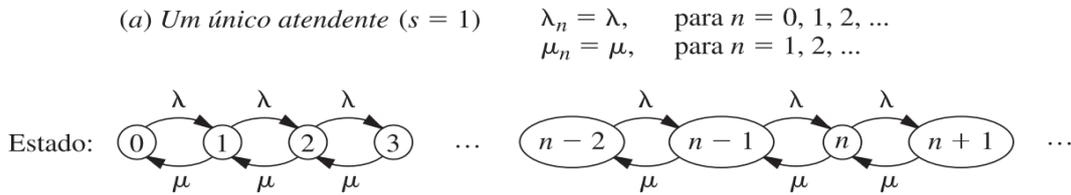
- A entrada de 1 cliente no sistema;
- A saída de 1 cliente do sistema;
- Inexistência de alterações, ou seja, chegadas nulas ou serviço inoperante.

A fila M/M/1 é o caso mais simples do modelo M/M/s. Os processos de chegada e de



atendimento possuem comportamento Markoviano, e o número 1 indica a existência de um único servidor. Os valores de λ e μ , respectivamente, representam a taxa média de chegada de clientes e a taxa média de serviço. Esta fila é representada por um diagrama de taxas apresentado na Figura 1, na qual n é o número de clientes no sistema e cálculo da taxa de utilização do sistema (ρ) é apresentado na equação 1 [Hillier e Lieberman 2013].

Figura 1: Diagrama de taxa da fila M/M/1



Fonte: Hillier e Lieberman [2013].

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \tag{1}$$

Para que um sistema de filas tenha comportamento estável, a taxa de chegada deve ser obrigatoriamente menor do que a taxa de serviço, ou seja, λ imprescindivelmente menor do que μ , caso contrário a fila tenderá ao infinito [Prado 2014b]. As equações para cálculo teórico deste modelo estão apresentadas na Tabela 1.

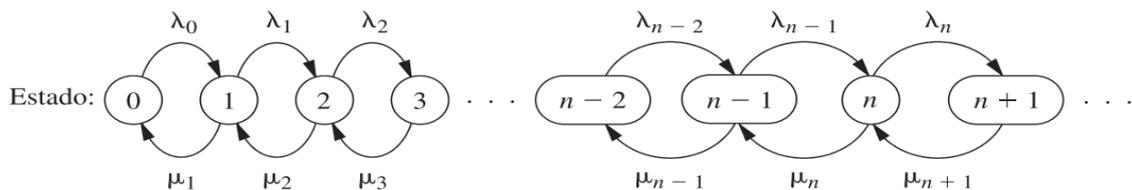
Tabela 1: Equações do modelo M/M/1, $\lambda < \mu$.

Parâmetros	Representação	Equação
Nº de clientes no sistema	L	$\frac{\lambda}{(\mu - \lambda)}$ (2)
Nº de clientes na fila	Lq	$\frac{\lambda^2}{(\mu - \lambda)}$ (3)
Tempo de serviço	W	$\frac{1}{(\mu - \lambda)}$ (4)
Tempo Previsto na fila	Wq	$\frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$ (5)
Probabilidade de o sistema estar vazio	P_0	$1 - \frac{\lambda}{\mu}$ (6)

Fonte : Adaptado de Moore & Weatherford[2005]

Hillier e Lieberman [2013], representa a fila M/M/s por intermédio de um diagrama de taxas apresentado na Figura 2 em que n é o número de cliente e ρ a taxa de utilização do sistema é determinada pela Equação 7.

Figura 2: Diagrama de taxas do procedimento de nascimento e morte das filas M/M/s.



Fonte: Hillier e Lieberman [2013].



$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} \quad (7)$$

Sistemas de filas constituídos com mais de um servidor (M/M/s) – Prado [2014b] adota a nomenclatura M/M/s para representar o modelo de fila única com s servidores, semelhante ao sistema de fila M/M/1, efetua chegadas e atendimentos respectivamente de acordo a distribuição de Poisson e distribuição exponencial negativa, onde o atendimento aos clientes são realizado por ordem de chegada. Porém, a quantidade de servidores alocados no sistema é indicada pela letra “s”. As equações para o cálculo operacional do sistema de filas M/M/s estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Equações do modelo M/M/s, $\lambda < s\mu$.

Parâmetros	Representação	Equação	
Probabilidade de o sistema estar vazio	P_0	$\frac{1}{\sum_j \frac{\rho^j}{j!} + \frac{\rho^s}{(s-1)!(s-\rho)}}$	(8)
Probabilidade de todos os servidores ocupados $n \leq s$	P_{ocup}	$\frac{\rho^n}{n!} P_0$	(9)
Probabilidade de todos servidores ocupados $n > s$	P_{ocup}	$\frac{\rho^s}{(s-1)!(s-\rho)} P_0$	(10)
Nº de clientes esperando na fila	L_q	$\frac{P_0 (\lambda/\mu)^s \rho}{s! (1-\rho)^2}$	(11)
Nº de clientes no sistema	L	$L_q + \rho$	(12)
Tempo de espera na Fila	W_q	$\frac{L_q}{\lambda}$	(13)
Tempo de espera no sistema	W	$W_q + \frac{1}{\mu}$	(14)

Fonte : Adaptado de Moore & Weatherford [2005]

2.3 Simulação e representação gráfica da fila

Logo depois da Segunda Guerra Mundial (1945), emerge a simulação utilizando computadores. No projeto da bomba de hidrogênio nos EUA, Ulam, John Von Neumann e outros usaram simulação ao usar o método de Monte Carlo para solucionar problemas pertinente a difusão de nêutron. Hoje possibilita efetuar experimentações sem alterar fisicamente a configuração de uma planta industrial, ou ainda, avaliar a contratação prévia de funcionários para verificar a capacidade em atender a uma demanda futura [Goldsman *et al.* 2010; Krivitsky 2016].

A simulação pode ser caracterizada como sendo discreta, contínua ou híbrida. Em simulação de eventos discretos, representa-se o sistema como uma sequência cronológica e aleatória de eventos. Cada evento ocorre em um instante determinado no tempo e assinala a mudança de estado no sistema. Aplica-se simulação contínua em situações que o sistema altera seu estado em função do tempo, de maneira contínua, exigindo normalmente o emprego de equações diferenciais na descrição da taxa de mudança em variáveis de estado. [Arenales *et al.* 2011; Hillier e Lieberman 2013; Prado 2014a].

O sistema de fila M/M/1, caracteriza-se como um modelo de simulação discreta sendo o mesmo representado por uma sequência cronológica e aleatória de eventos. Dentre as diversas possibilidades computacionais para simulação, reside a modelagem por planilha eletrônica (*spreadSheet*). Conforme demonstrado por Boshkoska [2015] e Salvador *et al.* [2015], não é essencial dispor de experiência em programação ou manipulação de macros para sua implementação – replicação e ou atualização – constituindo-se como a mais simples das implementações de simulação computacional.



A simulação é uma técnica quantitativa importante, entretanto, as abordagens baseadas em planilhas, às vezes, pecam por ignorarem a representatividade gráfica do sistema de filas, tornando difícil a avaliação do efeito acumulativo dos clientes e a natureza dos períodos de ociosidade. Assim, limitam a didática sobre processos de enfileiramento. Os gráficos constituem a representatividade da evolução completa de uma fila. Dessa forma, a experiência de cada servidor, o acúmulo de clientes, a ociosidade sistêmica e o momento em que o sistema atinge a condição de estado estável, podem ser ilustrados por um gráfico de *Gantt* e gráfico de linhas [Armann Ingolfsson, Thomas A. Grossman 2002; De Mesquita e Hernandez 2006].

3 Metodologia

O suplemento implementa um modelo de simulação e foi desenvolvido segundo as determinações metodológicas de Chwif & Medina [2015], e estruturando-se sob três etapas conforme descritas a seguir.

- a) **Concepção modelo:** Estudo dos sistemas de filas M/M/1 e seus conceitos. Delimitou-se as fórmulas conceituais a ser utilizadas e o tratamento dos dados de entrada no sistema (distribuição de Poisson para taxa de chegada e a distribuição exponencial para taxa de serviço);
- b) **Implementação do modelo:** As fórmulas conceituais para modelar um sistema de simulação M/M/1, foram adaptadas a linguagem de macros VBA, objetivando o desenvolvimento de um suplemento ao Microsoft Excel 2016 para fins didáticos. Os testes foram realizados em um computador com processador Intel (R). Core (TM) i5-3210M CPU @ 2.30GHz, memória RAM 8,00 GB com sistema operacional de Windows 10 64 bits. Nesta etapa comparou-se os resultados com o modelo conceitual validando-os;
- c) **Análise dos resultados do modelo:** Após a replicação do modelo considerado, realizou-se uma representação gráfica da fila gerada e atendimento prestado em um gráfico de *Gantt*.

4 Descrição do Problema

Uma simulação apenas produz dados estáveis a partir do momento em que se encontra em regime permanente. Dessa forma, é importante estabilizar a simulação, rodando-a por algum tempo sem que haja coleta de dados até supor que o sistema simulado atingiu condições de estado estável. Esse período que objetiva basicamente atingir uma condição de estado estável para então coletar dados é comumente chamado de período de aquecimento. Existem três possibilidades para se garantir a acurácia dos dados coletados durante o estado em regime permanente:

1. Iniciar a simulação em condições próximas àquela esperada em regime permanente;
2. Simular o modelo por um tempo de simulação extenso;
3. Eliminar valores gerados durante o período transitório.

Uma técnica possível para encontrar o período de aquecimento sistêmico é utilizar uma amostra piloto. Basicamente, extrai-se da população (neste caso, “replicar” o modelo) um número n de amostras e construir o intervalo de confiança do parâmetro desejado. Se a precisão h do intervalo obtido ainda não for menor do que a precisão desejada h^* , então, o número de amostras (replicações) necessário pode ser obtido pela equação 15 [Chwif e Medina 2015].

$$n^* = \left\lceil n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \right\rceil \quad (15)$$

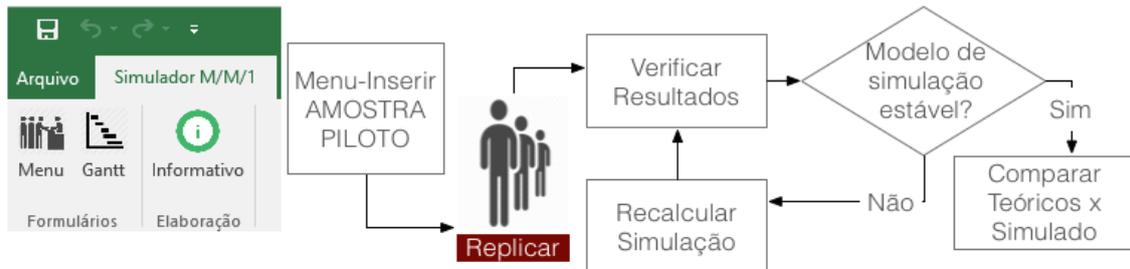
O suplemento do Excel para experimentar simulações de fila, foi desenvolvido com auxílio



da linguagem VBA. A estrutura do modelo comporta um único servidor e condicionamento de fila do tipo *first in, first out* (FIFO), caracterizando-se, como um sistema M/M/1. O conjunto de instruções referente a mensuração dos parâmetros para comparar com resultados do modelo teórico, segue o fluxo proposto na

Figura 3.

Figura 3: Metodologia de simulação



Fonte: Elaborado pelos autores (2017)

Para representar os conceitos apresentados, a elaboração do modelo de simulação das filas M/M/1, incorporou ao núcleo do suplemento as equações de 16 a 23, propostas por Perim [1995] e adaptadas a este experimento e dispostas na Tabela 3.

Tabela 3: Equações do sistema de fila M/M/1 para simulação.

Parâmetros	Representação	
Taxa de chegadas	$r_i = \frac{-\ln(1 - \mu)}{\lambda}$	(16)
Taxa de serviço	$r_i = \frac{-\ln(1 - \mu)}{\mu}$	(17)
Instante de chegada	$a_i = a_{i-1} + r_i$	(18)
Início de atendimento	$b_i = \max(a_i; c_{i-1})$	(19)
Instante do fim do atendimento	$c_i = b_{i-1} + s_i$	(20)
Tempo de espera na fila	$w_i = b_i - a_i$	(21)
Tempo do sistema	$u_i = c_i - a_i$	(22)
Tempo ocioso	$o_i = b_i - c_{i-1}$	(23)
Número aleatório ente 0 e 1	u	(24)

Fonte : Adaptado de Perin [1995]

O suplemento desenvolvido intenciona por experimentação confrontar os resultados obtidos por intermédio da simulação com o modelo teórico – Equações de número 1 a 6, representam o modelo teórico – de modo a validar que as soluções obtidas por uma abordagem de simulação são aproximadas e confiáveis. Os parâmetros do modelo teórico são vertidos para o modelo de simulação por meio das Equações 25 a 30, apresentadas na Tabela 4, que são igualmente incorporadas ao núcleo do aplicativo.

Tabela 4: Equações para simulação do modelo M/M/1

Parâmetros	Representação	Equação	
Taxa de utilização	ρ	$1 - \left(\frac{\sum oi}{ci}\right)$	(25)
N° de clientes no sistema	L	$\left(\frac{\sum ui}{ci}\right)$	(26)



$$\text{N}^\circ \text{ de clientes na fila} \quad Lq \quad \left(\frac{\sum wi}{ci} \right) \quad (27)$$

$$\text{Tempo de serviço} \quad W \quad \left(\frac{\sum ui}{n} \right) \quad (28)$$

$$\text{Tempo Previsto na fila} \quad Wq \quad \left(\frac{\sum wi}{n} \right) \quad (29)$$

$$\text{Probabilidade de que o sistema esteja vazio} \quad Po \quad 1 - \rho \quad (30)$$

Fonte : Adaptado de Prado [2014b] e Perin [1995]

O experimento adota para simular modelo e comparar com o modelo teórico, os seguintes valores de entrada:

- Tempo médio entre chegada, $E(X_1)$; de 1 minuto;
- Tempo médio entre atendimento $E(X_2)$; de 0,5 minuto.

O tempo entre chegadas e tempo de atendimento, foram modelados como variáveis aleatórias com distribuição exponencial. Deste modo, o inverso de $E(X_1)$ e $E(X_2)$, representam, respectivamente, os valores da chegada (λ) e atendimento (μ), por unidade de tempo, conforme as fórmulas 31 e 32.

$$\lambda = \frac{1}{EX_1} \quad (31)$$

$$\mu = \frac{1}{EX_2} \quad (32)$$

Desta forma, a taxa de chegada λ é 1 e o nível de serviço μ é 2. No Modelo de simulação o método da transformada inversa foi, usado para gerar os valores de r_i (Eq. 16) e s_i (Eq. 17), de maneira aleatória.

A análise de um sistema de filas fundamenta-se geralmente no comportamento do sistema em estado de equilíbrio, regime permanente, alcançado após um tempo expressivo de operação do sistema. Assim sendo, é oportuno perguntar: quanto tempo deve-se simular para se obter uma precisão aproximada ou igual aos valores teóricos?

A Equação (15), foi implementada no núcleo do aplicativo. Porém, uma vez que modelos de simulação lidam com números aleatórios, a cada amostra gerada, um desvio padrão distinto também é gerado, implicando em grande variabilidade no tempo de simulação para um mesmo experimento. Como a precisão h do intervalo obtido deve ser menor do que a desejada h^* , para o número de replicações necessárias, considerou-se a precisão desejada h^* igual a um percentual da precisão h , resultando na seguinte expressão:

$$h^* = (h - (\text{Percentual almejado}) \cdot h) \quad (33)$$

A Equação 33, absorve a variabilidade no número de replicações a cada amostra gerada. Desse modo, quanto maior o percentual almejado, menor será h^* em relação a h , elevando o número de replicações e consequentemente, a precisão da simulação. Considerando que sempre que ρ tende para 1, a fila tende a aumentar infinitamente. Sistemas estáveis restringem $\lambda < \mu$ ou $\rho < 1$. Assim, é válido ressaltar que quanto mais ρ se aproximar de 1, mais elevado será o “percentual almejado” para se obter uma precisão adequada na simulação.

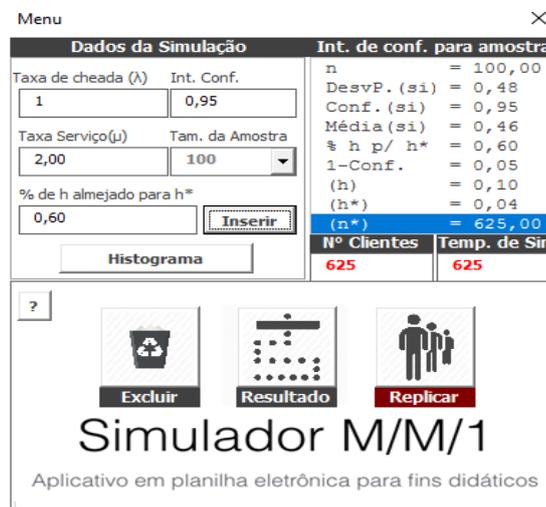
5 Experimentos e Discussão dos Resultados

Adotou-se 0,6 como “percentual almejado”, sendo $h > h^*$ se faz necessário aumentar o tempo de simulação a partir da amostra-piloto, sendo sugerido aproximadamente 625 minutos de simulação – como a taxa de chegadas é igual 1, o número usuários “ n ” fica próximo do tempo de simulação – para estabilização do modelo de simulação. A Figura 4, apresenta uma adaptação dos parâmetros



de cálculo da Equação 15.

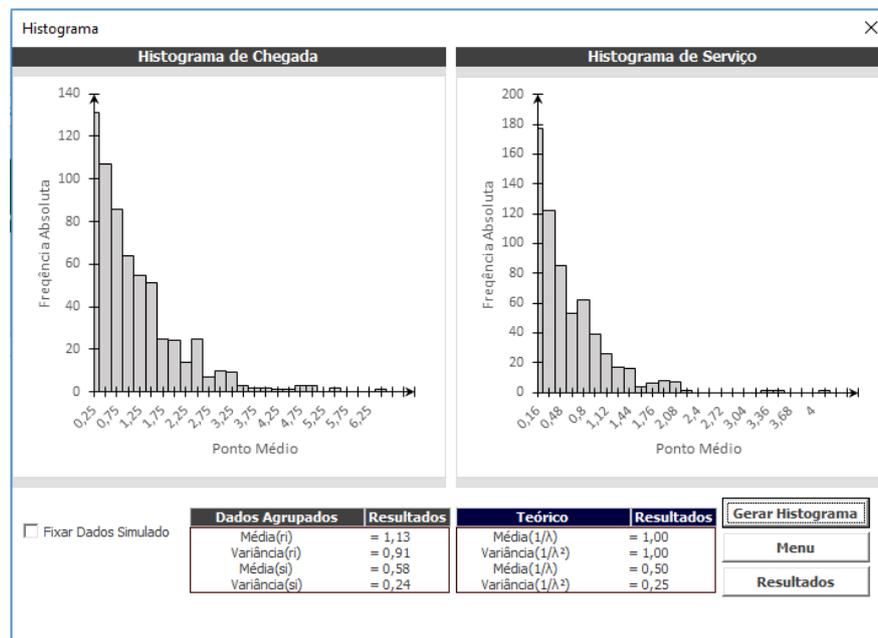
Figura 4: Tela do menu



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Após a replicação, pôde-se observar os histogramas dos tempos entre chegadas e tempos de serviço, gerados na simulação (Figura 5) para avaliar comparativamente os tempos entre chegadas e atendimentos, gerados pela simulação com os valores encontrados no modelo teórico.

Figura 5: Tela histograma



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Aplicando as fórmulas do modelo teórico exponencial, tem-se a média = $1/\lambda$ e variância = $1/\lambda^2$. Os histogramas são gerados no núcleo do aplicativo a partir dos dados de r_i e s_i agrupados em tabelas de frequência com intervalos de classe. Comparativamente, r_i apresentou uma média de 1,13 versus 1,00 no teórico e variância de 0,91 versus 1,00 no teórico. Da mesma forma, s_i apresentou uma média de 0,58 versus 0,50 no teórico e variância de 0,24 versus 0,25 no teórico.



Na sequência, os resultados da simulação podem ser confrontados com o modelo teórico na Figura 6.

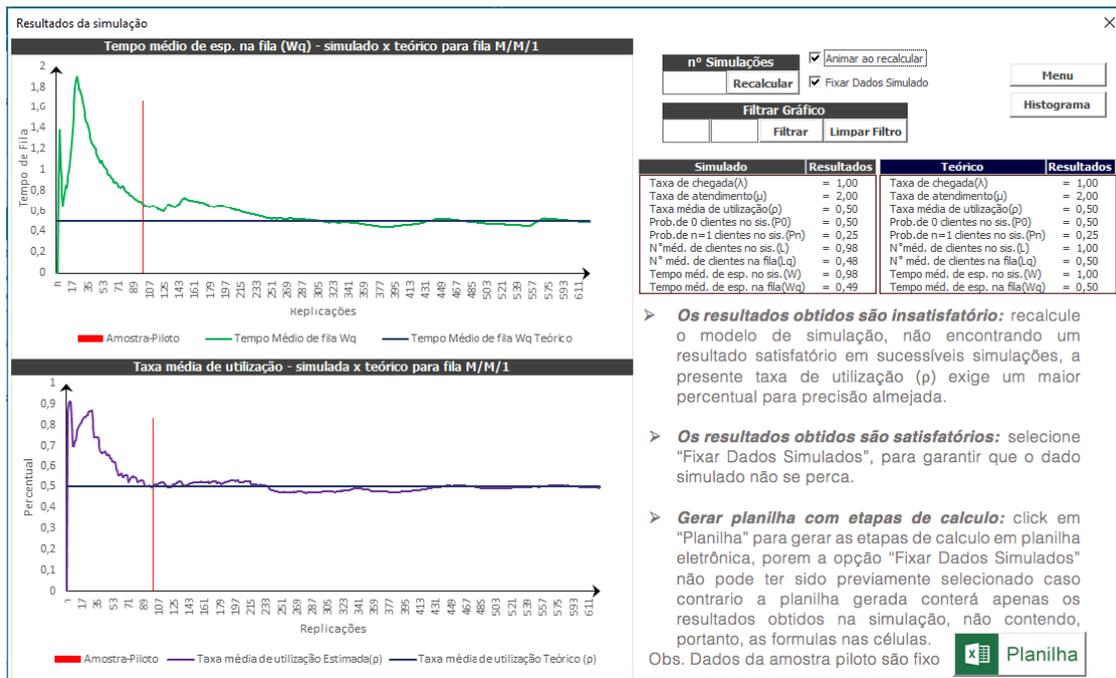
Figura 6: Valores simulados e valores teóricos

Simulado	Resultados	Teórico	Resultados
Taxa de chegada(λ)	= 1,00	Taxa de chegada(λ)	= 1,00
Taxa de atendimento(μ)	= 2,00	Taxa de atendimento(μ)	= 2,00
Taxa média de utilização(ρ)	= 0,50	Taxa média de utilização(ρ)	= 0,50
Prob.de 0 clientes no sis. (P_0)	= 0,50	Prob.de 0 clientes no sis. (P_0)	= 0,50
Prob.de n=1 clientes no sis. (P_n)	= 0,25	Prob.de n=1 clientes no sis. (P_n)	= 0,25
N° méd. de clientes no sis. (L)	= 0,98	N° méd. de clientes no sis. (L)	= 1,00
N° méd. de clientes na fila(L_q)	= 0,48	N° méd. de clientes na fila(L_q)	= 0,50
Tempo méd. de esp. no sis. (W)	= 0,98	Tempo méd. de esp. no sis. (W)	= 1,00
Tempo méd. de esp. na fila(W_q)	= 0,49	Tempo méd. de esp. na fila(W_q)	= 0,50

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Os gráficos na Figura 7, referentes ao tempo médio de fila e ocupação do servidor, demonstram que o tempo estipulado de simulação foi suficiente para convergir o resultado simulado ($W_q = 0,49$ e $\rho = 0,50$, ao teórico $W_q = 0,50$ e $\rho = 0,50$), alcançados, portanto, no regime estável.

Figura 7: Tela resultados



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

As representações gráficas de simulações de filas de planilhas, podem ser usadas para ensinar sobre filas e processos de enfileiramento dentro de um conceito de produção de objetos de aprendizagem, materiais digitais reutilizáveis. Um gráfico de clientes, mostra a experiência individual de cada cliente na fila, considerando o momento de chegada, início e fim de atendimento, e mostrando claramente o tempo de fila e tempo de serviço para cada cliente.

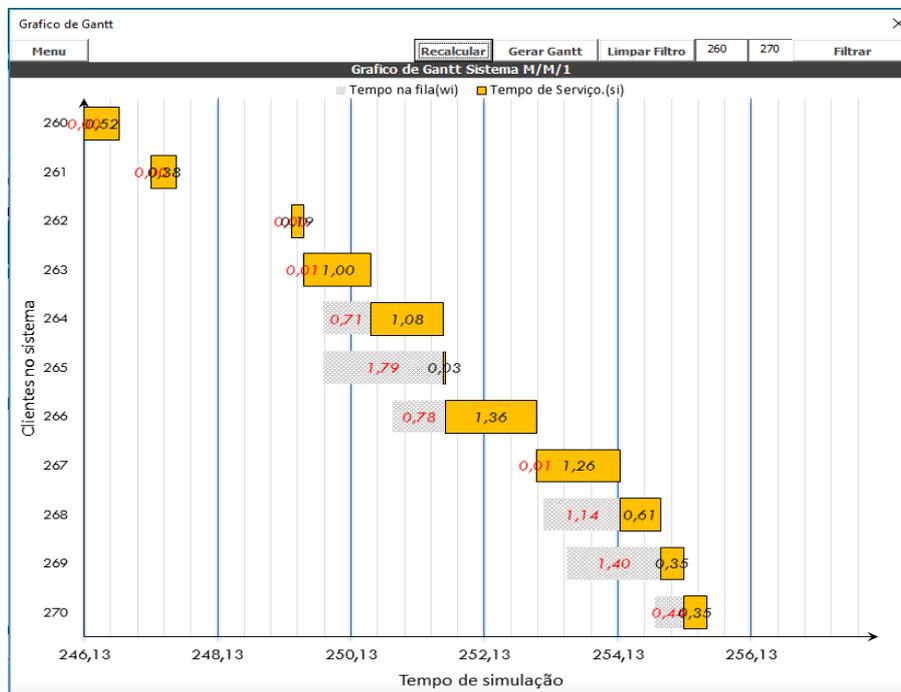
O efeito cumulativo exerce uma influência sob o comportamento da fila, ilustrando como um longo tempo de serviço pode causar atrasos para muitos clientes. A forma encontrada para representação gráfica do servidor foi o gráfico de *Gantt*, Figura 8, que mostra a experiência do servidor, ilustrando como os clientes se acumulam e a natureza dos períodos de ociosidade.

O gráfico está interligado à simulação da planilha e é atualizado instantaneamente quando a simulação é rodada. Os gráficos ilustram a evolução completa da fila permitindo assim fornecer



uma visão dinâmica da fila, podendo este ser filtrado entre intervalos específicos. Eles podem ser usados para ensinar os alunos sobre a natureza das filas e apoiar o aprendizado ativo onde os alunos articulam por si mesmos a causa dos comportamentos de fila.

Figura 8: Resultado da simulação no gráfico de *Gantt*



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

6 Considerações finais

O trabalho tem uma implementação bastante simplificada e é útil para testar cenários hipotéticos. Foi possível mostrar a influência da calibração de alguns parâmetros que afetam a qualidade dos resultados em um modelo de simulação.

O suplemento pode ser utilizado no ensino de sistemas de filas, permitindo a criação de cenários e variações dos parâmetros: taxa de chegada e taxa de atendimento. Assim, toda a dinâmica da fila poderá ser visualizada por meio do gráfico de *Gantt*. O presente artigo não demonstra a realização da implementação do suplemento e etapas de cálculos, porém, isto pode ser verificado obtendo o suplemento no link abaixo (possíveis erros serão corrigidos, sempre que notificado):

- <https://drive.google.com/drive/folders/0Bw8wBFyJH0mWc25SdE9maE4wRDg?usp=sharing>

Este suplemento pode evoluir para apresentar outros modelos de filas.

7 Referências

Akhavian R., e Behzadan A. H. (2014) Evaluation of queuing systems for knowledge-based simulation of construction processes. *Automation in Construction*, 47, 37–49. doi:10.1016/j.autcon.2014.07.007

Arenales M. ... Yanasse H. (2011) *Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia*. (Campus-ABEPRO, Eds) Elsevier Editora. 2011, Rio de Janeiro.



- Armann Ingolfsson, Thomas A. Grossman J. (2002) Graphical Spreadsheet Simulation of Queues. *INFORMS Transactions on Education*, (January 2014), 72–85. doi:10.1287/ited.5.3.8
- Artalejo J. R. ... Lopez-Herrero M. J. (2007) Algorithmic approximations for the busy period distribution of the M/M/c retrial queue. *European Journal of Operational Research*, 176(3), 1687–1702. doi:10.1016/j.ejor.2005.10.034
- Boshkoska B. M. ... Damij N. (2015) Abdominal surgery process modeling framework for simulation using spreadsheets. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 121(1), 1–13. doi:10.1016/j.cmpb.2015.05.001
- Chubachi I. S., e Gomes L. P. (2016) Teoria das filas: um estudo de caso. *Regit*, 5(1).
- Chwif L., e Medina A. C. (2015) *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações*. (Edição: 4^a). Elsevier.
- Goldsman D. ... Wilson J. R. (2010) A Brief History Of Simulation Revisited.
- Hillier F. S., e Lieberman G. J. (2013) *Introdução a Pesquisa Operacional*. (A. E. Ltda, Ed) (9^o ed). McGraw-Hill Higher Education, Porto Alegre – RS.
- Krivitsky P. N. (2016) Using contrastive divergence to seed Monte Carlo MLE for exponential-family random graph models. *Computational Statistics & Data Analysis*, (xxxx), 1–13. doi:10.1016/j.csda.2016.10.015
- Lindley D. V. (1952) The Theory of Queues with a Single Server. *Proceedings Cambridge Philosophy Society*, (October), 277–289. doi:10.1017/S0305004100027638
- Mesquita M. A. De, e Hernandez A. E. (2006) Discrete-event simulation of queues with spreadsheets: A teaching case. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, (December 2006), 2277–2283. doi:10.1109/WSC.2006.323053
- Michel I. ... Uepa S. (2011) Estudo para A Comparação Entre Os Modelos De Filas M / M / C E M / Ek / C Aplicada Em Uma Panificadora., 1–12.
- Moore J. H., e Weatherford L. R. (2005) *Tomada de decisão em administração com planilhas eletrônicas*. Bookman.
- Perim C. F. (1995) *Introdução À Simulação de Sistemas*. (Ed. da Uni.). Campinas.
- Prado D. (2014a) *Usando o Arena em Simulação*. (Falconi, Ed). 2014, Belo Horizonte (MG).
- Prado D. (2014b) *Teoria das Filas e da Simulação*. (Falconi, Ed) *Belo Horizonte, MG: Editora de Desenvolvimento ...* (5^o ed, Vol. 2).
- Salvador H.-G. ... Antonio V.-L. J. (2015) Propiedades de sistemas tipo M/G/1/K con estaciones en serie. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(3), 345–354. doi:10.1016/j.riit.2015.05.006
- Sana A. (2017) Teaching fundamental concepts of coastal engineering using excel spreadsheet. *Computer Applications in Engineering Education*, 25(2), 304–310. doi:10.1002/cae.21798
- Viti F., e van Zuylen H. J. (2010) Probabilistic models for queues at fixed control signals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(1), 120–135. doi:10.1016/j.trb.2009.05.001

