

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
INSTITUTO DE CIÊNCIA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA, AMBIENTE E SOCIEDADE

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO PRODUTIVO DE MASSA DE
ROSCA DE PADARIA UTILIZANDO O *SOFTWARE* ARENA**

Pedro Ramalho Figueirêdo

Teófilo Otoni

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
INSTITUTO DE CIÊNCIA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO PRODUTIVO DE MASSA DE
ROSCA DE PADARIA UTILIZANDO O *SOFTWARE* ARENA**

Pedro Ramalho Figueirêdo

Orientador(a):

Prof. Dr. Alexandre Faissal Brito

Co-orientador(a):

Profa. Dra. Jaqueline Maria da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação Mestrado em Tecnologia, Ambiente
e Sociedade, como requisito para obtenção de
grau de Mestre.

Teófilo Otoni

2021

Catálogo na fonte - Sisbi/UFVJM

F475 Figueirêdo, Pedro Ramalho
2022 Simulação Computacional do Processo Produtivo de Massa de
Rosca de Padaria Utilizando o Software Arena [manuscrito] /
Pedro Ramalho Figueirêdo. -- Teófilo Otoni, 2022.
83 p. : il.

Orientador: Prof. Alexandre Faissal Brito.
Coorientador: Prof. Jaqueline Maria da Silva.

Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia, Ambiente
e Sociedade) -- Universidade Federal dos Vales do
Jequitinhonha e Mucuri, Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia, Ambiente e Sociedade, Teófilo Otoni, 2021.

1. Modelagem computacional. 2. Otimização. 3. Padaria. I.
Brito, Alexandre Faissal. II. Silva, Jaqueline Maria da. III.
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. IV.
Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

PEDRO RAMALHO FIGUEIRÊDO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO PRODUTIVO DE MASSA DE ROSCA DE PADARIA UTILIZANDO O SOFTWARE ARENA

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em **Tecnologia, Ambiente e Sociedade** da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, nível de **Mestrado**, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Tecnologia, Ambiente e Sociedade**.

Orientador: **Prof. Dr. Alexandre Faissal Brito**

Coorientadora: **Prof. Dra. Jaqueline Maria da Silva**

Data de aprovação 05/11/2021.

Dr. Alexandre Faissal Brito (UFVJM, presidente da Banca)

Dra. Jaqueline Maria da Silva (UFVJM, Coorientadora)

Dr. Ivan Carlos Carreiro Almeida (IFNMG)

Dr. Mauro Lúcio Franco (UFVJM)

Dr. Rafael Alvarenga Almeida (UFVJM)



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Alvarenga Almeida, Servidor**, em 05/11/2021, às 09:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **IVAN CARLOS CARREIRO ALMEIDA, Usuário Externo**, em 05/11/2021, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jaqueline Maria da Silva, Servidor**, em 05/11/2021, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauro Lucio Franco, Servidor**, em 08/11/2021, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Faissal Brito, servidor (a)**, em 04/02/2022, às 14:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufvjm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0509039** e o código CRC **EC636E4E**.

Dedico aos meus pais, pois é graças aos seus esforços que hoje posso concluir este trabalho.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, por ter me dado esta oportunidade única.

Aos meus pais, Gilberto e Geovane, por todo o suporte imprescindível para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Professor Dr. Alexandre Faissal e Professora Dra. Jaqueline Silva pela paciência, ensinamentos e apoio.

A todos os meus amigos e colegas que compartilharam os momentos de dificuldades e alegrias durante este período.

Agradeço também a todo o pessoal da padaria, que tornou todo este trabalho possível.

A todos estes e muitos outros, ficam os meus sinceros e eternos agradecimentos. Obrigado.

RESUMO

A simulação computacional é uma ferramenta com o potencial de gerar uma grande redução de custos operacionais, visto que é possível modelar um processo em ambiente controlável, testar modificações e analisar os resultados, sem necessariamente alterar a estrutura real do processo produtivo. Pequenas e médias empresas buscam novas vias de desenvolvimento com foco a novas fontes de vantagem competitiva, e a simulação pode ser uma delas. Neste trabalho, buscou-se identificar os processos produtivos envolvidos na produção de uma padaria no município de Itambacuri/MG, escolher um desses processos e a partir do uso de simulação computacional com o *software* Arena, propor caso haja, melhorias e otimizações para a sua maximização produtiva. O produto escolhido como estudo foi a massa de rosca. Foram coletados dados referentes a cada processo de todos os produtos gerados pela massa. Para cada processo estocástico, são obtidos seus tempos de operação com o uso de um cronômetro em visita *in loco*. O modelo computacional construído foi verificado e validado com sucesso em comparação com dados do processo real. Através dos resultados da simulação, foi possível identificar os gargalos no sistema e propôr alternativas para a otimização do processo produtivo. Os resultados apontam que a utilização de um padeiro a mais durante o gargalo do sistema pode promover uma redução de até 24% no tempo de produção da massa.

Palavras-chave: modelagem computacional, otimização, padaria

ABSTRACT

Computer simulation is a tool with the potential to generate a large cost reduction for companies, since it is possible to model a process in a controllable environment, test modifications and analyze the results, without the necessity of changing the real production process. Small and medium-sized companies are looking for new development paths with a focus on new sources of competitive advantage, and simulation may be one of them. In this work, we sought to identify the processes involved in the production of a bakery in the city of Itambacuri / MG (Brazil), choose one of these processes and with the use of computer simulation with *software* Arena, propose if there are, improvements and optimizations for the production maximization. The product chosen for the study was the braided bread dough. Data were collected for each process of all products generated by the dough. For each stochastic process, its operating times are obtained with the use of a stopwatch during visit *in loco*. The simulation model built was verified and validated with success in comparison with real data. Through the results of the simulation, it was possible to identify bottlenecks in the system and propose alternatives for the optimization of the production process. The results indicate that the use of one more baker during the bottleneck of the system can promote a reduction of up to 24% in the dough production time.

Key-words: computer simulation, optimization, bakery

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 Justificativa	4
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Estado da Arte	5
2.2 Teoria das Filas	6
2.3 A Simulação Computacional	10
2.3.1 Etapas de um Estudo de Simulação	14
2.4 O Arena	16
2.4.1 Módulos de Modelagem Computacional	18
2.4.2 Condições de Simulação	21
2.4.3 <i>Input Analyzer</i>	21
2.4.3.1 Normal ($\mu; \sigma$)	23
2.4.3.2 Uniforme ($a; b$)	24
2.4.3.3 Triangular ($a; m; b$)	24
2.4.3.4 Exponencial (β)	25
2.4.3.5 Lognormal ($\mu; \sigma$)	26
2.4.3.6 Erlang ($\beta; k$)	27
2.4.3.7 Gama ($\beta; \alpha$)	28
2.4.3.8 Beta ($\beta; \alpha$)	29
2.4.3.9 Weibull (a, b)	30
2.4.3.10 Constante (a)	31
3 METODOLOGIA DE PESQUISA	33
3.1 Classificação da Pesquisa	33
3.2 Etapas da Pesquisa	34
3.3 Escolha do Produto a ser Estudado	34
3.4 Coleta de Dados	35
3.5 Tamanho de Amostra	36
3.6 Filtro de <i>Outliers</i>	37
4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS	39
4.1 Tratamento dos Dados de Entrada	39

4.2	Verificação e Validação	40
4.3	Simulação e Número de Replicações do Modelo	40
4.4	Comparação de Resultados	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	O Modelo Computacional	43
5.1.1	Processos Envolvidos na Massa de rosca	43
5.1.2	Elaboração do Modelo	48
5.1.3	Verificação e Validação	57
5.2	Análise do Modelo	58
5.3	Cenário com três padeiros	61
5.4	Análise econômica	61
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS	67
	ANEXO A – RELATÓRIO GERAL DE RESULTADO DE SIMULAÇÃO GERADO PELO ARENA	71
	ANEXO B – APROVAÇÃO DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA	77

1 INTRODUÇÃO

A Gartner (2020), empresa de consultoria tecnológica internacional, classifica a simulação computacional (mais especificamente o *digital twin*) como um dos grandes pilares da Indústria 4.0 (ou quarta revolução industrial). Segundo a LEAP (2020), *Leading Engineering Application Providers*, esta emergente transformação foi desencadeada por tendências tecnológicas globais que permitem a convergência de sistemas físico-digitais, causando transformações massivas na maneira como os fabricantes criam, prestam serviços de manutenção e operam seus novos produtos inteligentes e conectados, envolvendo conceitos como *big data*, *internet of things* e *machine learning*.

Este tipo de ferramenta contribui na tomada de decisão dos gestores. Modelos virtuais completos podem ser criados com o auxílio de um computador, e a partir do mesmo, pode-se por exemplo alterar o processo produtivo de um determinado produto ou variar o número de funcionários operando em um dado momento e observar os impactos nos custos e produtividade (KELTON et al., 2003). E isso sem alterar o processo real de fato. O gasto com este tipo de análise é geralmente pequeno quando comparado com a grande possibilidade de ganhos que pode se suceder de sua aplicação.

O cenário competitivo dos setores comercial e industrial vem sofrendo mudanças radicais nos últimos anos com o advento da inovação tecnológica, globalização dos mercados, exigência de qualidade, menores prazos de entrega e níveis de customização. Pequenas e médias empresas buscam novas vias de desenvolvimento capazes de lidar com a complexidade crescente do ambiente de negócios e garantir acesso a novas fontes de vantagem competitiva (ESPOSITO et al., 2009).

Oliveira (2008) afirma que a busca da competitividade no atendimento às necessidades do cliente final tem gerado a necessidade de melhor organizar os processos de produção e logística, tornando mais ágil toda a cadeia do processo produtivo. A busca por um processo produtivo bem estruturado, com baixos níveis de estoques intermediários, maior produtividade e menores prazos de entrega, tem sido o principal desafio imposto às empresas.

O avanço da internet e o conseqüente acesso fácil à informação permitiu que tecnologias como a simulação computacional não ficassem restritas a setores de engenharia de grandes empresas.

Padarias são exemplos de pequenas e médias indústrias com cadeias produtivas que

podem ser beneficiadas com a simulação computacional. Estes empreendedores vêm buscando novas vias de desenvolvimento capazes de lidar com a complexidade crescente do ambiente de negócios e garantir acesso a novas fontes de vantagem competitiva.

Sobre a situação das padarias no Brasil o SEBRAE (2017), Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, traz alguns dados importantes para o ano de 2016, ressaltando a importância deste setor produtivo:

- a panificação está entre os seis maiores segmentos da indústria do Brasil, com participação de 36% na indústria de produtos alimentares;
- aproximadamente 63,2 mil panificadores fazem parte do mercado de panificação no Brasil, dessas, 60 mil são micro e pequenas empresas (95%);
- o setor gerou mais de 700 mil empregos diretos, sendo 245 mil (35%) envolvidos diretamente na produção;
- 76% dos brasileiros consomem pão no café da manhã e 98% consomem produtos panificados.

O SEBRAE (2017) aponta ainda algumas dificuldades enfrentadas pelo setor. Dentre elas, destacam-se a baixa produtividade e a concorrência predatória (o maior contra o menor) e desigual.

A ABIP (2020), Associação Brasileira da Indústria de Panificação e Confeitaria, afirma que muitas empresas tradicionais ainda não se atentaram para a necessidade de modernização de seus modelos, contribuindo para quedas em suas produções. Mas as empresas que buscam se atualizar, incorporar novos serviços, qualidade, frescor e diferenciação em seus produtos conseguiram se permanecer no mercado.

As padarias brasileiras precisam reavaliar suas produtividades, *layout*, receitas, qualidade de matéria-prima e processos. O momento é de adequar com novas tecnologias, inovações, qualidade, criatividade e marketing. Inovação e renovação são boas dicas para as padarias (ABIP, 2020).

A proposta deste trabalho é a de realizar um estudo de modelagem computacional em uma padaria de pequeno porte no município de Itambacuri / MG, com o intuito de otimizar os seus processos produtivos.

O *software* escolhido foi O Arena¹. Ele faz parte do grupo de *softwares* mais conhecidos na área de simulação computacional e é altamente difundido e utilizado em empresas por todo o mundo. Sua facilidade de utilização, junto à extensa qualidade bibliográfica existente em livros e tutoriais, torna a sua escolha bem atraente.

De posse de dados referentes aos processos produtivos coletados *in loco*, um modelo computacional foi criado, a fim de identificar os gargalos no sistema e apresentar possíveis otimizações para a empresa, como por exemplo, realocação de funcionários, posicionamento de máquinas, redução de filas de tempo de espera nas mesmas ou aquisição de máquinas mais eficientes.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

Objetivou-se com este trabalho identificar os processos produtivos envolvidos na produção de uma padaria a partir do uso de simulação computacional com o *software* Arena e propor, caso haja, melhorias e otimizações para a maximização produtiva destes processos.

Objetivou-se com este trabalho avaliar os processos produtivos envolvidos na produção de uma padaria e criar um modelo computacional propondo melhorias e otimizações para a maximização produtiva destes processos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar as demandas e o sistema produtivo da padaria;
- Identificar o fluxo de produção e as etapas envolvidas no processo produtivo;
- Obter os dados de entrada referentes ao processo produtivo para o modelo computacional;
- Criar o modelo computacional com base nos dados de entrada obtidos;
- Verificar e validar o modelo computacional;
- Identificar gargalos no sistema e apresentar possíveis sugestões de otimização.

¹<https://www.arenasimulation.com/>

1.2 Justificativa

Muitas padarias podem ser beneficiadas com a simulação computacional. Os empreendedores vêm buscando novas vias de desenvolvimento capazes de lidar com a complexidade crescente do ambiente de negócios e garantir acesso a novas fontes de vantagem competitiva (ABIP, 2020).

Segundo Kelton et al. (2003), o custo para a criação de um modelo computacional de qualidade é geralmente baixo quando comparado ao grande potencial de ganhos que se pode conseguir. Em vista disso, é uma oportunidade de baixo risco que pode mudar totalmente os negócios de um empreendimento, se bem utilizada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem o objetivo de realizar uma breve introdução à simulação computacional, seus métodos, requisitos e como o *software* Arena realiza esta implementação no computador.

Para isso, é apresentado a teoria das filas, conceito precursor para o entendimento dos modelos simulacionais utilizados atualmente. Em seguida, são apresentados os tipos de modelos computacionais, suas características e as etapas de um estudo de simulação. O *software* é apresentado então com um tutorial básico de utilização, explanando os módulos mais utilizados. Junto a isso, é feita uma breve apresentação das principais curvas de distribuição probabilísticas utilizadas pelo Arena, através de seu módulo *Input Analyzer*, para tratamento dos dados de entrada.

A seguir são apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura semelhantes a este, que obtiveram resultados promissores com a aplicação de tecnologias de simulação computacional.

2.1 Estado da Arte

Iannoni e Morabito (2002) desenvolveram um modelo em Arena do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar da Usina São Martinho, em Pradópolis (SP), considerada a maior processadora deste produto do mundo. O processo envolve vários tipos de caminhões e diversas moedas para o processamento do produto. Uma potencial proposta de otimização foi identificada envolvendo uma melhor distribuição do atendimento dos veículos, resultando em uma redução de 13,5% na quantidade média de cana em espera e aumento percentual de 1,1% na quantidade de cana moída.

Pergher, Vaccaro e Pradella (2013) realizaram um estudo de caso em uma panificadora envolvendo diversos produtos, com a finalidade de determinar sua capacidade produtiva. Cenários hipotéticos de otimização no Arena foram sugeridos e os principais resultados obtidos referem-se à adequação da capacidade dos equipamentos para atendimento da demanda. Um rearranjo na utilização dos equipamentos no modelo promoveu um aumento de até 100% na produtividade de alguns dos produtos.

Hecker, Hussein e Becker (2010) criaram um modelo de simulação em Arena analisando

dez diferentes produtos de uma pequena panificadora em Estugarda, Alemanha. Os autores identificaram alguns períodos de baixa utilização de alguns dos maquinários, e tempos de ociosidade excessivos de funcionários. Após processos iterativos de alternativas de simulação, um modelo otimizado foi obtido com uma reorganização dos tempos de início dos processos e uma melhor utilização dos fornos (vários produtos de uma só vez). Os funcionários teriam turnos fixos planejados de descanso, diminuindo a ociosidade em até 55 minutos, resultando em uma possível redução de até 19% de gastos com salário dos mesmos.

Wachholz (2013) estudou especificamente o processo de produção de pão francês em uma padaria em Matelândia/PR. Após simulação de modelo no Arena, chegou-se a duas propostas de otimização: uma com pouco investimento, realocando um funcionário de outro setor para a máquina modeladora somente em seu horário de uso em determinada etapa do processo; a outra com um investimento maior, através da criação de uma linha específica para o produto e aquisição de novos funcionários, resultando em tempos de produção ainda menores (cerca de 24%).

Santos et al. (2014) criaram um modelo no *software* livre brasileiro URURAU do processo produtivo de cucas, de uma panificadora em Medianeira/PR. O gargalo do sistema foi identificado no processo de crescimento da massa, sendo sugerido a aquisição de uma estufa para reduzir o tempo de crescimento e auxiliar no controle de temperatura e umidade, resultando em uma economia em torno de 24% do tempo de produção.

Rezende et al. (2010) utilizaram o Arena para avaliar os tempos médios de espera em filas de atendimento de uma panificadora em Goiânia/GO. Cenários de simulação foram testados e chegou-se à conclusão que a aquisição de mais três funcionários (atualmente são sete) eliminaria o gargalo do sistema e reduziria o tempo médio de espera em 89,2%.

2.2 Teoria das Filas

A teoria das filas é um método analítico para modelagem de sistemas. Para situações isoladas e bem controladas, este método geralmente é exato e suficiente para o estudo de otimização de problemas envolvendo filas.

Segundo Arenales et al. (2007), a teoria das filas é um ramo da Pesquisa Operacional que estuda as relações entre as demandas em um sistema e os atrasos sofridos pelos usuários deste sistema. A formação de filas ocorre se a demanda excede a capacidade do sistema de

fornecer o serviço em um certo período. A metodologia auxilia no projeto e na operação dos sistemas para encontrar um balanceamento adequado entre os custos dos atrasos sofridos pelos usuários do sistema.

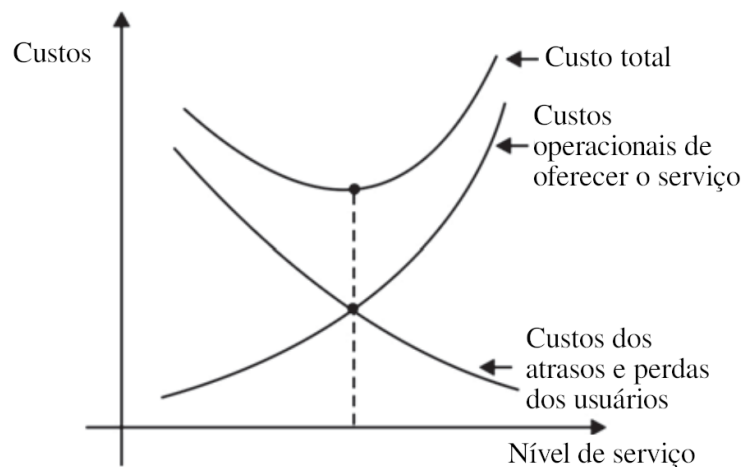
Prado (2010) aponta que esta abordagem matemática surgiu no início do século XX, na Dinamarca com A. K. Erlang, no estudo de um problema de dimensionamento de centrais telefônicas. A partir da Segunda Guerra Mundial, começou a ser aplicada em outros diversos problemas que envolvem filas.

Fogliatti e Mattos (2007) afirmam que a teoria das filas é uma modelagem analítica de um sistema ou processo em que ocorre espera, com o objetivo de determinar algumas quantidades, que são chamadas de medidas de desempenho. Tais medidas podem representar a produtividade ou a operacionalidade do processo em estudo.

Algumas medidas que podem ser determinadas são: o número de clientes em espera na fila, o tempo médio de atendimento do posto de atendimento ou o tempo ocioso dos prestadores de serviço. As medidas de desempenho do sistema permitem tomar decisões que incluem manter um sistema operando como está ou ampliá-lo, além de permitir o dimensionamento de infraestrutura, recursos humanos, financeiros, equipamentos e instalações, com a intenção de melhorar o desempenho global do processo (FOGLIATTI; MATTOS, 2007).

Segundo Arenales et al. (2007), em uma empresa do setor produtivo a relação entre custos para o usuário e custos para a gerência pode ser representado pelo gráfico da Figura 2.1.

Figura 2.1: Custos gerenciais e de usuário.



Fonte: Arenales et al. (2007). Adaptado.

Os custos totais podem ser representados como a soma dos custos operacionais com os custos de atrasos e perdas dos usuários (ARENALES et al., 2007).

À medida que se aumenta o nível de qualidade do serviço, o custo operacional é elevado e o custo de atraso é reduzido, conforme a Figura 2.1.

O correto dimensionamento do processo de atendimento deve levar em consideração esses custos, para que não seja prejudicial a nenhum dos lados. Existe um ponto de equilíbrio que fornece uma quantidade razoável de postos de atendimento, que não resultam em um custo tão elevado para a gerência nem para o usuário. A teoria das filas auxilia empresas a encontrar esse ponto (FOGLIATTI; MATTOS, 2007).

A formulação da teoria das filas varia bastante a depender do tipo de sistema de fila envolvido no problema.

Segundo Arenales et al. (2007), uma notação bastante utilizada na teoria das filas é a de Kendall-Lee. Esta obedece a seguinte expressão composta de seis características: $A/B/M/C/K/N$.

A primeira característica A refere-se à distribuição de probabilidade do processo de chegada (intervalos de tempo entre chegadas sucessivas), podendo ser determinística ($A = D$) ou probabilística, obedecendo a uma curva de distribuição probabilística (exemplo: $A = M$ para distribuição exponencial - markoviano). A seção *Input Analyzer* deste capítulo apresenta com mais detalhes as curvas de distribuição geralmente mais utilizadas.

A característica B é semelhante à característica A , porém aplicada ao processo de serviço (tempos de serviço).

A característica M indica o número de servidores em paralelo, ou seja, o número de postos de atendimento.

A característica C especifica a disciplina da fila ou ordem de atendimento. As quatro mais utilizadas segundo Fogliatti e Mattos (2007) são:

- FIFO (*first in - first out*): atendimento em ordem de chegada. O primeiro que entra na fila é o primeiro a ser atendido.
- LIFO (*last in - last out*): o último que chega na fila é o primeiro que sai. Ordem contrário à anterior.
- PRI (*priority service*): o atendimento por prioridade obedece às regras estabelecidas pela

gerência. Exemplo: pacientes em estado mais grave são atendidos primeiro em um hospital.

- SIRO (*service in random order*): o atendimento é de forma aleatória, independente da ordem de chegada ou prioridade.

A quinta característica K indica o número máximo de usuários no sistema e a sexta característica N indica o tamanho da população. Em casos de sistema de capacidade ilimitada e de população infinita, essas características podem ser omitidas da notação (ARENALES et al., 2007).

Como exemplo tem-se o caso trivial $M/M/1/GD/\infty/\infty$. Este modelo admite que os intervalos de tempo entre as chegadas são exponencialmente distribuídos, com um único servidor, disciplina de fila qualquer (GD), sem limitação para o tamanho da fila e nem para o tamanho da população de usuários. Esta notação pode ser reduzida para $M/M/1$.

Segundo Bhat (2015), a fila $M/M/1$ é o mais simples dos modelos de filas usados na prática. As chegadas são consideradas como ocorrendo em um processo de Poisson com taxa λ . Isso significa que o número de clientes $N(t)$ chegando durante um intervalo de tempo $(0, t]$ tem uma distribuição Poisson:

$$P[N(t) = j] = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^j}{j!}; \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

Os tempos entre chegadas têm uma distribuição exponencial com densidade de probabilidade (BHAT, 2015):

$$a(x) = \lambda e^{-\lambda x}; \quad x > 0 \quad (2.2)$$

Assume-se que os tempos de atendimento têm uma distribuição exponencial com densidade de probabilidade (BHAT, 2015):

$$b(x) = \mu e^{-\mu x}; \quad x > 0 \quad (2.3)$$

Assim, tem-se que:

$$E(\text{tempo entre chegadas}) = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\text{taxa de chegada}} \quad (2.4)$$

$$E(\text{tempo de serviço}) = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\text{taxa de serviço}} \quad (2.5)$$

A relação entre a taxa de chegada e a taxa de serviço desempenha um papel significativo na medição do desempenho dos sistemas de filas (BHAT, 2015).

$$\rho = \text{Taxa de utilização} = \frac{\text{taxa de chegada}}{\text{taxa de serviço}} \quad (2.6)$$

O número de entidades esperando na fila L_q pode ser encontrado pela equação 2.7 (BHAT, 2015):

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad (2.7)$$

O tempo estimado esperado na fila por cada entidade W_q é calculado pela equação 2.8 (BHAT, 2015):

$$W_q = \frac{\lambda}{\rho(\rho - \lambda)} \quad (2.8)$$

Estas são algumas das informações que podem ser obtidas pela teoria das filas para o caso $M/M/1$.

Apesar da enorme contribuição deste estudo para a pesquisa operacional, inúmeros problemas não são adequadamente resolvidos em decorrência de elevadas complexidades matemáticas. Nestas situações, a simulação computacional pode ser utilizada na tentativa de busca de uma solução aproximada para o problema em questão.

2.3 A Simulação Computacional

Banks (2005) descreve a simulação como a imitação da operação de um processo do real ou sistema ao longo do tempo. O comportamento deste processo e como evolui ao longo do tempo é estudado por meio do desenvolvimento de um modelo computacional.

O modelo toma a forma de um conjunto de premissas acerca do sistema, expressas em relações matemáticas, lógicas e simbólicas entre entidades ou objetos de interesse do sistema. Depois de desenvolvidos, verificados e validados, o modelo pode ser utilizado para investigar grandes quantidades de cenários hipotéticos de otimização (BANKS, 2005).

A simulação teve início na década de 60, graças ao avanço dos microcomputadores e linguagens de programação. Na década de 80 com o avanço na simulação visual, seu uso teve uma boa aceitação, em virtude de sua maior capacidade de comunicação e seu menor nível de complexidade. Algumas dos *softwares* de simulação computacional mundialmente conhecidos hoje são: GPSS *General Purpose Simulation System*, GASP *General Activity Simulation Program*, SIMSCRIPT, SIMAN, Arena, PROMODEL, AUTOMOD e TAYLOR (PRADO, 2010).

Simulações computacionais são utilizadas em inúmeros setores, desde experimentos acadêmicos, processamento de dados, meteorologia, epidemiologia, entre outros a aplicações em engenharia de produção, como linhas de produção, problemas de logística, filas de atendimento, que é o estudo de caso deste trabalho. Kelton et al. (2003) ressaltam que a simulação está mais popular e poderosa do que outrora, devido ao grande avanço dos computadores e softwares.

Chung (2003) afirma que a modelagem computacional e análise dos diferentes tipos de sistemas são realizados com os seguintes objetivos:

- obter amplo conhecimento sobre a operação de um sistema;
- desenvolver gerenciamento de operações e recursos para aprimorar o desempenho do sistema;
- testar novos conceitos e sistemas antes de sua implementação;
- estudar e obter informações sem perturbar ou destruir o sistema atual.

Essa ferramenta oferece diversos benefícios. Como o modelo é simulado em um computador, a simulação experimental pode ser realizada em um período de tempo comprimido, dispensando a espera de meses ou anos para que um processo real finalize. Problemas complexos de serem analisados de forma analítica podem facilmente ser modelados sem toda a complexidade matemática envolvida. Além disso, esses modelos podem ser facilmente demonstrados e apresentados por meio de animações no computador (CHUNG, 2003).

Algumas aplicações da modelagem de simulação computacional em sistemas reais, segundo Prado (2010) são apresentadas a seguir:

- Linhas de produção: modificações em sistemas existentes, tais como as produzidas pela expansão da atual produção, pela troca de equipamentos, ou pela adição de novos produtos, que vão afetar a dinâmica do atual processo; um setor de produção totalmente novo pode ser planejado, obtendo-se o melhor fluxo dentro dele; melhoria na política de estoques incluindo a solicitação de material e atendimento pelos fornecedores.
- Logística: estudo da melhor organização no transporte de materiais e tráfego de pessoas em cenários como fábricas, bancos, cidades, pedágios, transportes ferroviário, marítimo e aéreo e modelos de elevadores.
- Comunicações: busca da configuração ótima de uma rede de comunicações por empresas de telefonia, obtendo informações sobre o tempo de resposta e chamadas perdidas, analisando também rotas alternadas e canalizadores de linha. Dimensionamento da quantidade de atendentes em um *call center*.
- Filas de atendimento: dimensionamento do número de pontos de atendimentos de modo que as filas se mantenham abaixo de um valor especificado. Aplicável em qualquer problema que envolva filas, como bancos, supermercados e escritórios.
- Confiabilidade: simulação da confiabilidade ou disponibilidade de um sistema complexo sobre condições rigorosas. Muito utilizado para sistemas militares e sistemas *online* que não podem apresentar falhas. Conhecendo-se as características dos componentes individuais como o tempo médio de falha e o tempo médio de reparo de cada componente, pode-se obter uma medição quantitativa da confiabilidade do sistema, bem como o planejamento de uma manutenção preventiva.
- Processamento de dados: medição da produtividade ou tempo de resposta de um sistema de computadores e terminais. Estudo de performance e de capacidade, permitindo identificar gargalos e opções de crescimento.

Existem várias formas de classificar modelos computacionais, mas uma bastante utilizada é feita considerando-se estas três dimensões (KELTON et al., 2003):

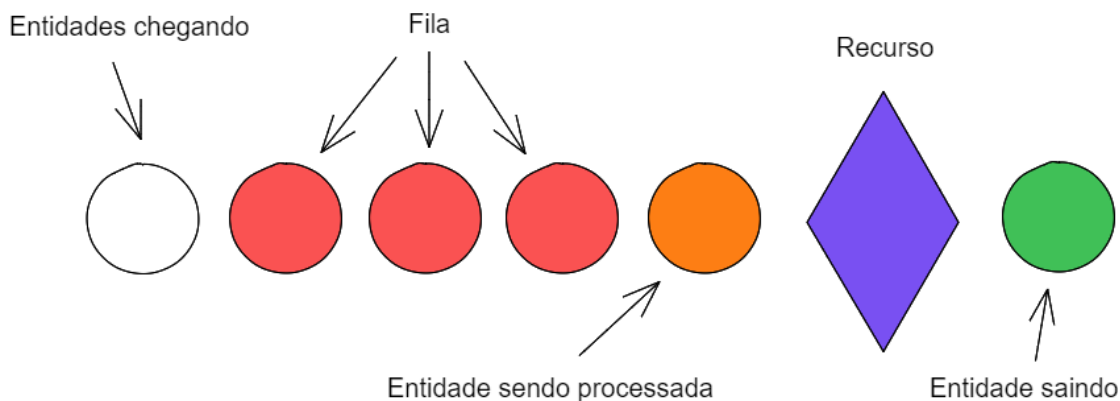
- Estático ou dinâmico: presença ou não do tempo na simulação. A maioria dos modelos operacionais são dinâmicos.
- Contínuo ou discreto: no modelo contínuo, o estado da variável varia continuamente com o tempo, como por exemplo o fluxo de água em um reservatório. No modelo discreto a mudança ocorre em pontos discretos de tempo, ou eventos, como peças chegando e saindo em uma linha de montagem em horários específicos. É possível que haja elementos tanto com variação contínua quanto discreta no mesmo modelo, sendo chamados de modelos mistos. Um exemplo seria uma refinaria onde a variação de pressão varia continuamente enquanto que paradas de funcionamento ocorrem discretamente.
- Determinístico ou estocástico: modelos que não possuem dados de entrada aleatórios são determinísticos. Modelos estocásticos por outro lado, operam com pelo menos algumas entradas aleatórias, como por exemplo os tempos de chegada de consumidores em um estabelecimento, tornando aleatório também os resultados. Um modelo pode ter ambos os tipos de variáveis. Definir em qual categoria cada uma se encaixa é um dos desafios da modelagem computacional. Dados estocásticos podem ser representados facilmente através de curvas de distribuição de probabilidades.

O modelo computacional utilizado neste trabalho se enquadra nas categorias dinâmico, discreto e estocástico.

Um simples modelo computacional de processo é composto por 3 componentes primários: entidades, filas e recursos. Entidades são objetos, componentes ou pessoas que são processadas pelos recursos, ou seja, que se utilizam de algum recurso para determinada atividade. Os recursos são responsáveis por agir sobre as entidades, conferindo-as certas mudanças de estado em um tempo de processamento que pode ser determinístico ou estocástico. Quando um recurso (unidade de processamento) está ocupado, ocorre o surgimento de filas de entidades, que aguardam os seus turnos de atendimento (CHUNG, 2003). A Figura 2.2 ilustra o processo descrito acima.

As entidades representadas como círculos, variam de estado ao longo de todo o caminho percorrido. Estes estados são representados pelas cores. As brancas estão livres percorrendo o fluxo. As vermelhas estão presas em fila, pelo fato de o recurso em questão estar atendendo sua capacidade máxima. Este recurso pode ser um maquinário, funcionário (ou os dois juntos) ou

Figura 2.2: Componentes de um modelo de simulação básico.



Fonte: Autoria própria.

qualquer outro realizador de trabalho no sistema.

A cor laranja indica que a entidade está sendo processada pelo recurso. Pode haver mais de uma entidade processada ao mesmo tempo, desde que o recurso trate várias entidades ao mesmo tempo ou múltiplos recursos estão trabalhando em conjunto (2 funcionários em um mesmo processo por exemplo). A cor verde representa a entidade saindo do recurso depois de processada, e voltando ao fluxo da simulação.

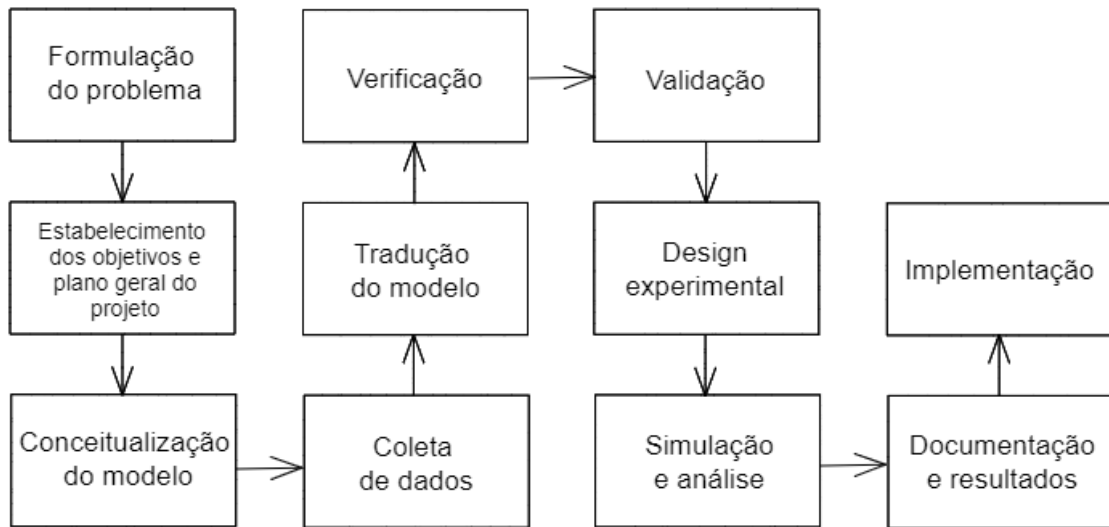
2.3.1 Etapas de um Estudo de Simulação

Um roteiro completo para estudo de uma simulação é apresentado por Banks (2005) na Figura 2.3, abrangendo conceitos importantes que devem ser levados em consideração ao longo do processo que resulta na construção do modelo computacional.

Todo estudo começa com a afirmação e formulação de um problema. O analista deve garantir que o problema descrito foi identificado e claramente entendido por todas as partes envolvidas. Assim, segundo Banks (2005), segue-se ao estabelecimento dos objetivos que indicam os questionamentos a serem respondidos pela simulação. O plano de projeto inclui estudos em termos do número de pessoas envolvidas, o custo do estudo, o número de dias requeridos para terminar cada fase do trabalho e os resultados esperados em cada etapa.

A conceitualização do modelo é a habilidade de abstrair características essenciais de um problema, selecionar e modificar premissas básicas que caracterizam o sistema, e então

Figura 2.3: Etapas de um estudo de simulação.



Fonte: Banks (2005). Adaptado.

enriquecer e elaborar o modelo até obter resultados aproximados satisfatórios. É recomendado que se comece com um modelo simples para então partir para maior complexidade, porém esta não deve exceder a complexidade requerida para concluir a proposta do modelo. A construção de fluxogramas é importante nesta etapa (BANKS, 2005).

Parte-se então para a coleta de dados, processo que demanda grande parte do tempo necessário para a construção do modelo de simulação. Por isso, é necessário começar a coleta o mais cedo possível, geralmente nos estágios iniciais da construção do modelo. Os objetivos do estudo determinam os tipos de dados coletados. Como o modelo pode estar em constante mudança, assim que sua complexidade se altera, os dados requeridos também podem mudar (BANKS, 2005).

O modelo é então adaptado para um formato reconhecido em computador. Alguns modelos simples podem ser simulados sem a necessidade de qualquer código. Mas no caso geral, o modelador escolhe programar o modelo em uma linguagem de programação (como o GPSS/H) ou em um *software* de simulação (como o Arena, ProModel, SIMUL8). Linguagens de programação voltadas para simulação computacional são poderosas e flexíveis, porém os *softwares* específicos são de rápido desenvolvimento e de fácil visualização (BANKS, 2005).

De posse do modelo completo, necessita-se realizar a verificação e a validação. A verificação realiza a análise da integridade do modelo desenvolvido no programa, dos parâmetros

de entrada, da estrutura lógica e da performance computacional. Nesta etapa, erros nos códigos são corrigidos com o uso de ferramentas de depuração. Já a validação compara o modelo criado com o processo real. É uma mensuração do quanto o modelo se aproxima do processo real (BANKS, 2005).

O *design experimental* é uma etapa de busca de melhoria do processo, em que são criados modelos alternativos a serem simulados. Para cada modelo, são determinados o período de inicialização, a duração da simulação e o número de replicações. A simulação é realizada através da linguagem de simulação ou *software* em que o modelo foi construído. Documentação e medidas de performance (resultados) dos modelos criados podem ser analisados após essa etapa (BANKS, 2005).

A documentação registra todos os passos, metodologias e cálculos realizados durante a simulação. Isto é importante para a confiabilidade do projeto, assim como a replicação com os mesmos parâmetros de execução. Os resultados de todas as análises devem ser claramente apresentados no relatório final. Isto permite aos analistas revisarem a formulação final, sistemas alternativos, critérios de comparação entre esses sistemas, os resultados dos experimentos e as soluções recomendadas para o problema. Todo o processo de simulação culmina na produção destes artefatos (BANKS, 2005).

A implementação consiste em aplicar as recomendações obtidas através da simulação computacional no processo real, com a finalidade de otimização. O sucesso da fase de implementação depende da performance obtida em todas as etapas anteriores. A etapa mais importante é o processo de validação, pois um modelo bem validado que representa com fidelidade a realidade muito provavelmente apresentará resultados favoráveis de serem aplicados no processo real (BANKS, 2005).

No presente trabalho, a modelagem computacional foi construída através do *software* de simulação Arena Student 16.0. Este foi escolhido dentre os demais por causa de sua popularidade, facilidade de uso, interface intuitiva e completa, além de possuir uma versão grátis para estudantes.

2.4 O Arena

O Arena foi lançado pela empresa americana Systems Modeling em 1993 e é o sucessor de dois outros produtos de sucesso da mesma empresa: SIMAN (primeiro *software* de simula-

ção para PC) e CINEMA. O SIMAN é uma evolução da arquitetura do GPSS, lançada em 1961, e que, durante anos, foi o líder entre os produtos de simulação de uso geral no mercado mundial (PRADO, 2010).

O Arena é um *software* bem difundido no mercado, um dos mais populares da área. É utilizado pela maioria das empresas integrantes da *Fortune 100*, compilado das 100 maiores corporações em receita dos EUA. Possui acesso grátis a estudantes e está presente no currículo das maiores instituições de ensino do mundo (ROCKWELL, 2022).

O programa combina a facilidade de uso de simuladores de alto nível com a flexibilidade de linguagens de simulação e procedurais de uso geral, como o C por exemplo (KELTON et al., 2003).

Além de ser eficiente no seu funcionamento interno, o seu maior destaque está na sua acessibilidade e interface intuitiva. Com mecânicas *drag-and-drop*¹, permite que um modelo possa ser construído sem que o usuário saiba ao fundo uma linguagem de programação. Seu visual permite que o fluxo de entidades seja observado claramente e pode ser facilmente modificado para melhor apresentação. Por ser bastante conhecido, possui uma comunidade extensa e bastante conteúdo de aprendizado por meio de livros, artigos e vídeos.

Assim como a maioria dos outros programas de simulação, o Arena é orientado a eventos, o que permite que o modelo computacional evolua dinamicamente. Na medida em que o tempo de simulação evolui, determinados acontecimentos (eventos) provocam alterações em alguns elementos (variáveis) do programa, os quais são responsáveis por informar a ocorrência de mudanças nas condições (estados) que envolvem o modelo (FREITAS FILHO, 2001).

Além do ambiente de simulação, o Arena traz uma seção específica para o tratamento dos dados de entrada: o *Input Analyzer*. Com ele, o *software* gera automaticamente curvas de distribuição estatística que melhor se adequem ao conjunto de dados estudado, para serem utilizados posteriormente na construção do modelo computacional (PRADO, 2010).

Para simplificar o processo de construção de modelos, o Arena possui um conjunto de blocos (módulos), funcionando como comandos de uma linguagem de programação. Ele se utiliza de uma Interface Gráfica para o Usuário (GUI – Graphical User Interface), que em muito automatiza o processo e reduz a necessidade do teclado (PRADO, 2010).

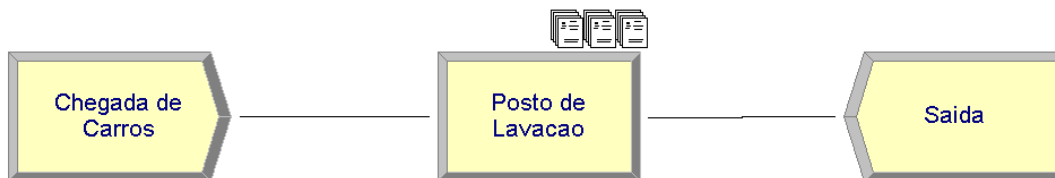
¹*Drag-and-drop* (arrastar e soltar) é uma funcionalidade softwares que permite que o usuário possa selecionar elementos arrastáveis (*draggable*) com o mouse, arrastar elementos até um elemento soltável (*droppable*), e soltar o elemento ao soltar o botão do mouse (MOZILLA, 2021).

2.4.1 Módulos de Modelagem Computacional

O *software* possui módulos de modelagem e análise de dados que podem ser combinados para construir uma grande variedade de modelos simulacionais. Estes são divididos em duas categorias: módulos de fluxogramas e módulos de dados. Os módulos de fluxograma descrevem os processos dinâmicos que ocorrem dentro do modelo, são locais por onde as entidades surgem, passam e saem do sistema. Módulos de dados definem as características dos diversos elementos de processamento, como entidades, recursos e filas. Entidades não passam por estes módulos, e eles não são vistos na janela gráfica de simulação; ao invés disso, eles existem por fora do modelo e definem diferentes tipos de valores, expressões e condições (KELTON et al., 2003).

A Figura 2.4 é um exemplo e apresenta alguns dos módulos de fluxograma básicos, imprescindíveis para qualquer tipo de simulação. Ela representa um modelo discreto simples de atendimento de um posto de lavação, em um determinado instante da simulação (FREITAS FILHO, 2001).

Figura 2.4: Entidades circulando pelo modelo durante a simulação.



Fonte: Freitas Filho (2001). Adaptado.

A entidade carro entra no sistema pelo módulo *Create* (Chegada de Carros), onde é configurado a taxa de entrada das unidades com base no tipo de distribuição estatística utilizado. Cada módulo de fluxograma é representado por uma geometria única que o diferencia dos demais.

O segundo módulo é o *Process* (Posto de Lavação), onde as entidades são atendidas em intervalos de tempo baseados também em distribuições estatísticas, gerando filas que podem ser observadas no modelo (os três ícones acima do módulo indicam uma fila de três entidades). Este módulo é dividido em três etapas: *Seize*, *Delay* e *Release*. O submódulo *Seize* aloca um recurso para atender a entidade, tornando-o ocupado. *Delay* especifica o tempo necessário de

atendimento. *Release* termina o processo liberando o recurso para que possa atender a próxima entidade da fila.

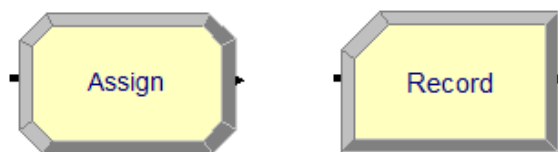
Por fim, o módulo *dispose* (Saída) representa o ponto de saída das entidades no modelo. O tempo de permanência da entidade em todo o processo (momento que entra até momento que sai), tempos de filas, tempos de processamento e outras métricas, incluindo customizáveis, são calculadas e mostradas ao final da simulação.

Com este modelo simples, informações importantes podem ser retiradas acerca do processo, como por exemplo o tamanho máximo das filas ou o número de unidades atendidas em determinado intervalo de tempo.

Recentemente foi publicado um trabalho em que um modelo em Arena foi criado tendo como objeto de estudo um posto de lavação da cidade de Teófilo Otoni / MG (LACERDA et al., 2021). Neste trabalho, foi possível identificar alguns gargalos no sistema, e propor melhorias de até 45,31% no tempo de execução de um dos processos, através da reorganização dos servidores na empresa. Esta alteração tem o potencial de gerar um aumento significativo na produtividade da execução do serviço.

Outros módulos básicos bastante utilizados são os módulos *Assign*, *Record*, mostrados na Figura 2.5 e *Decide*, mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.5: Módulos *Assign* e *Record*.



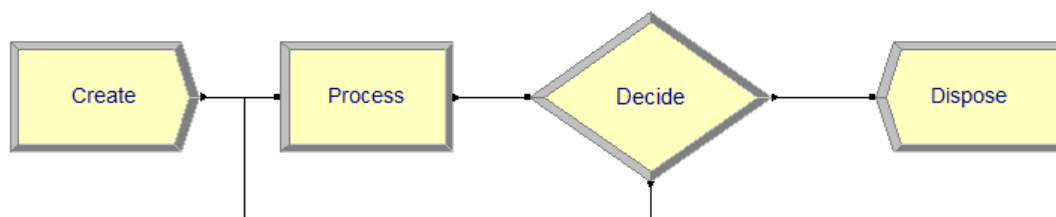
Fonte: Autoria própria.

O módulo *Assign* permite atribuir valores a variáveis e atributos. As variáveis são valores globais válidos em todo o modelo, enquanto que os atributos são valores atrelados a cada entidade. O módulo *Record* permite imprimir informações adicionais ao relatório de simulação. Este relatório por padrão já contém diversas informações referentes às entidades e recursos do sistema, como o tempo de permanência de uma entidade no sistema ou o tamanho médio de fila de um recurso.

Os módulos *Assign* e *Record* são comumente utilizados em conjunto para obter e imprimir uma informação específica. Pode-se por exemplo, registrar o tempo médio de viagem entre dois pontos do fluxo de simulação. Para isso, no primeiro ponto utiliza-se o módulo *Assign* para registrar um novo atributo e no segundo ponto o módulo *Record* para registrar este valor. Essa informação pode ser consultada no relatório final de simulação, com informações estatísticas adicionais como média e desvio padrão.

O módulo *Decide*, indicado na Figura 2.6, impõe uma condição que pode ser baseada em probabilidades ou em expressões dependentes de variáveis e atributos. Esta condição gera dois ou mais caminhos no fluxo do modelo.

Figura 2.6: Módulo *Decide*.



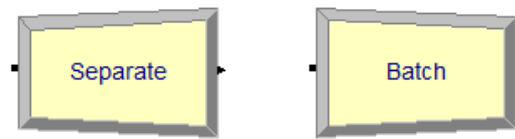
Fonte: Autoria própria.

Nesse exemplo, as entidades chegam no módulo *Decide* e enfrentam um teste escrito pelo usuário. Esse teste pode ser implementado utilizando probabilidade ou por sentença válida no Arena, podendo envolver variáveis e atributos, que tenha um resultado verdadeiro ou falso. Caso a entidade passe pelo teste, ela é redirecionada para o módulo *Dispose*, caso contrário, é retornada para o processo anterior.

Os módulos *Separate* e *Batch*, como mostrados na Figura 2.7, também são utilizados quando necessários. Geralmente são utilizados em conjunto. São úteis quando se precisa separar ou duplicar unidades (multiplicar), utilizando para isso o módulo *Separate*, e unir novamente as partes separadas com o módulo *Batch*.

Pode-se utilizar o módulo *Separate* em separado no caso por exemplo de uma divisão ou multiplicação de uma entidade, o que resultaria em múltiplas entidades.

Figura 2.7: Módulos *Separate* e *Batch*.



Fonte: Autoria própria.

2.4.2 Condições de Simulação

Para que a simulação seja executada, é preciso definir algumas configurações de simulação.

O número de replicações do modelo é um destes parâmetros. Ele indica quantas vezes o modelo é executado, com a finalidade de se obter uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, elevando também o tempo de duração da simulação. No caso de mais de uma simulação, os resultados são obtidos com as médias de todas as simulações realizadas.

O período de aquecimento é um parâmetro utilizado quando se deseja modelar um sistema complexo em que se pretende assegurar de que, no ponto de início de coleta de estatísticas, todo o sistema está em pleno funcionamento (PRADO, 2010).

A duração da simulação é configurada, especificando-se a unidade de tempo trabalhada. O tempo de simulação pode ser configurado como ilimitado, porém neste caso geralmente é indicado um critério de parada, por meio de uma expressão lógica ou limitação de entidades que entram ou saem do sistema.

2.4.3 *Input Analyzer*

Freitas Filho (2001) afirma que modelar computacionalmente um sistema do mundo real sugere a criação de uma espécie de analogia digital desse sistema. Esta deve possuir a capacidade de se comportar de maneira semelhante ao sistema original de tal forma que, ao interagir com o usuário, permita a este a realização de experimentos com a intenção final de um maior entendimento e compreensão do sistema real.

Para que um modelo possa criar uma história artificial do sistema real, é fundamental que este traga consigo a probabilidade de apresentar até mesmo um comportamento estocástico, à semelhança da grande maioria dos sistemas. Em modelos voltados à simulação, esse objetivo é alcançado pela utilização de distribuições de probabilidades (empíricas ou teóricas) como forma de representar a multiplicidade de ocorrências de eventos aleatórios. Quando se faz uso de probabilidades para representar o comportamento de variáveis aleatórias presentes nos sistemas a serem modelados, é preciso considerar os seguintes pontos (FREITAS FILHO, 2001):

- Os possíveis valores que a variável pode assumir estão dentro da amplitude coberta pela distribuição empregada;
- A probabilidade de ocorrência de qualquer valor no intervalo é determinada pelo perfil da distribuição.

De acordo com Freitas Filho (2001), na medida em que se têm os dados necessários e disponíveis, se passa para o tratamento destes dados. O processo de tratamento de dados inicia pelo desenvolvimento da distribuição de frequência dos dados seguida da elaboração de um histograma para posterior identificação da melhor distribuição de probabilidades que se adeque ao comportamento observado.

O Arena possui o módulo *Input Analyzer* que realiza de forma automática este procedimento, e permite ao usuário escolher a distribuição de probabilidades a ser utilizada. Junto a cada distribuição, o programa realiza testes de aderência de Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov. O objetivo dos testes de aderência é verificar se os dados de uma amostra aderem a uma determinada distribuição teórica de probabilidades (Normal, Exponencial, Triangular, Beta, Lognormal, Erlang, Gama, Weibull, etc.) (FREITAS FILHO, 2001).

Junto ao teste de aderência, o *Input Analyzer* calcula o erro quadrado. Esse valor é obtido a partir do somatório das diferenças entre as frequências relativas observadas e as frequências relativas esperadas, tomadas ao quadrado. Quanto menor o valor melhor a aderência da curva de distribuição, podendo ser utilizado para comparar diferentes distribuições de probabilidade (FREITAS FILHO, 2001).

A seguir são apresentadas as curvas de distribuição contínuas mais comumente encontradas nas simulações. As expressões de distribuição do *Input Analyzer* utilizam ponto ao invés de vírgula para separar as casas decimais.

2.4.3.1 Normal (μ ; σ)

A distribuição normal (2.8) é conhecida por ter uma forma de sino e descreve fenômenos simétricos em torno de uma média. É utilizada em situações em que o teorema do limite central se aplica, ou seja, quantidades que são somatórios de outras quantidades. A aleatoriedade é causada por várias fontes independentes agindo de forma aditiva (FREITAS FILHO, 2001).

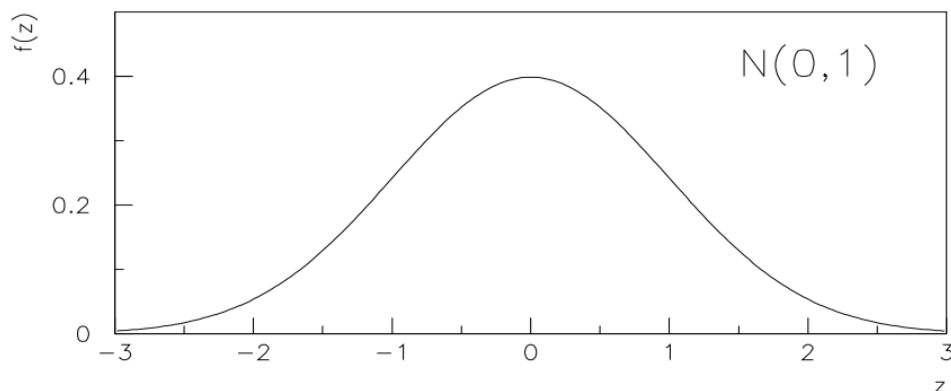
Também chamada de gaussiana, esta distribuição é a mais importante dentro da estatística. Sua distribuição é dada pela equação 2.9 (WALCK et al., 2007):

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.9)$$

μ representa a média e σ o desvio padrão. Para $\mu = 0$ e $\sigma = 1$, esta distribuição fica conhecida como normal padrão. Na maioria das situações é suficiente utilizar esta versão simplificada (WALCK et al., 2007).

Na Figura 2.8, é apresentada visualmente a distribuição normal padrão.

Figura 2.8: Distribuição normal padrão (μ ; σ).



Fonte: Walck et al. (2007).

No Arena, a distribuição normal pode ser representada pela expressão $NORM(\mu, \sigma)$ (FREITAS FILHO, 2001).

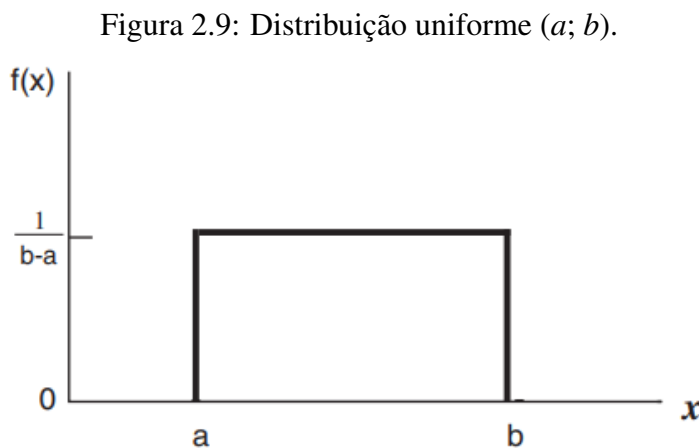
2.4.3.2 Uniforme ($a; b$)

Distribuição mais simples ou que ilustra o maior desconhecimento do fenômeno aleatório sob análise. É tradicionalmente empregada quando a única informação disponível sobre a variável aleatória é que esta ocorre entre dois limites (FREITAS FILHO, 2001).

Possui dois parâmetros: o seu valor mínimo a e seu valor máximo b . Sua distribuição é dada pela equação 2.10 (WALCK et al., 2007):

$$f(x;a,b) = \frac{1}{b-a} \quad \text{para } a \leq x \leq b \quad (2.10)$$

Na Figura 2.9, é apresentada visualmente a distribuição uniforme.



Fonte: Freitas Filho (2001).

No Arena, a distribuição uniforme pode ser representada pela expressão UNIF(a, b) (FREITAS FILHO, 2001).

2.4.3.3 Triangular ($a; m; b$)

À semelhança da distribuição uniforme, o emprego da distribuição triangular ocorre, principalmente, quando se desconhece a curva associada a uma variável aleatória, mas têm-se boas estimativas dos seus limites: inferior (a) e superior (b), bem como seu valor mais provável (m) (FREITAS FILHO, 2001).

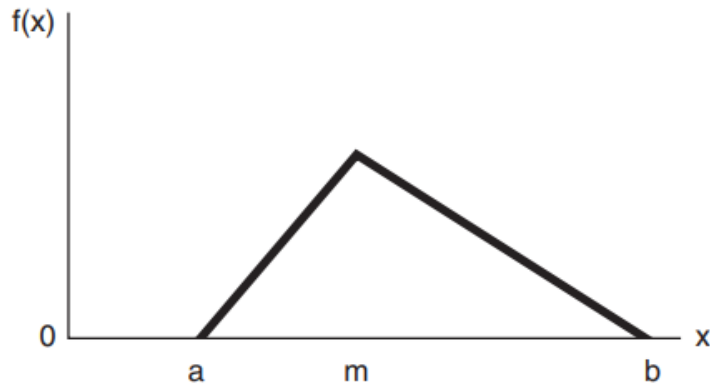
Sua distribuição é dada pelas equações 2.11 e 2.12 (FREITAS FILHO, 2001):

$$f(x; a, m, b) = \frac{2(x-a)}{(m-a)(b-a)} \quad \text{para } a \leq x \leq m \quad (2.11)$$

$$f(x; a, m, b) = \frac{2(b-x)}{(b-m)(b-a)} \quad \text{para } m \leq x \leq b \quad (2.12)$$

Na Figura 2.10, é apresentada visualmente a distribuição triangular.

Figura 2.10: Distribuição triangular ($a; m; b$).



Fonte: Freitas Filho (2001).

Prado (2010) ressalta que as distribuições triangular e uniforme têm particular importância pelo fato de poderem ser usadas quando ainda não foi feito o levantamento dos dados reais. São utilizadas na montagem de modelos do Arena como uma aproximação intuitiva de distribuições do processo e são, posteriormente, substituídas pelas distribuições definitivas.

No Arena, a distribuição triangular pode ser representada pela expressão $TRIA(a, m, b)$ (FREITAS FILHO, 2001).

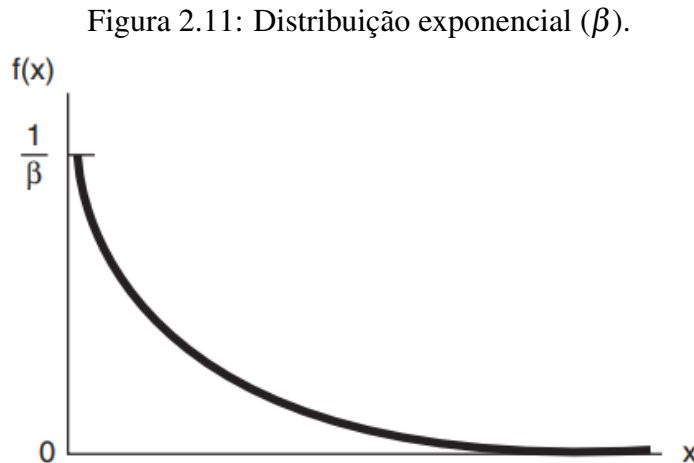
2.4.3.4 Exponencial (β)

A principal característica da distribuição exponencial (2.11), e razão da sua grande aplicabilidade em sistemas de filas é sua falta de memória. Todo fenômeno aleatório descrito por essa distribuição se caracteriza pela total imprevisibilidade, mesmo que se conheça seu passado. A exponencial é muito utilizada na modelagem de tempos decorridos entre dois eventos, particularmente se estes forem causados por um grande número de fatores independentes. Possui média β (FREITAS FILHO, 2001).

Sua distribuição é dada pela equação 2.13 (WALCK et al., 2007):

$$f(x; \beta) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \text{para } x > 0 \quad (2.13)$$

Na Figura 2.11, é apresentada visualmente a distribuição exponencial.



Fonte: Freitas Filho (2001).

No Arena, a distribuição exponencial pode ser representada pela expressão EXPO(β) (FREITAS FILHO, 2001).

2.4.3.5 Lognormal ($\mu; \sigma$)

O logaritmo normal de uma variável que segue uma distribuição normal possui uma distribuição lognormal. Quando a variável sob análise é resultante do produto de um grande número de variáveis aleatórias positivas, é comum que essa variável tenha uma tendência a uma distribuição lognormal. Possui média μ e desvio padrão σ (FREITAS FILHO, 2001).

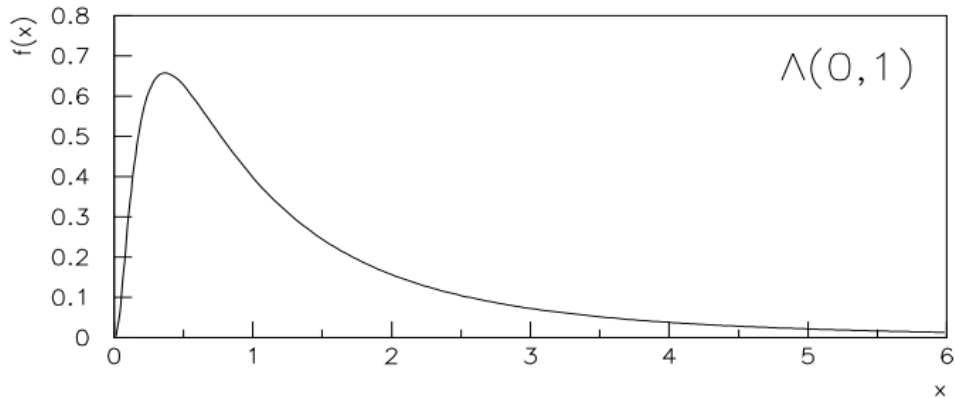
Sua distribuição é dada pela equação 2.14 (WALCK et al., 2007):

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{para } x > 0 \quad (2.14)$$

Na Figura 2.12, é apresentada visualmente a distribuição lognormal.

No Arena, a distribuição lognormal pode ser representada pela expressão LOGN(μ, σ) (FREITAS FILHO, 2001).

Figura 2.12: Distribuição lognormal ($\mu; \sigma$).



Fonte: Walck et al. (2007).

2.4.3.6 Erlang ($\beta; k$)

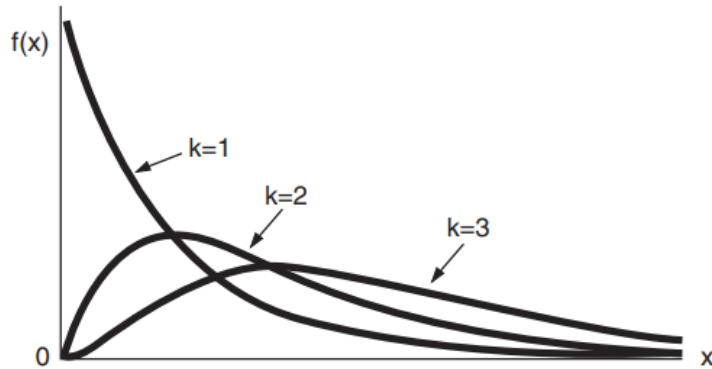
A distribuição Erlang é utilizada como uma extensão da exponencial, especialmente quando o fenômeno aleatório é observado ao longo de diversas etapas as quais podem ser descritas, de forma independente, com distribuições exponenciais. Dessa forma, a soma destas k distribuições exponenciais apresenta média β . Pode ser empregada, por exemplo, para modelar um servidor que represente uma série de outros servidores cujos tempos de processo ou serviço possam ser descritos por distribuições exponenciais com média β (FREITAS FILHO, 2001).

Sua distribuição é dada pela equação 2.15 (FREITAS FILHO, 2001):

$$f(x; \beta, k) = \frac{\beta^{-k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{(k-1)!} \quad \text{para } x > 0 \quad (2.15)$$

Na Figura 2.13, é apresentada visualmente a distribuição lognormal.

Figura 2.13: Distribuição Erlang ($\beta; k$).



Fonte: Freitas Filho (2001).

No Arena, a distribuição Erlang pode ser representada pela expressão $ERLA(\beta, k)$ (FREITAS FILHO, 2001).

2.4.3.7 Gama ($\beta; \alpha$)

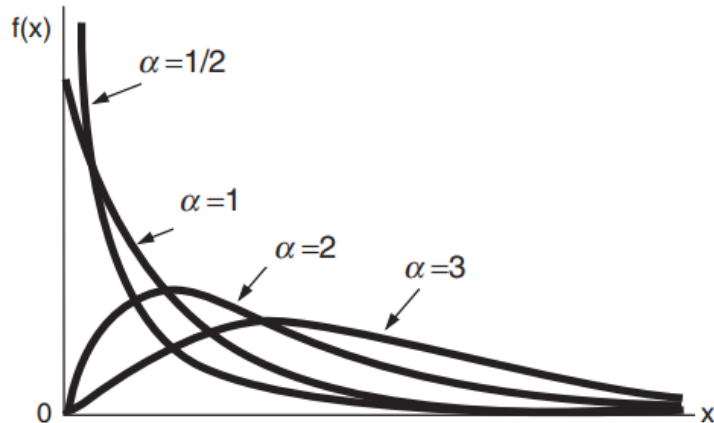
A distribuição gama é uma generalização da distribuição Erlang. A diferença é que esta permite que α (chamado de k na distribuição Erlang) assumam valores não inteiros. Quando α é inteiro, as duas distribuições se confundem. É empregada em condições de modelagem semelhantes à distribuição Erlang (FREITAS FILHO, 2001).

Sua distribuição é dada pela equação 2.16 (FREITAS FILHO, 2001):

$$f(x; \beta, k) = \frac{\beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\Gamma(\alpha)} \quad \text{para } x > 0 \quad (2.16)$$

Na Figura 2.14, é apresentada visualmente a distribuição lognormal.

Figura 2.14: Distribuição gama ($\beta; \alpha$).



Fonte: Freitas Filho (2001).

No Arena, a distribuição gama pode ser representada pela expressão $GAMM(\beta, \alpha)$ (FREITAS FILHO, 2001).

2.4.3.8 Beta ($\beta; \alpha$)

A distribuição beta é utilizada para caracterizar variáveis aleatórias cujos valores estão dentro do intervalo $[0; 1]$. Dessa maneira, uma de suas principais aplicações está na representação de proporções ou frações. Como exemplos pode-se citar a proporção de defeituosos em lotes de produtos ou a fração de pacotes que devem ser retransmitidos. Outra característica desta distribuição é o grande número de formas que ela pode assumir, dependendo de seus dois parâmetros de forma β e α (FREITAS FILHO, 2001).

Sua distribuição é dada pela equação 2.17 (FREITAS FILHO, 2001):

$$f(x; \beta, \alpha) = \frac{x^{\beta-1}(1-x)^{\alpha-1}}{B(\beta, \alpha)} \quad \text{para } 0 < x < 1 \quad (2.17)$$

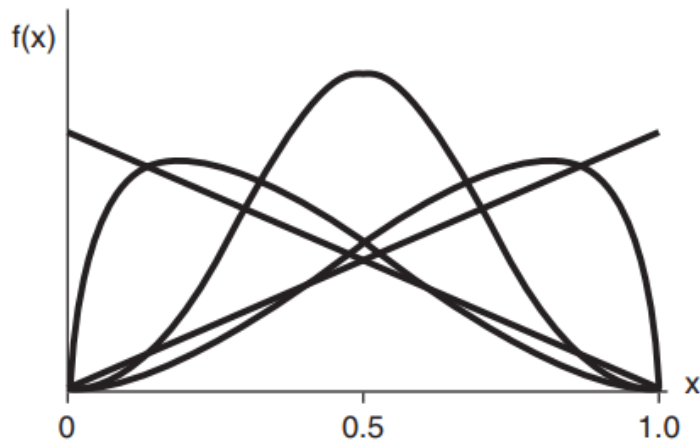
em que

$$B(\beta, \alpha) = \int_0^1 t^{\beta-1}(1-t)^{\alpha-1} \quad (2.18)$$

Na Figura 2.15, é apresentada visualmente a distribuição beta.

No Arena, a distribuição beta pode ser representada pela expressão $BETA(\beta, \alpha)$ (FREI-

Figura 2.15: Distribuição beta ($\beta; \alpha$).



Fonte: Freitas Filho (2001).

TAS FILHO, 2001).

2.4.3.9 Weibull (a, b)

Assim como a beta, esta é uma distribuição que pode assumir vários perfis, dependendo de seus parâmetros, especialmente do α (parâmetro de forma). A principal utilização de distribuição Weibull (2.16) é na representação de variáveis aleatórias que descrevem características de confiabilidade de sistemas ou equipamentos. Uma aplicação típica é na modelagem de falhas de componentes ou sistemas. Em um sistema formado por inúmeros componentes que falham de forma independente e, se uma das partes falhar, o sistema inteiro falha, então, o tempo decorrido entre falhas do sistema pode ser modelado utilizando-se um distribuição Weibull (FREITAS FILHO, 2001).

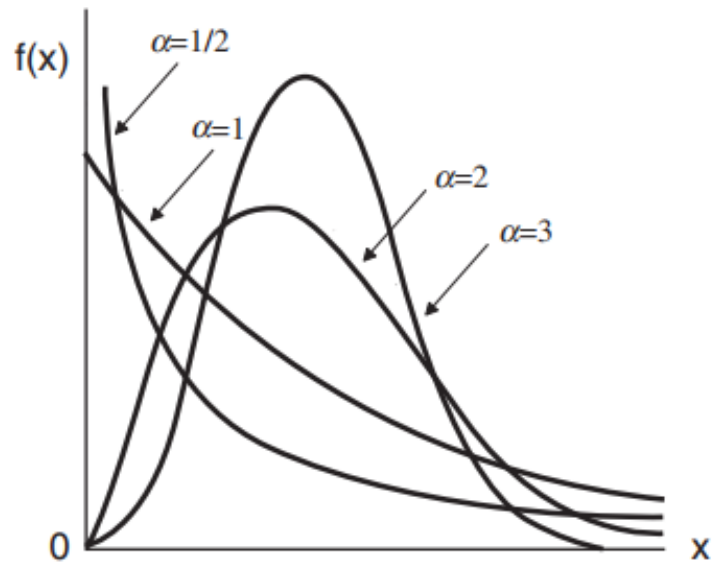
Sua distribuição é dada pela equação 2.19 (FREITAS FILHO, 2001):

$$f(x; \beta, \alpha) = \alpha \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad \text{para } x > 0 \quad (2.19)$$

Na Figura 2.16, é apresentada visualmente a distribuição Weibull.

No Arena, a distribuição Weibull pode ser representada pela expressão WEIB(β, α) (FREITAS FILHO, 2001).

Figura 2.16: Distribuição Weibull ($\beta; \alpha$).



Fonte: Freitas Filho (2001).

2.4.3.10 Constante (a)

Esse é um caso especial onde não existe uma distribuição de probabilidade, pois o valor é sempre constante. No Arena, este comportamento é representado pela expressão $CONST(a)$, em que a é uma constante. (FREITAS FILHO, 2001).

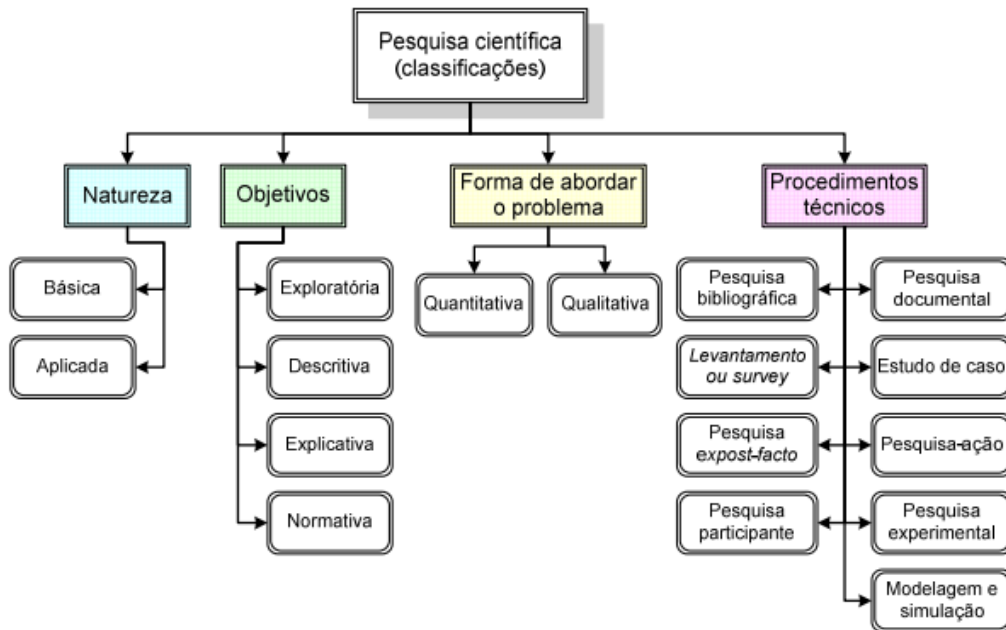
3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Neste capítulo, são descritos as etapas de pesquisa deste trabalho e os métodos utilizados na coleta de dados e tamanho de amostra para a criação do modelo computacional.

3.1 Classificação da Pesquisa

Silva e Menezes (2005) em sua metodologia, pressupõem que a pesquisa científica pode ser classificada quanto a quatro abordagens diferentes, sendo estas: natureza, objetivos, forma de abordar o problema, e procedimentos técnicos. Este modelo, como representado na Figura 3.1, foi utilizado para a classificação deste trabalho de pesquisa.

Figura 3.1: Classificação de Pesquisas Científicas.



Fonte: Silva e Menezes (2005).

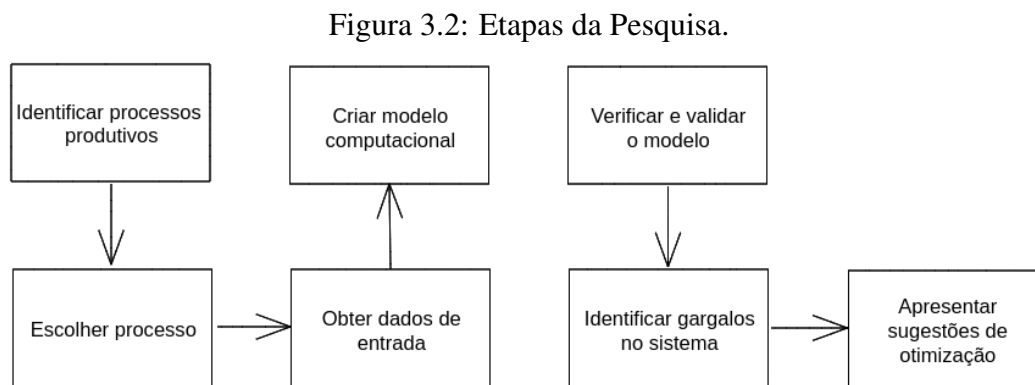
Quanto à natureza, o projeto se enquadra como pesquisa aplicada, que segundo Silva e Menezes (2005), objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática prevista. Do ponto de vista da forma de abordagem, a pesquisa é quantitativa pois vem traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las por uso de recursos e de técnicas estatísticas (SILVA; MENEZES, 2005). A respeito de seus objetivos, pode ser considerada como pesquisa descritiva que, segundo Gil et al. (2002), visa descrever as características de determinado fenômeno, envolvendo técnicas padronizadas de coleta de dados e estabelecendo relações entre

variáveis. O projeto envolve também a pesquisa experimental, através da modelagem e simulação; e pesquisa bibliográfica, por utilizar-se de conhecimentos a partir de material já publicado de livros, artigos e periódicos, para a comparação com trabalhos similares e o aprendizado do uso da ferramenta (GIL et al., 2002).

3.2 Etapas da Pesquisa

A pesquisa foi dividida nas seguintes etapas representadas pela Figura 3.2.

Este fluxo foi inspirado e segue os passos recomendados por Freitas Filho (2001), em seu livro *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas*.



Fonte: Autoria própria.

Buscou-se identificar os processos produtivos envolvidos na produção de uma padaria, escolher um desses processos como objeto de estudo e a partir do uso de simulação computacional propor, caso haja, melhorias e otimizações para a sua maximização produtiva.

A padaria estudada encontra-se no município de Itambacuri/MG, Brasil.

3.3 Escolha do Produto a ser Estudado

Inicialmente, foi realizado um estudo abrangente identificando os variados processos produtivos do estabelecimento e seus produtos fabricados. Dentre alguns destes produtos, podem-se citar: pão francês, pão sovado, pão de doce, rosca de leite, rosca rainha, dentre outros.

Alguns desses produtos possuem massa própria (como por exemplo o pão francês). Outros são derivados de uma mesma massa. Diversos trabalhos semelhantes a este já tratam o pão

francês como objeto de estudo. Logo este estudo visou buscar uma massa diferente e que possui um pouco mais de complexidade em seus processos.

Este período de coleta de dados dos variados processos produtivos da padaria levou cerca de 3 semanas para ser realizado, entre os dias 27/07/2020 a 14/08/2020.

Após este período, buscou-se focar em uma massa específica, passando pelos processos produtivos de todos os produtos gerados. O objeto de estudo escolhido foi a massa de rosca. Esta massa gera outros 5 produtos: rosca de leite, rosca amanteigada, rosca média, pão de leite e pão tatu. Ela é produzida uma vez ao dia, na parte da manhã.

3.4 Coleta de Dados

Escolhendo-se o produto a ser estudado, identificou-se o horário e os dias em que é produzida. Com isso as visitas para coletas de dados foram feitas de segunda à sexta, às 8:00h da manhã. Este período durou cerca de 3 meses, de 17/08/2020 a 20/11/2020.

Durante esse período foram coletados dados referentes a cada processo de todos os produtos gerados pela massa. Para cada processo é identificado o tempo de operação (do padeiro ou da máquina dependendo do processo).

Estas medidas de tempo foram cronometradas com o auxílio de um *smartphone* Android. As medidas foram armazenadas no momento de coleta, para posterior tratamento estatístico e criação de modelo computacional.

Durante a coleta de dados, é possível que a presença do observador gere incômodo aos padeiros. Isto pôde ser minimizado com as seguintes ações:

- Não identificação dos padeiros neste trabalho;
- Esclarecimento aos padeiros acerca de todos os procedimentos da pesquisa;
- Esclarecimento aos padeiros de que o observador não tem a função de monitorar ou denunciar, em hipótese nenhuma, o comportamento dos mesmos durante o trabalho;
- Realização de coleta de dados sem interferir fisicamente na rotina de trabalho.

3.5 Tamanho de Amostra

São separados os processos determinísticos, que possuem tempos de operação fixos, dos processos estocásticos, que são aleatórios e dependem de distribuições de probabilidades (FREITAS FILHO, 2001).

Um exemplo de processo determinístico é o tempo de assamento de massa no forno; um exemplo de processo estocástico é qualquer processo manual realizado pelo funcionário.

Para os processos estocásticos, foram obtidos os tamanhos de amostras para que tenham a maior representatividade possível em seu próprio universo. Estes são calculados pela equação 3.1 (FREITAS FILHO, 2001):

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{E_0^2} \quad (3.1)$$

Tal que:

- n : tamanho da amostra;
- Z : valor da normal padronizada para um nível de confiança de 95%;
- σ : desvio padrão amostral em torno da média;
- E_0 : erro amostral tolerável associado à média. Foi adotado em 10%.

Primeiramente foi realizada uma coleta inicial de alguns dados, entre 10 a 50 amostras, dependendo do processo. É então calculada a média e o desvio padrão, sendo este último utilizado na formulação acima para encontrar um novo valor para tamanho de amostra.

Se este novo valor for inferior, então não se necessita de mais coletas para este processo. Caso contrário, volta-se ao campo de trabalho e são coletadas novas amostras. Novamente utiliza-se a formulação e esse processo iterativo é reaplicado até que se obtenha um tamanho de amostras significativo para o processo estudado (FREITAS FILHO, 2001).

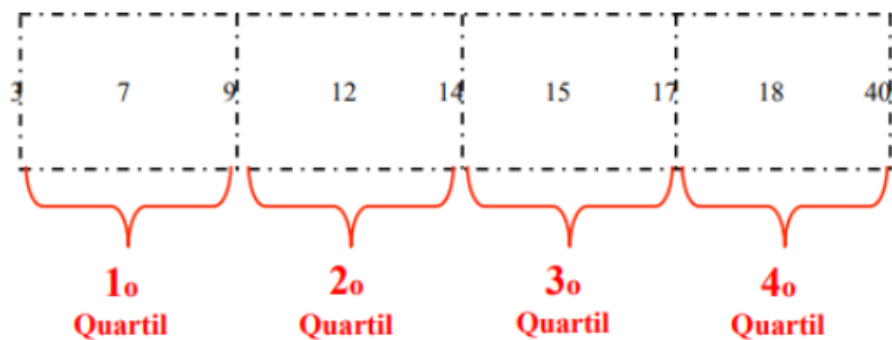
Isto é replicado em todos os processos estocásticos que participam do modelo computacional.

3.6 Filtro de *Outliers*

Durante a coleta de dados, é normal que alguns pontos seja devido a erros de medição, anomalias locais ou outros problemas externos. Para que esses pontos fora da curva não dificultem o tratamento estatístico dos dados, foi realizado a remoção dos mesmos utilizando o Esquema dos Cinco Números (PRATI, 2020).

A Figura 3.3 demonstra a metodologia citada. Ela consiste de dividir um conjunto de dados em quartis. Primeiramente os dados são divididos em duas partes pela mediana. Estas duas partes são divididas novamente pelas suas novas medianas. (PRATI, 2020).

Figura 3.3: Esquema dos Cinco Números.



Fonte: Prati (2020).

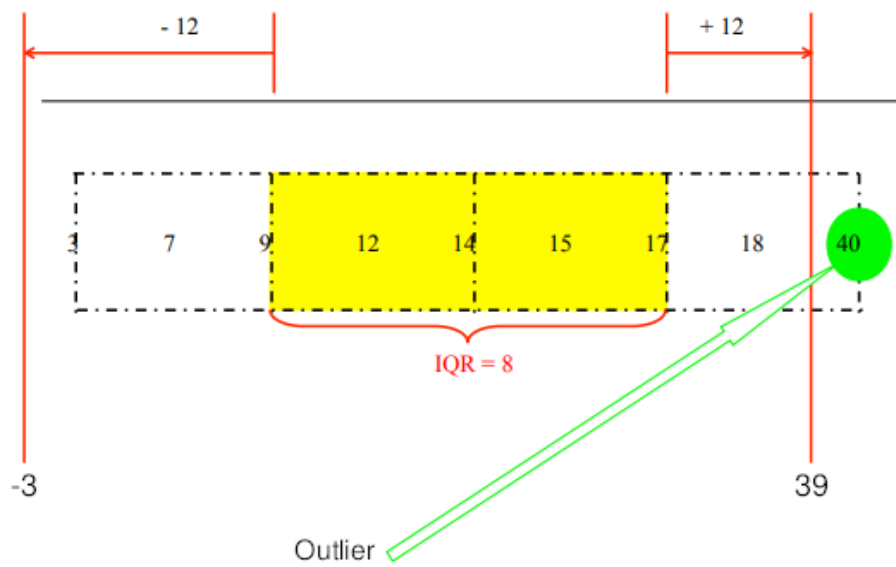
É então calculado o IQR (intervalo inter-quartil), que é a distância entre o limite superior do 3º quartil e o limite inferior do 2º quartil (PRATI, 2020).

Para determinar se um número é um *outlier*, multiplica-se o IQR por 1,5 e soma-se/subtrai-se aos limites encontrados, como mostrado na Figura 3.4. Todos os dados que não estiverem dentro deste intervalo gerado podem ser considerados como *outliers* e portanto eliminados da amostra.

Neste caso, o valor 40 é um *outlier* e pode ser desconsiderado segundo esta metodologia.

De posse dos dados coletados, parte-se para o tratamento dos mesmos para posterior criação do modelo computacional.

Figura 3.4: Outlier.



Fonte: Prati (2020). Adaptado.

4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo, são explicados os métodos utilizados para o tratamento e análise dos dados coletados na padaria, metodologia de verificação e validação do modelo computacional criado no Arena, cálculo do número de replicações e comparação de resultados entre diferentes modelos de otimização.

4.1 Tratamento dos Dados de Entrada

De acordo com Freitas Filho (2001), na medida em que se têm os dados necessários e disponíveis, se passa para o tratamento destes dados. O processo de tratamento de dados inicia pelo desenvolvimento da distribuição de frequência dos dados seguida da elaboração de um histograma para posterior identificação da melhor distribuição de probabilidades que se adéque ao comportamento observado.

O Arena possui o módulo *Input Analyzer* que realiza de forma automática este procedimento, e permite ao usuário escolher a distribuição de probabilidades a ser utilizada. Junto a cada distribuição, o programa realiza testes de aderência de Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov.

O objetivo dos testes de aderência é verificar se os dados de uma amostra aderem a uma determinada distribuição teórica de probabilidades (Normal, Exponencial, Triangular, Beta, Gama, etc.) (FREITAS FILHO, 2001).

Neste trabalho foi utilizado o teste de Qui-quadrado, através do *Input Analyzer*. Segundo Forbes et al. (2011), quando um conjunto de dados é representado por um modelo teórico, o teste de aderência de Qui-quadrado é comumente utilizado para testar a qualidade do ajuste entre os pontos de dados observados e os valores previstos pelo modelo, desde que as diferenças sejam normalmente distribuídas.

Duas hipóteses são levantadas (FREITAS FILHO, 2001):

- H_0 : a variável aleatória X segue a distribuição sob hipótese com os parâmetros estimados
- H_1 : a variável aleatória X não segue a distribuição sob hipótese com os parâmetros estimados

O valor do nível de significância utilizado foi de 5%. Caso o valor-p encontrado para a

distribuição em estudo seja maior que α , aceita-se H_0 , a distribuição pode ser utilizada. Caso contrário, rejeita-se H_0 .

4.2 Verificação e Validação

A verificação é o processo de determinar se uma implementação de um modelo computacional e seus dados associados representam com precisão a descrição conceitual e as especificações de casos de uso. A validação é o processo de determinar o grau em que um modelo de simulação é uma representação precisa do mundo real da perspectiva dos usos pretendidos com o modelo (REBOVICH, 2014).

Para a verificação, Freitas Filho (2001) sugere que a simulação seja testada utilizando modelos determinísticos. Esta abordagem é importante pois a variabilidade das respostas do programa devido ao comportamento das variáveis aleatórias pode dificultar a interpretação. Assim, para fins de verificação, foram atribuídos valores determinísticos a estas variáveis. Com isto, fica mais simples a previsão de respostas do sistema e, como consequência, a verificação e busca de erros nos vários módulos do programa.

Na validação no modelo, foi utilizado o teste-t para amostras independentes na comparação entre resultados do modelo simulado e do processo real, tendo como variável resposta o tempo total de execução de todo o processo produtivo. Foi utilizado um nível de significância α de 5%. Freitas Filho (2001) reforça que o teste-t é útil quando se tem a existência do sistema real, como é o caso deste trabalho.

As hipóteses do teste são as seguintes:

- H_0 : as médias da variável aleatória X do modelo e do sistema real são iguais.
- H_1 : as médias da variável aleatória X do modelo e do sistema real são diferentes.

Caso o valor-p seja maior que α , aceita-se H_0 e o modelo pode ser validado segundo esse critério. Caso o valor-p seja menor que α , rejeita-se H_0 , e o modelo deve ser revisto.

4.3 Simulação e Número de Replicações do Modelo

Para fins de análise de resultados, foram analisados os tempos gastos no processamento de cada produto estudado, o tamanho de filas no sistema e o índice de utilização de cada ma-

quinário.

Segundo Freitas Filho (2001), a determinação de intervalos de confiança para as variáveis de interesse que medem o desempenho do sistema é um componente fundamental no processo de análise de resultados. Como em qualquer processo de estimação, a preocupação em minimizar os erros deve ser constante.

Para amostras de tamanho $n \leq 30$, o semi-intervalo h é calculado por Freitas Filho (2001):

$$h = t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Em que o valor $t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}}$ é o valor tabulado de t , $\frac{S}{\sqrt{n}}$ o erro padrão e α o nível de confiança em todo o intervalo.

No caso de amostras com $n > 30$, h é calculado por (FREITAS FILHO, 2001):

$$h = z \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

Em que z é o valor da variável normal padronizada para o nível de confiança desejado.

Em se tratando de simulação, pode-se elevar o nível de confiança com o aumento do número de replicações do modelo. Uma estimativa do número de replicações para a simulação pode ser obtida com a seguinte equação (FREITAS FILHO, 2001):

$$n^* = n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \quad (4.3)$$

Tal que:

- n^* = nova estimativa para n .
- n = número de replicações já realizadas.
- h = semi-intervalo de confiança já obtido.
- h^* = semi-intervalo de confiança desejado.

É um processo iterativo, até que se obtenha o número de replicações para o semi-intervalo de confiança desejado. Segundo Freitas Filho (2001), é comum que se busquem

intervalos de confiança para os quais o valor de h seja menor ou igual a 10% da média amostral. Assim, este valor foi utilizado neste trabalho, juntamente com um chute inicial n de 20 replicações para o modelo computacional.

4.4 Comparação de Resultados

A comparação de alternativas de projetos costuma ser uma atividade comum entre usuários de modelagem e simulação de sistemas. Alternativas ao modelo podem compreender desde uma mudança em um parâmetro até uma lógica diferenciada que reflita uma variação fundamental no funcionamento do sistema (FREITAS FILHO, 2001).

No presente trabalho, para verificar se as diferenças entre os resultados das propostas de otimização e o modelo foram ou não significativas, foi realizado o teste t para amostras independentes, já descrito anteriormente.

As alternativas de otimização foram propostas tendo como base a variação do número de padeiros ativos no sistema. Esta decisão foi escolhida por ser uma alternativa viável e mais próxima do cenário real de otimização. Os mesmos parâmetros foram reproduzidos em simulações diferentes, alternando-se o número de padeiros de 1 a 10. Sabe-se que tal magnitude no número de operários é irreal e não se aplica em uma padaria deste tamanho, porém a comparação é válida para fins de estudo de logística.

Para melhor visualização da variação do tempo de produção com cada cenário envolvido (variando-se o número de padeiros), foi criado um gráfico de dispersão com aplicação com auxílio do Planilhas Google. O eixo y corresponde ao tempo de produção, enquanto que o eixo x corresponde ao número de padeiros envolvidos no cenário. Foi obtida uma equação de linha de tendência pelo método dos mínimos quadrados juntamente com seu R^2 , que mede a sua confiabilidade, ou seja, quanto mais próximo R^2 estiver de 1, melhor a linha de tendência se ajusta aos dados (FERNANDO, 2022).

A comparação de resultados entre simulações diferentes se deu basicamente pela comparação percentual entre as médias dos tempos totais de execução do processo como um todo, ou seja, o tempo total de simulação. Foram incorporados ao modelo tanto as médias de tempo de processamento de cada processo, quanto as médias dos resultados de todas as replicações do modelo (20 replicações).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, procurou-se retratar os resultados finais obtidos com a criação e execução do modelo computacional criado neste trabalho. Buscou-se também promover uma discussão acerca dos resultados e realizar comparações através do uso de cenários simulados alternativos.

Para começar o capítulo no entanto, é apresentado nesta primeira sessão o processo de aprendizado do autor com o *software* Arena.

5.1 O Modelo Computacional

Esta seção tem o objetivo de apresentar todo o processo de criação do modelo computacional, tendo seguidas as metodologias descritas anteriormente.

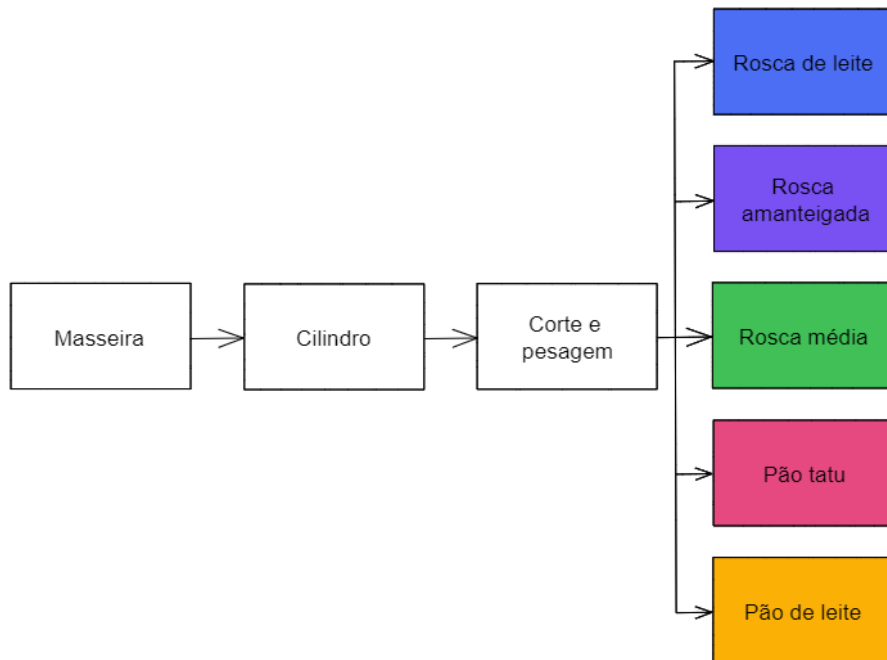
Inicialmente, foi realizado uma identificação de todos os processos envolvidos no produto estudado, a massa de rosca. As Figuras que acompanham o texto são imagens fotografadas durante a coleta de dados.

A seguir, o modelo computacional elaborado foi mostrado juntamente com capturas de telas do *software* em funcionamento. Também são realizadas a verificação e validação do modelo, com o objetivo de garantir a sua integridade e coerência.

5.1.1 Processos Envolvidos na Massa de rosca

A massa estudada (massa de rosca) é responsável por gerar cinco pães finais: rosca de leite, rosca amanteigada, rosca média, pão tatu e pão de leite. A figura 5.1 ilustra essa primeira etapa do modelo.

Figura 5.1: Processo Produtivo parte 1.



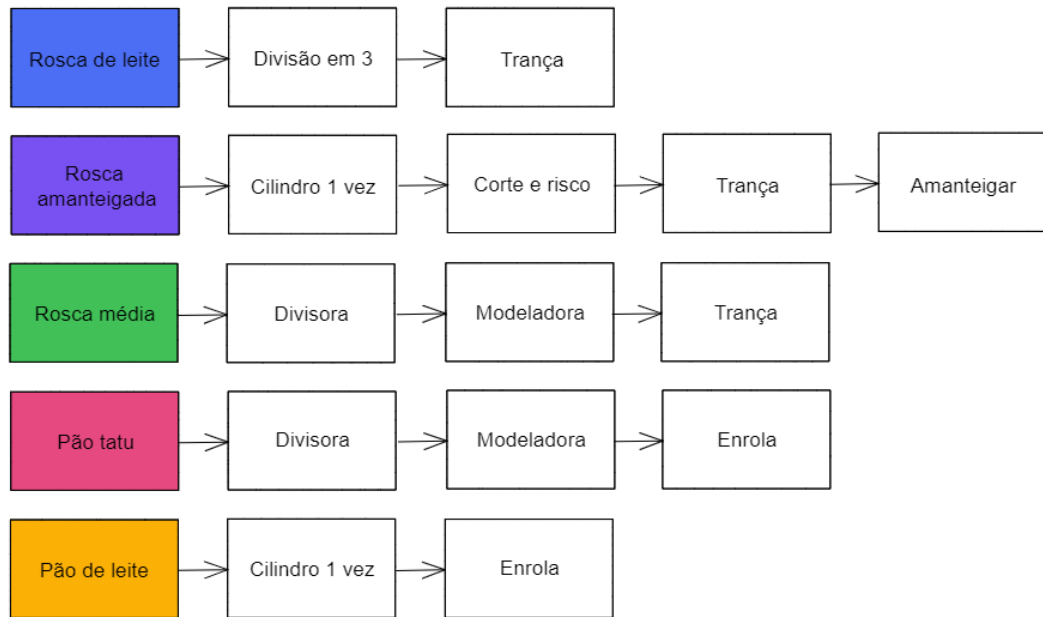
Fonte: Autoria própria.

A massa inicial é preparada na maseira e no cilindro, e depois é dividida pelo processo de corte e pesagem.

Com exceção da maseira que é um processo determinístico, todos os outros processos envolvidos neste modelo de simulação são estocásticos.

A Figura 5.2 continua com o fluxo para cada produto.

Figura 5.2: Processo Produtivo parte 2.



Fonte: Autoria própria.

Cada produto passa por processos em série diferentes, porém compartilhados entre si. Alguns deles passam novamente pelo cilindro (porém 1 só vez ou passada) para preparar a massa para os próximos processos.

A rosca média e o pão tatu são produtos de tamanhos menores, e por isso a massa geradora passa por uma divisora e modeladora (auxilia no processo de enrolamento ou trança).

A rosca de leite, rosca amanteigada e pão de leite são produtos maiores. A peça inteira é processada sem divisão adicional. A Figura 5.3 ilustra alguns dos produtos logo depois de preparados.

Figura 5.3: Fotografias de massas prontas.



(a) Rosca de Leite.

(b) Rosca Média.

Fonte: Autoria própria.

O modelo estudado neste trabalho analisa os processos envolvidos do início da mistura dos ingredientes na masseira até a disposição final em assadeiras. Portanto, desconsidera-se os tempos de pesagem inicial de ingredientes, tempos de estufa e tempos de forno. Processos envolvidos na produção:

- Masseur: processo determinístico, com tempo fixo da máquina de mistura. Cada ingrediente é colocado na masseira e são misturados durante um tempo fixo, como mostrado na Figura 5.4 (a).
- Cilindro: processo envolvendo contato contínuo de padeiro, utilizado para sovar a massa, como mostrado na Figura 5.4 (b). A massa é dividida em 2 partes e sovadas de forma separada.
- Corte e pesagem: a massa é dividida em partes menores, dependendo do pão a ser produzido. Algumas dessas partes se tornam pães inteiros (no caso das roscas de leite, amanteigada e pão de leite), outras são divididas em outras porções menores posteriormente na divisora. 11 massas são resultantes deste processo.

Figura 5.4: Fotografias de maquinários - masseira e cilindro.



(a) Masseira.

(b) Cilindro.

Fonte: Autoria própria.

- Divisora: as massas que necessitam ser divididas em porções menores passam por este maquinário, identificado pela Figura 5.5 (a), em que cada uma é dividida em 30 partes.
- Modeladora: responsável por modelar as massas de pão tatu e rosca média, identificado pela Figura 5.5 (b).
- Enrolamento, trança e passagem de manteiga: processos manuais executados na mesa de trabalho.

Figura 5.5: Fotografias de maquinários - divisora e modeladora.



(a) Divisora.

(b) Modeladora.

Fonte: Autoria própria.

5.1.2 Elaboração do Modelo

A Tabela 5.1 sumariza os dados coletados referentes a cada processo durante as visitas à padaria. Estes dados já se encontram tratados pelos processos descritos anteriormente. Importante lembrar que as expressões de distribuição do *Input Analyzer* utilizam ponto ao invés de vírgula para separar as casas decimais.

São caracterizados cada processo de cada produto com seu número de amostras coletadas, distribuição recomendada pelo *Input Analyzer*, bem como seus valor-p e erro quadrado. As linhas que contêm o valor “geral” para a coluna “Produto” indicam que este processo é compartilhado por todos os produtos.

As expressões das distribuições utilizadas no Arena e seus respectivos parâmetros são apresentadas na seção 2.4.3 deste trabalho. No entanto, existe uma exceção na Tabela 5.1 referente ao processo da masseira (primeira linha). A expressão `CONST(600)` representa um processo determinístico com um tempo fixo de 600 segundos (ou 10 minutos). Este é o único processo na tabela que pôde ser inserido diretamente sem a necessidade de passar pelo *Input Analyzer*.

Alguns dos processos possuem o mesmo comportamento, mesmo que para diferentes subprodutos. Por exemplo, a divisora funciona de forma idêntica para a rosca média e o pão

Tabela 5.1: Tabela com dados obtidos e distribuições estatísticas.

Produto	Processo	Amostras	Distribuição (s)	valor-p	erro q.
geral	masseira	0	CONST(600)	-	-
geral	cilindro	20	NORM(384, 82.4)	> 0,15	0,0106
geral	corte e pes.	98	4 + GAMM(2.7,2.25)	> 0,15	0,0057
rosca média	divisora	70	NORM(21.8, 4.81)	> 0,15	0,0112
rosca média	modeladora	30	1.12+2.31*BETA(4.02,3.49)	> 0,15	0,0131
rosca média	trançar	132	NORM(23.6, 7.62)	> 0,15	0,0068
rosca de leite	corte	19	NORM(5.76, 1.12)	> 0,15	0,0054
rosca de leite	trançar	27	28 + 42 * BETA(1.06, 0.98)	> 0,15	0,0179
rosca amant.	cil. uma vez	65	1.17 + LOGN(3.81, 2.74)	> 0,15	0,0312
rosca amant.	corte	17	NORM(15.3, 2.88)	> 0,15	0,0217
rosca amant.	trançar	16	NORM(8.31, 1)	> 0,15	0,0141
rosca amant.	manteiga	11	4.15 + WEIB(1.17, 1.77)	> 0,15	0,0048
pão de leite	cil. uma vez	65	1.17 + LOGN(3.81, 2.74)	> 0,15	0,0312
pão de leite	enrolar	10	13.2 + LOGN(2.53, 1.99)	> 0,15	0,0110
pão tatu	divisora	70	NORM(21.8, 4.81)	> 0,15	0,0112
pão tatu	modeladora	49	2 + ERLA(1.12, 2)	> 0,15	0,0537
pão tatu	enrolar	122	NORM(6.71, 2.83)	> 0,15	0,0163

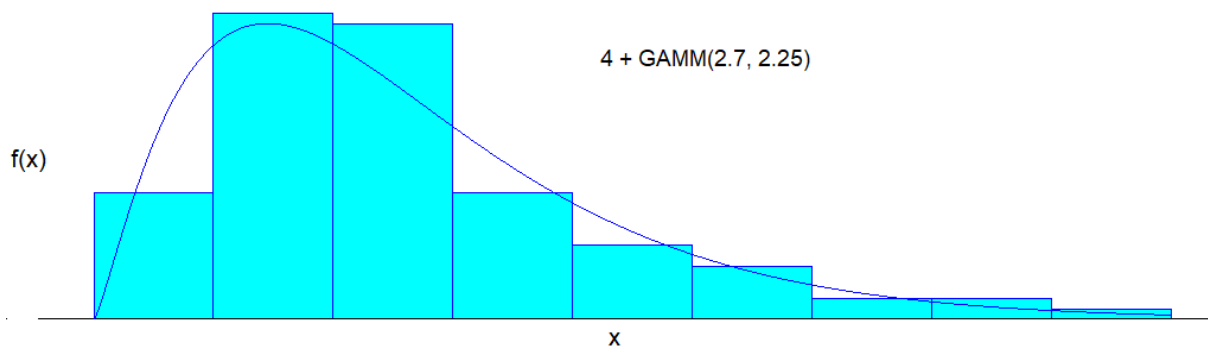
Fonte: Autoria própria.

tatu, portanto a mesma amostragem foi trabalhada em ambos. O mesmo acontece para “cilindro uma vez” para rosca amanteigada e pão de leite.

Foram encontrados através do *Input Analyzer* as distribuições estatísticas que mais se adequaram ao conjunto descrito. A unidade de medida utilizada nas expressões das distribuições de probabilidade é segundos. Os valores obtidos para valor-p e erro quadrado em cada processo se enquadram dentro do que é considerado confiável dentro dos limites impostos.

Nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 são apresentados os gráficos de algumas das distribuições obtidas.

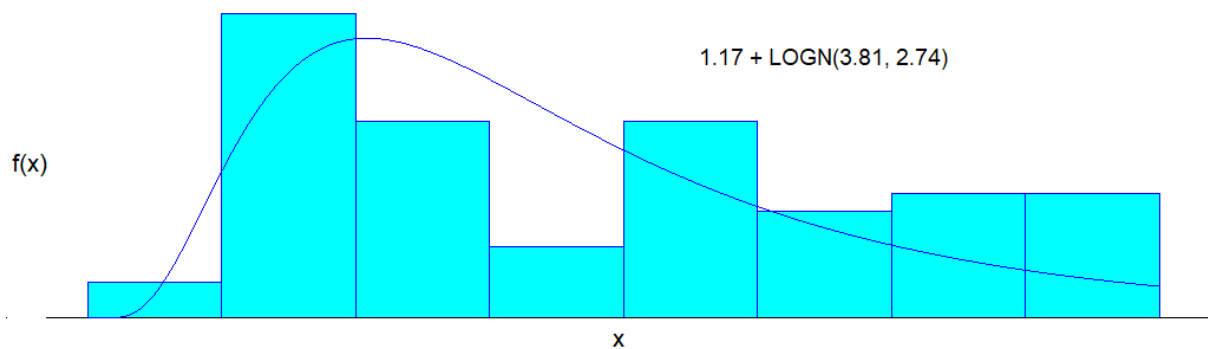
Figura 5.6: Distribuição de processo corte e pesagem.



Fonte: Autoria própria.

A expressão $4 + \text{GAMM}(2.7, 2.25)$ representa uma distribuição gama com média $\beta = 2,7$ e parâmetro de forma $\alpha = 2,25$.

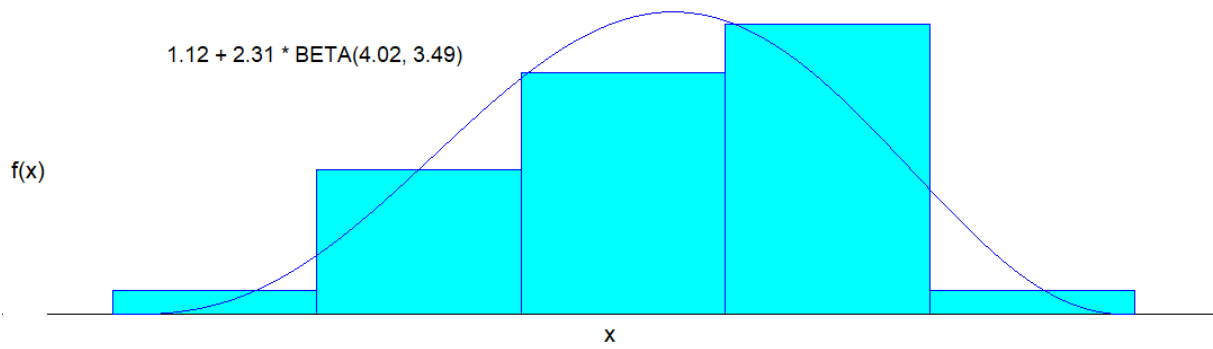
Figura 5.7: Distribuição de processo “cilindro uma vez”.



Fonte: Autoria própria.

A expressão $1.17 + \text{LOGN}(3.81, 2.74)$ representa uma distribuição lognormal com média $\mu = 3,81$ e desvio padrão $\sigma = 2,74$.

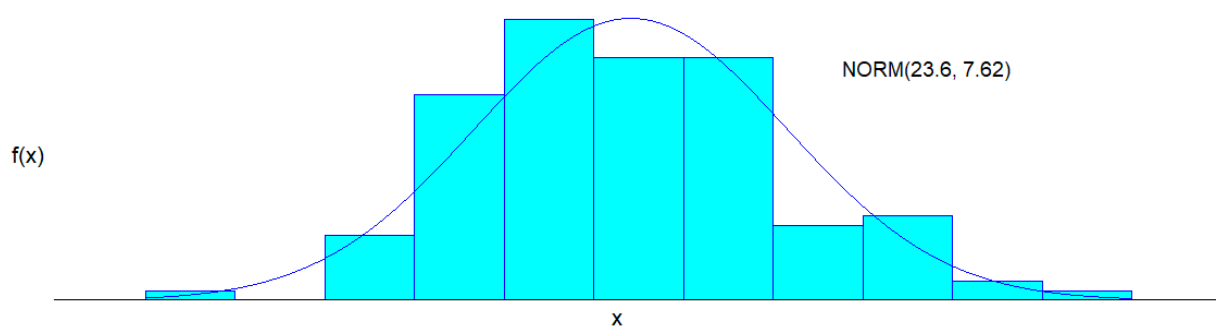
Figura 5.8: Distribuição de processo modeladora da rosca média.



Fonte: Autoria própria.

A expressão $1.12 + 2.31 * \text{BETA}(4.02, 3.49)$ representa uma distribuição beta com parâmetros de forma $\beta = 4,02$ e $\alpha = 3,49$.

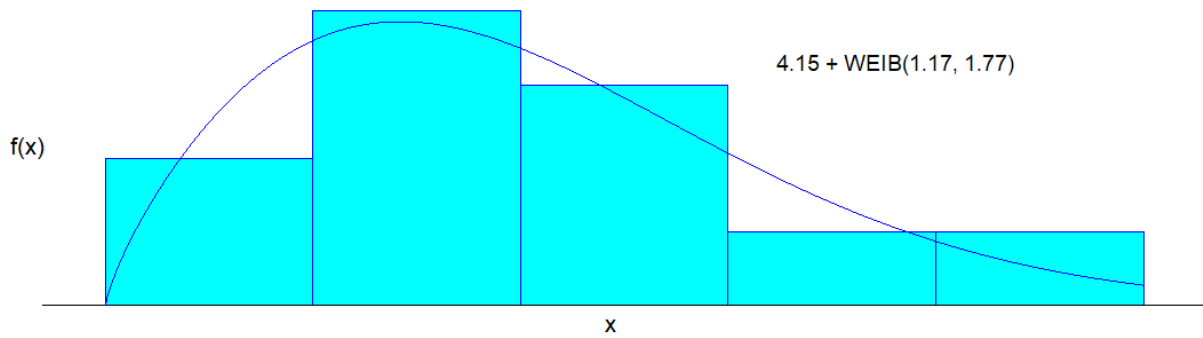
Figura 5.9: Distribuição de processo de trança da rosca média.



Fonte: Autoria própria.

A expressão $\text{NORM}(23.6, 7.62)$ representa uma distribuição normal com média $\mu = 23,6$ e desvio padrão $\sigma = 7,62$.

Figura 5.10: Distribuição de processo de amanteigar da rosca amanteigada.

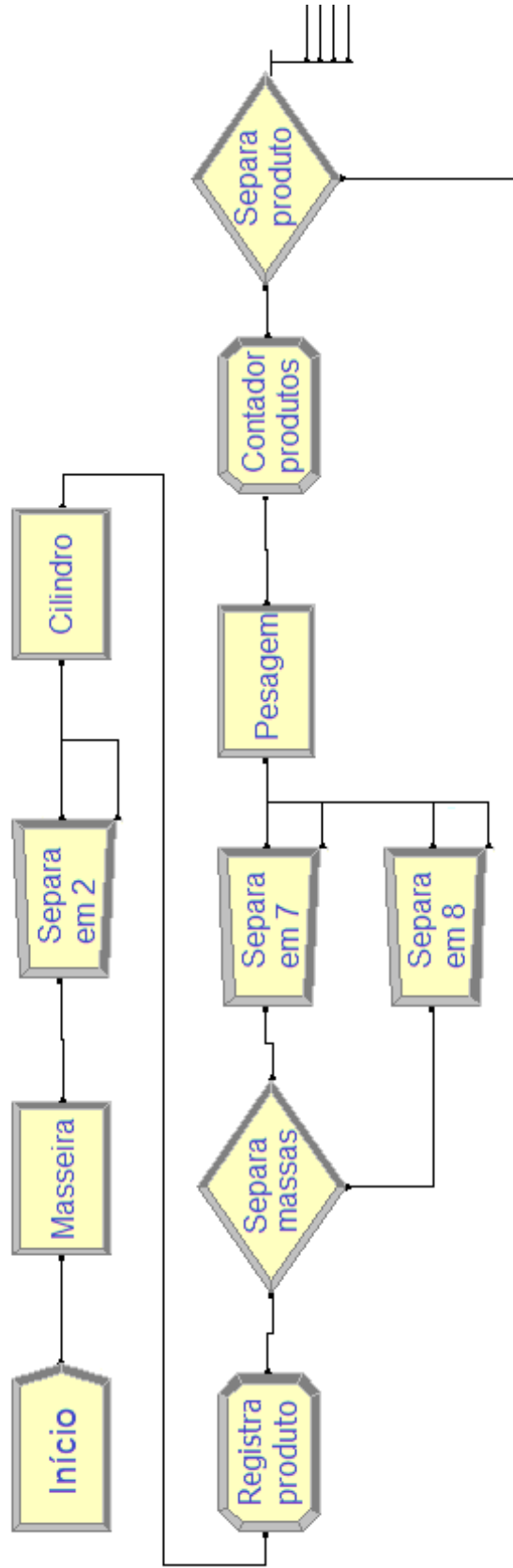


Fonte: Autoria própria.

A expressão $4.15 + WEIB(1.17, 1.77)$ representa uma distribuição Weibull com parâmetros de forma $\beta = 1,17$ e $\alpha = 1,77$.

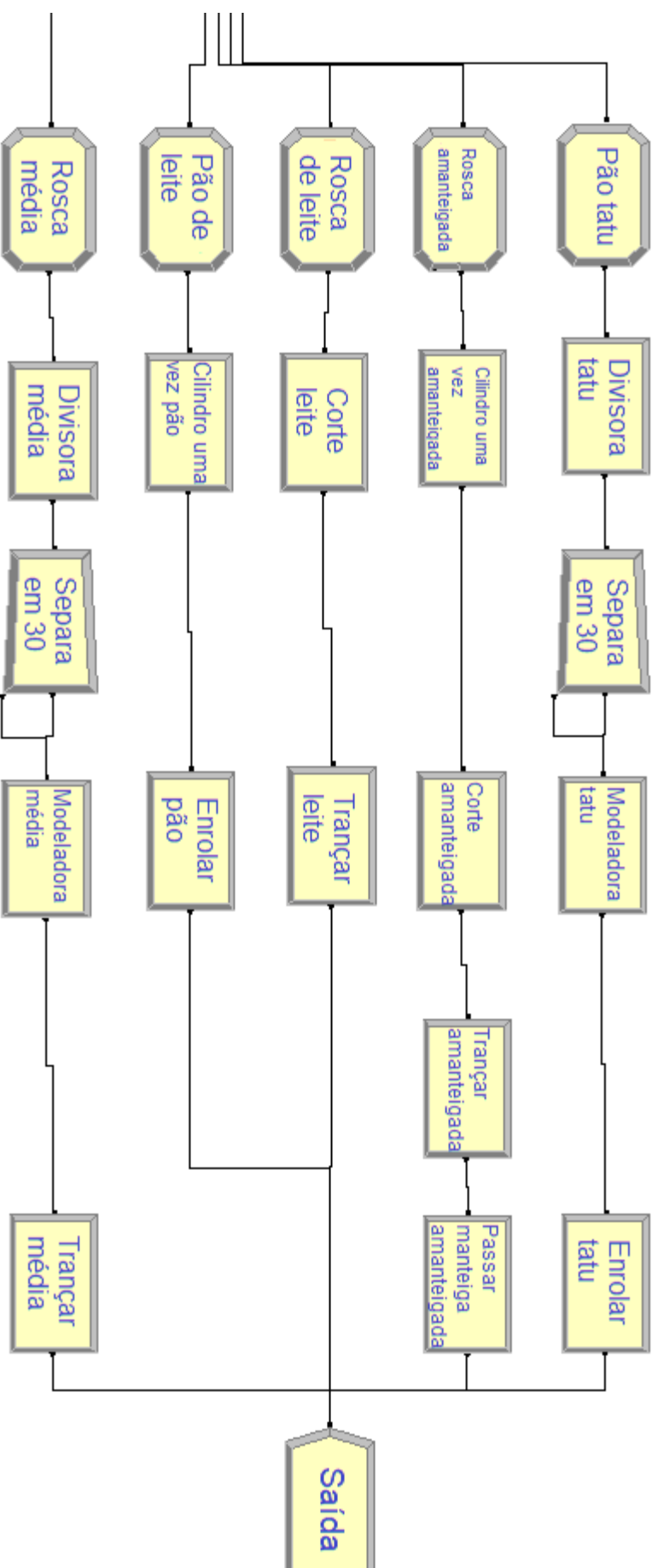
De posse das expressões das curvas de distribuição de cada processo, foi possível construir o modelo computacional no Arena, apresentado nas Figuras 5.11 e 5.12 (continuação). Estas imagens são obtidas pelo *software* e foram levemente adaptadas para melhor visualização neste trabalho.

Figura 5.11: Modelo computacional Arena adaptado parte 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.12: Modelo computacional Arena adaptado parte 2.



Fonte: Autoria própria.

O fluxo implementado neste modelo é semelhante ao fluxo idealizado pelas Figuras 5.1 e 5.2. A diferença está na caracterização dos módulos do Arena e na implementação de toda a lógica necessária para que a simulação seja possível de ser construída, obedecendo às restrições impostas.

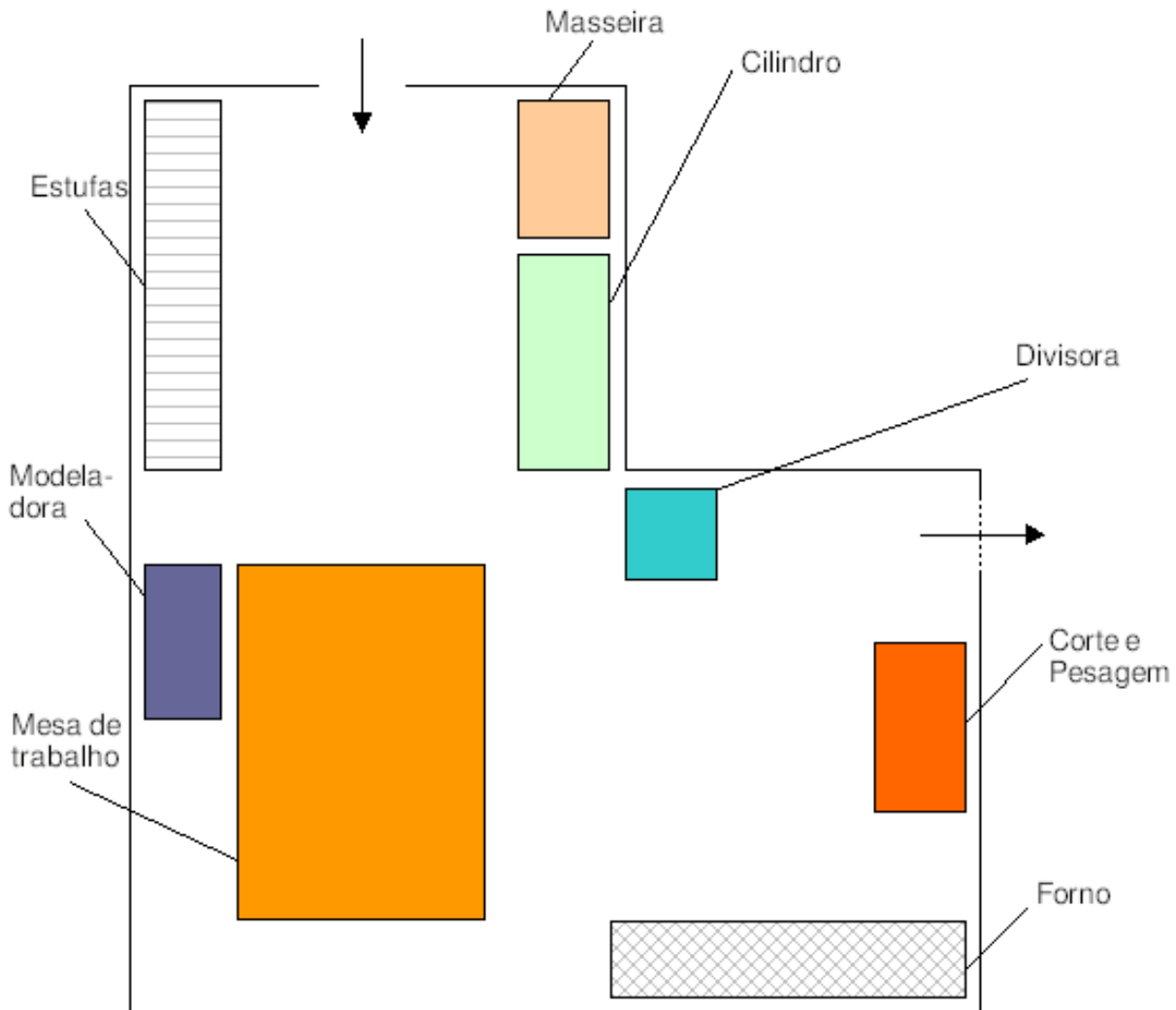
A seguir, são realizadas algumas considerações sobre o modelo. Algo importante a ser notado é a utilização do módulo *Separate* em alguns momentos para dividir massas.

Na Figura 5.11, o módulo *Decide* “Separar massas” em conjunto com o módulo *Assign* “Registra produto” foi utilizado para identificar cada massa gerada após o corte e pesagem.

Podendo ser observado pela Figura 5.12, o módulo *Assign* é utilizado para identificar o produto naquela ramificação específica do fluxo.

Na Figura 5.13 é apresentada a animação do modelo, onde também é possível visualizar a disposição das maquinarias no espaço de trabalho.

Figura 5.13: Animação do modelo computacional no Arena.



Fonte: Autoria própria.

Esta representação é meramente ilustrativa. As duas setas indicam respectivamente a entrada e saída do sistema produtivo como um todo, incluindo processos de estufa e forno (que não são parte desta simulação) do local de trabalho.

Logo na entrada, observa-se os processos de masseira e cilindro, representados por seus respectivos maquinários. Em seguida, a mesa de trabalho é utilizada para os processos de enrolamento, trança e amanteigar de massas. A modeladora, a divisora e a mesa de corte e pesagem também estão destacadas nesta Figura 5.13.

A massa pronta se encontra em assadeiras na mesa de trabalho, pronta para ser armazenada em estufa por algum tempo e levada ao forno logo em seguida.

O modelo foi simulado com 2 padeiros trabalhando simultaneamente nesta massa, que é o padrão da situação real. Existe um terceiro padeiro, trabalhando porém em outro produto fora do escopo deste trabalho.

A massa inicial quando passa pelo processo “Corte e Pesagem” é dividida em:

- 2 porções de massa de pão tatu;
- 5 porções de massa de rosca Amanteigada;
- 4 porções de massa de rosca de leite;
- 2 porções de massa de pão de leite;
- 2 porções de massa de rosca média;

Alguma dessas massas eventualmente sofrem divisões no processo “Divisora” (divisão em 30 partes). É o caso do pão tatu e rosca média.

Ao final, são produzidos:

- 60 pães tatu;
- 5 roscas amanteigadas;
- 4 roscas de leite;
- 2 pães de leite;
- 60 roscas médias;

O modelo foi replicado 20 vezes de forma estocástica, variando-se os tempos de execução de cada processo geradas pelas curvas de distribuição.

5.1.3 Verificação e Validação

A verificação foi feita majoritariamente de duas formas: teste unitário de cada módulo Arena utilizado e teste de integração do modelo completo.

No teste unitário, foram verificadas as entradas e saídas de cada processo, unidades de medidas utilizadas, distribuições de probabilidade, alocação de funcionários e lógica das expressões de atributos e módulos condicionais.

O teste de integração foi realizado observando-se o percurso das entidades do modelo e o tempo gasto total de simulação.

A validação do modelo foi realizada por meio da comparação do tempo final de processamento de toda a massa de rosca entre o modelo e o caso real por meio do Teste *T Student* de amostras independentes.

Além disso, o modelo computacional foi validado em consulta com funcionários e dono da padaria, identificando e corrigindo possíveis desvios de comportamento.

Foram comparadas 10 coletas de tempos reais (com média de 39,80 minutos e desvio padrão de 3,36 minutos) com 20 simulações independentes (com média de 40,77 minutos e desvio padrão de 1,22 minutos). Dois padeiros foram utilizados em ambos os casos: real e simulação.

O valor-p foi calculado com o auxílio da função T.TEST do Google Planilhas. O valor encontrado para valor-p foi de 0,2550.

Como o valor-p encontrado é maior que $\alpha = 0,05$, a hipótese nula do teste não é rejeitada. Não há evidências suficientes para dizer que estes dois conjuntos de dados possuem médias diferentes. Isto significa que neste quesito, o processo real está estatisticamente bem representado pelo modelo computacional.

5.2 Análise do Modelo

Conforme abordado na etapa anterior de verificação e validação, o modelo produzido obteve como resultado final uma média de 40,77 minutos dentre 20 simulações. Este valor foi validado com a situação real com média de 39,80 minutos.

A Tabela 5.2 apresenta os tempos médios de espera em fila e os tamanhos médios de fila encontrados para cada processo estudado.

Nota-se um maior surgimento de filas nos processos de modeladora e trança da rosca média (7,95 e 10,05 unidades médias). Este comportamento é condizente com a sistema produ-

Tabela 5.2: Tempo médio de espera em fila e tamanho médio de fila.

Produto	Processo	T. espera (min)	Tam. de fila (un)
geral	masseira	0	0
geral	cilindro	0	0
geral	corte e pes.	0,93	0,34
rosca média	divisora	2,83	0,14
rosca média	modeladora	5,39	7,95
rosca média	trançar	6,82	10,05
rosca de leite	corte	2,96	0,29
rosca de leite	trançar	3,83	0,38
rosca amant.	cil. uma vez	1,07	0,13
rosca amant.	corte	2,84	0,35
rosca amant.	trançar	5,18	0,64
rosca amant.	manteiga	6,12	0,75
pão de leite	cil. uma vez	2,89	0,14
pão de leite	enrolar	4,74	0,23
pão tatu	divisora	0,93	0,05
pão tatu	modeladora	2,00	2,95
pão tatu	enrolar	4,19	6,19

Fonte: Autoria própria.

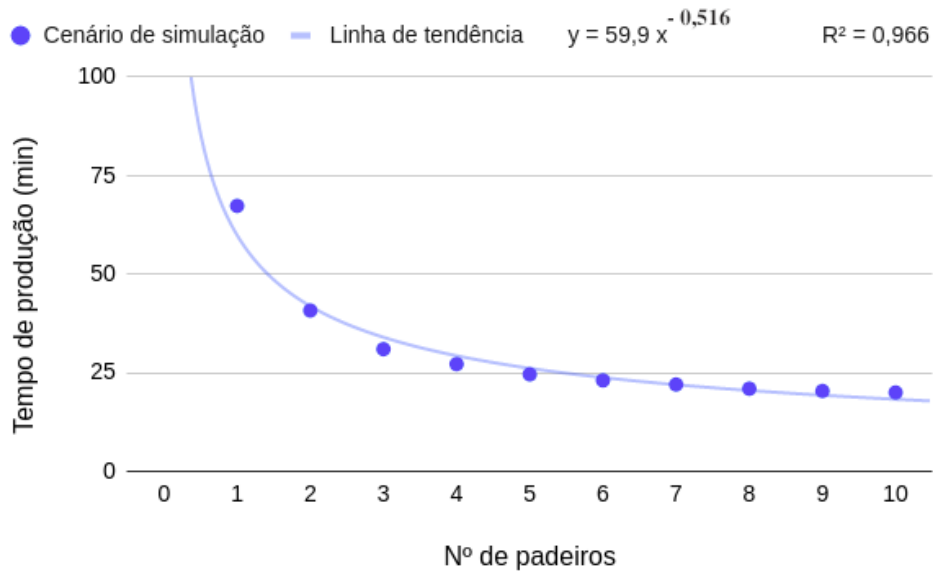
tivo real, onde é possível visualizar este gargalo no sistema. Isto é ainda mais uma contribuição para a validade do modelo.

Estes processos podem estar atrasando todo a produção como um todo. São pontos passíveis de otimização.

Os processos de enrolamento do pão de leite e do pão tatu apresentaram tempos de esperas um pouco mais elevados que os demais (médias de 4,74 e 4,19 minutos). Porém estes processos são mais demorados e pertencem a produtos com poucas unidades de fabricação. A presença de fila pode estar mais associada como consequência do gargalo na rosca média descrito anteriormente.

Para efeitos de comparação e busca de otimização, foram realizadas outras simulações de 20 replicações cada, variando-se o número de padeiros em exercício na produção estudada. Os resultados foram plotados no gráfico da Figura 5.14.

Figura 5.14: Comparação entre cenários com diferentes número de padeiros.



Fonte: Autoria própria.

Como esperado, o aumento no número de padeiros resulta em um menor tempo de produção da massa como um todo, porém esta relação não é linear e os ganhos de produtividade são cada vez menores.

Não é viável economicamente, nem logisticamente, alocar estas quantidades de padeiros para a produção desta massa. Porém a comparação foi feita para se ter um entendimento visual do comportamento do fenômeno.

Como é observado na Figura 5.14, existe um decaimento rápido até três padeiros, quando começa a tender a uma constância. Pôde-se traçar um curva de tendência com coeficiente de determinação $R^2 = 0,966$ obedecendo a equação $y = 59,9x^{-0,516}$

A redução de tempos entre um padeiro (67,30 minutos) e dois padeiros (40,77 minutos) é considerável, de 39,42%. O processo real já adota esta situação de utilizar dois padeiros.

Entre dois padeiros e três padeiros (30,98 minutos), há uma redução de 24%. Esta alternativa pode vir a se tornar uma alternativa viável. Não necessariamente precisa-se do terceiro padeiro em todos os processos, mas principalmente nos gargalos do sistema. É uma situação de

otimização que tem potencial de reduzir gastos e tempo, que pode vir a ser analisada.

O cenário de quatro padeiros não é tão promissor. O ganho com a redução de tempo (12,26% em relação ao de 3 padeiros) pode ser pequeno para justificar um gasto elevado de contratação de outros funcionários.

Acima de quatro padeiros, a situação se torna bastante improvável e portanto não cabe a ser discutida.

5.3 Cenário com três padeiros

De acordo com a simulação realizada, alterar o número de padeiros de dois para três resulta em uma redução no tempo de produção de 24%, ou 9,80 minutos.

A questão é se este ganho de tempo é significativo para justificar a contratação de um novo padeiro. Isso vai depender muito da demanda da padaria. O produto em estudo é realizado uma vez por dia na parte da manhã, porém estes 9,80 minutos podem ser utilizados para a realização de outros produtos.

Não só isso, além de ganhar com produtividade na massa de rosca, provavelmente todos os outros produtos também sairiam beneficiados com a adoção de um padeiro a mais. 24% pode ser um valor significativo.

Uma outra alternativa viável, caso a contratação de um novo padeiro não seja proveitosa, é a de tomar emprestado o terceiro padeiro (que no momento de produção desta massa trabalha com outro produto) somente durante o gargalo do sistema.

Apesar de não se ter simulado esta situação em específico (o que exigiria um modelo mais complexo), os resultados indicam que seria uma escolha plausível. O gasto seria mínimo e o ganho com a eliminação do gargalo pode, na melhor das hipóteses, atingir até 9,80 minutos. Cabe analisar também se é vantajoso o terceiro padeiro pausar o produto que ele estaria trabalhando no momento do gargalo.

5.4 Análise econômica

Foi feita uma comparação entre os custos com o padeiro e o lucro obtido com a venda dos produtos derivados da massa estudada, considerando que todos são vendidos.

O custo da massa pode ser calculado através da Tabela 5.3, em que os preços dos ingredientes foram obtidos com o dono da padaria no ano de 2021.

Tabela 5.3: Custos de produção da massa de rosca em 2021.

Ingrediente	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Trigo	10 kg	R\$ 3,30 / kg	R\$ 33,00
Ovo	40 un	R\$ 0,40 / un	R\$ 16,00
Sal	160 g	R\$ 1,25 / kg	R\$ 0,20
Reforçador	100 g	R\$ 9,00 / kg	R\$ 0,90
Manteiga	1 kg	R\$ 10,60 / kg	R\$ 10,60
Leite	3 l	R\$ 3,50 / l	R\$ 10,50
Açúcar	2 kg	R\$ 3,40 / kg	R\$ 6,80
Fermento	400 g	R\$ 16,25 / kg	R\$ 6,50
Total			R\$ 84,50

Fonte: Autoria própria.

O custo de produção da massa é de R\$ 84,50, sem levar em conta a energia despendida no processo.

A padaria gasta em média R\$ 3.500,00 de luz ao mês. Considerando 30 dias no mês e 8 horas de trabalho por dia, isso equivale a R\$ 14,58 por hora. Foi adotado 2 horas de energia para a produção dessa massa, considerando o tempo de produção médio e o tempo de forno (aproximadamente 1 hora). Logo, o valor de energia encontrado para a produção desta massa foi de R\$ 29,16. Estima-se então um total de R\$ 114,00 de custo de produção diário. No mês, este custo é de R\$ 3.420,00.

A Tabela 5.4 apresenta os valores, quantidades e o total em reais obtido com a venda de todos os produtos gerados pela massa de rosca em um dia.

Considerando-se um mês de 30 dias e que a massa é produzida todos os dias, o valor obtido em um mês é de R\$ 8.415,00.

O lucro bruto obtido com a massa de rosca em um mês é obtido subtraindo-se o valor obtido com a venda e o custo total de produção. O lucro é de R\$ 4.995,00.

O cenário de otimização proposto apresenta uma redução de 24% no tempo de produção.

Tabela 5.4: Venda dos produtos derivados da massa de rosca em um dia.

Produto	Quantidade	Valor	Total
Pão tatu	60 un	R\$ 1,50	R\$ 90,00
Rosca amanteigada	5 un	R\$ 6,50	R\$ 32,50
Rosca de leite	4 un	R\$ 6,50	R\$ 26,00
Pão de leite	2 un	R\$ 6,00	R\$ 12,00
Rosca média	60 un	R\$ 2,00	R\$ 120,00
		Total	R\$ 280,50

Fonte: Autoria própria.

Considerando-se para fins de comparação, de que esse tempo poderia ser utilizado para a confecção de uma nova massa de rosca, e que todos os seus produtos derivados fossem vendidos, isso significa um lucro adicional de R\$ 1.198,80 (24% de R\$ 4.995,00).

O salário médio de um padeiro no Brasil em 2021 é de R\$ 1.611,00 (VAGAS, 2021). O lucro adicional representa 74,41% do salário de um padeiro. Olhando por essa ótica, parece bem interessante a adoção de um terceiro funcionário. A contribuição para essa massa é alta, e provavelmente essa contribuição será bem maior considerando-se a mão-de-obra extra nos outros produtos e processos envolvidos na padaria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A princípio este trabalho também iria realizar o estudo descrito em algumas outras padarias da região. Porém, devido à pandemia de Covid-19 entre os anos de 2020 e 2021, a logística de visita aos locais de trabalho foi prejudicada e a pesquisa se tornou restrita e difícil de ser realizada. Assim, o objeto de estudo deste trabalho ficou restrito à elaboração de modelo computacional para uma padaria.

Dentro deste escopo, foi possível atingir os objetivos propostos culminando na elaboração de um modelo computacional condizente com a situação estudada. Os resultados foram satisfatórios e promovem informações relevantes para a otimização da padaria.

Neste quesito, a pesquisa demonstra relevância no sentido em que foi encontrado um resultado positivo para a simulação. Alternativas de otimização do processo produtivo foram propostas e uma delas apresenta uma redução de até 24% no tempo de produção. Isto significa que existe uma margem de potencial investimento que pode se beneficiar para a empresa.

Como estimado, o lucro obtido com o preenchimento das lacunas de produção seria maior do que o possível gasto com uma mão-de-obra extra. Esse tipo de informação é relevante para a tomada de decisão estratégica por parte do dono do estabelecimento ou gestor. Diversas variáveis estão envolvidas no empreendimento como um todo, porém conclusões importantes podem ser obtidas com o isolamento e análise de sistemas fechados simples dentro de complexidades maiores.

A simulação computacional de processos produtivos se torna uma grande aliada a empreendimentos de qualquer tamanho, quando conseguem ser simples, eficientes e fiéis a situações reais de sistemas de produção.

REFERÊNCIAS

- ABIP. *Indicadores de panificação e confeitaria brasileira em 2019*. 2020. Disponível em: <<https://www.abip.org.br/site/indicadores-da-panificacao-e-confeitaria-em-2019-2/>>. Acesso: 20 de junho de 2020.
- ARENALES, M. et al. *Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Editora Campus. [S.l.]: Elsevier, 2007.
- BANKS, J. *Discrete event system simulation*. [S.l.]: Pearson Education India, 2005.
- BHAT, U. N. *An introduction to queueing theory: modeling and analysis in applications*. [S.l.]: Birkhäuser, 2015.
- CHUNG, C. A. *Simulation modeling handbook: a practical approach*. [S.l.]: CRC press, 2003.
- ESPOSITO, E. et al. Virtual enterprise in sme networks. *Piccola Impresa/Small business*, n. 3, 2009.
- FERNANDO, J. *R-squared definition*. 2022. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/terms/r/r-squared.asp>>. Acesso: 14 de janeiro de 2022.
- FOGLIATTI, M. C.; MATTOS, N. M. Teoria de filas. *Rio de Janeiro: Interciência*, p. 1–20, 2007.
- FORBES, C. et al. *Statistical distributions*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- FREITAS FILHO, P. J. d. *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena*. [S.l.]: Visual Books, 2001.
- GARTNER. *Smarter With Gartner: Insights that drive stronger performance*. 2020. Disponível em: <<https://www.gartner.com/smarterwithgartner>>. Acesso: 09 de julho de 2020.
- GIL, A. C. et al. *Como elaborar projetos de pesquisa*. [S.l.]: Atlas São Paulo, 2002. v. 4.
- HECKER, F.; HUSSEIN, W.; BECKER, T. Analysis and optimization of a bakery production line using arena. *International journal of simulation modelling*, DAAAM International Vienna, v. 9, n. 4, p. 208–216, 2010.

IANNONI, A. P.; MORABITO, R. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. *Gestão & produção*, SciELO Brasil, v. 9, n. 2, p. 107–127, 2002.

KELTON, W. et al. Simulation with arena. *Sydney: McGraw4Hill*, 2003.

LACERDA, L. P. et al. Aplicação da teoria de filas via modelagem computacional em uma empresa de lavagem de veículos. *Research, Society and Development 2021, ISSN 2525-3409*, 2021.

LEAP. *Industry 4.0*. 2020. Disponível em: <<https://www.leapaust.com.au/industry-4-0/>>. Acesso: 09 de julho de 2020.

MOZILLA. *Drag and Drop*. 2021. Disponível em: <<https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/API/HTML-Drag-and-Drop-API>>. Acesso: 14 de agosto de 2021.

OLIVEIRA, C. S. d. Aplicação de técnicas de simulação em projetos de manufatura enxuta. 2008.

PERGHER, I.; VACCARO, G. L.; PRADELLA, M. Aplicação da simulação computacional para determinar a capacidade produtiva do processo de produção de pães: um estudo de caso. *Produto & Produção*, v. 14, n. 1, 2013.

PRADO, D. Usando o arena em simulação. *Belo Horizonte: INDG Tecnologia e Serviços Ltda*, 2010.

PRATI, R. *Outliers. Detecção de anomalias*. 2020. Disponível em: <<http://professor.ufabc.edu.br/~ronaldo.prati/DataMining/Outliers.pdf>>. Acesso: 13 de outubro de 2020.

REBOVICH, G. Mitre systems engineering guide. *The MITRE Corporation*, v. 2, 2014.

REZENDE, H. P. de et al. Avaliação dos tempos de espera em uma panificadora utilizando simulação computacional. *XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 2010.

ROCKWELL. *Arena Simulation Software*. 2022. Disponível em: <<https://www.rockwellautomation.com/pt-br/products/software/arena-simulation.html>>. Acesso: 15 de janeiro de 2022.

SANTOS, A. A. d. et al. Modelagem e análise de um processo de produção em uma pequena panificadora utilizando um simulador de código livre. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 6, n. 1, p. Páginas–148, 2014.

SEBRAE. Indústria: Panificação. *Salvador, Bahia*, 2017.

SILVA, E. L. d.; MENEZES, E. M. A pesquisa e suas classificações. _____. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*, v. 3, p. 19–23, 2005.

VAGAS. *Salário de padeiro*. 2021. Disponível em: <<https://www.vagas.com.br/cargo/padeiro-confeiteiro>>. Acesso: 7 de janeiro de 2021.

WACHHOLZ, L. *Análise e simulação do processo de produção de pão francês em uma panificadora de pequeno porte: um estudo de caso*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

WALCK, C. et al. Hand-book on statistical distributions for experimentalists. *University of Stockholm*, v. 10, 2007.

**ANEXO A – RELATÓRIO GERAL DE RESULTADO DE SIMULAÇÃO GERADO
PELO ARENA**

Simulação de massa de rosca de uma padaria

Replications: 20

Time Units: Hours

Key Performance Indicators

System

Number Out

Average

131

Values Across All Replications

Simulação de massa de rosca de uma padaria

Replications: 20 Time Units: Hours

Entity

Time

VA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.00906932	0,00	0.00851695	0.00980577	0.00059353	0.35
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.1585	0,01	0.1238	0.1938	0.05242224	0.41
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Other Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0.1675	0,01	0.1328	0.2028	0.06013480	0.49

Other

Number In	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		
Entity 1	131.00	0,00	131.00	131.00		
Number Out	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		
Entity 1	131.00	0,00	131.00	131.00		
WIP	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	32.3210	1,81	25.8163	39.4220	0.00	131.00

Simulação de massa de rosca de uma padaria

Replications: 20 Time Units: Hours

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
cilindro uma vez amanteigada.Queue	0.01797626	0,00	0.01139482	0.02425565	0.00813765	0.025939
cilindro uma vez pao.Queue	0.04825414	0,01	0.01647404	0.07386735	0.01553969	0.074179
Cilindro.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
corte amanteigada.Queue	0.04743932	0,00	0.03474414	0.05785545	0.02830452	0.061533
corte leite.Queue	0.04933800	0,01	0.01969841	0.07485129	0.01621854	0.075622
Divisora media.Queue	0.04718238	0,01	0.01468371	0.07290077	0.01344124	0.072989
Divisora tatu.Queue	0.01557158	0,00	0.01068226	0.02525694	0.00945965	0.026670
enrolar pao.Queue	0.07900157	0,01	0.02897489	0.1048	0.02557232	0.10
enrolar tatu.Queue	0.06999693	0,01	0.05924438	0.1038	0.04520563	0.11
manteiga amanteigada.Queue	0.1020	0,03	0.01240488	0.2129	0.01155146	0.23
Masseira.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
modeladora media.Queue	0.08999824	0,01	0.04194890	0.1134	0.03146826	0.12
modeladora tatu.Queue	0.03336538	0,00	0.02474383	0.03778635	0.00805063	0.056525
Pesagem.Queue	0.01554648	0,00	0.00867119	0.03389462	0.00	0.060471
trancar amanteigada.Queue	0.08641868	0,01	0.06390482	0.1080	0.05932197	0.11
trancar leite.Queue	0.06390898	0,01	0.01826377	0.08399640	0.01143445	0.09
trancar media.Queue	0.1137	0,01	0.0989	0.1640	0.02000313	0.25

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
cilindro uma vez amanteigada.Queue	0.1326	0,01	0.08195686	0.1808	0.00	5.00
cilindro uma vez pao.Queue	0.1425	0,02	0.04858684	0.2192	0.00	2.00
Cilindro.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
corte amanteigada.Queue	0.3493	0,02	0.2621	0.4171	0.00	5.00
corte leite.Queue	0.2915	0,04	0.1175	0.4442	0.00	4.00
Divisora media.Queue	0.1393	0,02	0.04378270	0.2163	0.00	2.00
Divisora tatu.Queue	0.04608167	0,01	0.03138178	0.07725824	0.00	2.00
enrolar pao.Queue	0.2325	0,04	0.08355931	0.3060	0.00	2.00
enrolar tatu.Queue	6.1893	0,50	5.1581	9.1859	0.00	60.00
manteiga amanteigada.Queue	0.7470	0,22	0.0914	1.5845	0.00	5.00
Masseira.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
modeladora media.Queue	7.9470	1,01	3.8319	9.9975	0.00	60.00
modeladora tatu.Queue	2.9520	0,15	2.2027	3.4548	0.00	60.00
Pesagem.Queue	0.3444	0,09	0.1887	0.7447	0.00	13.00
trancar amanteigada.Queue	0.6353	0,05	0.4637	0.7887	0.00	5.00
trancar leite.Queue	0.3762	0,07	0.1053	0.4999	0.00	4.00
trancar media.Queue	10.0462	0,76	8.6106	14.6703	0.00	60.00

*Values Across All Replications***Simulação de massa de rosca de uma padaria**

Replications: 20 Time Units: Hours

Resource**Usage**

Instantaneous Utilization	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Padeiro	0.8749	0,00	0.8645	0.8851	0.00	1.00
Number Busy	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Padeiro	1.7499	0,00	1.7291	1.7703	0.00	2.00
Number Scheduled	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Padeiro	2.0000	0,00	2.0000	2.0000	2.0000	2.00
Scheduled Utilization	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		
Padeiro	0.8749	0,00	0.8645	0.8851		
Total Number Seized	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		
Padeiro	294.00	0,00	294.00	294.00		

*Values Across All Replications***Unnamed Project**

Replications: 20 Time Units: Hours

ANEXO B – APROVAÇÃO DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP**DADOS DO PROJETO DE PESQUISA**

Título da Pesquisa: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO PRODUTIVO DE PADARIAS UTILIZANDO ARENA

Pesquisador: PEDRO RAMALHO FIGUEIREDO

Área Temática:

Versão: 1

CAAE: 21924519.2.0000.5108

Instituição Proponente: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 3.618.395

Apresentação do Projeto:

Programas de simulação computacional são ferramentas poderosas no processo de tomada de decisão de uma empresa. O software ARENA é um exemplo bastante conhecido no mercado. Com este projeto, tem-se como objetivo compreender os processos envolvidos na produção de pães de cinco padarias a partir do uso de simulação computacional e propor melhorias e otimizações para a maximização produtiva destes processos. Será criado um modelo dinâmico, discreto e estocástico no programa citado, com base em distribuições de probabilidade a partir de dados mensurados no local. Estes dados são os tempos de operação dos processos e maquinários, bem como as taxas de transferência de entidades pelo sistema. O modelo é verificado e validado com o sistema real, comprovando a sua confiabilidade e precisão. O tamanho das amostras a serem coletadas e o número de iterações do modelo será calculado considerando níveis de confiança aceitáveis para as variáveis e resultados. Propostas de otimização serão testadas e comparadas com o modelo padrão, sendo sugeridas para aplicação no processo real ao gestor do estabelecimento.

Objetivo da Pesquisa:

Objetivo Primário:

Este projeto tem como objetivo compreender os processos produtivos envolvidos na produção de cinco padarias a partir do uso de simulação computacional e propor melhorias e otimizações para

Endereço: Rodovia MGT 367 - Km 583, nº 5000

Bairro: Alto da Jacuba

CEP: 39.100-000

UF: MG

Município: DIAMANTINA

Telefone: (38)3532-1240

Fax: (38)3532-1200

E-mail: cep.secretaria@ufvjm.edu.br

Continuação do Parecer: 3.618.395

a maximização produtiva destes processos.

Objetivo Secundário:

- Estudar as demandas e o sistema produtivo da padaria;
- Identificar o fluxo de produção e as etapas envolvidas no processo produtivo;
- Obter os dados de entrada referentes ao processo produtivo para o modelo computacional;
- Criar o modelo computacional com base nos dados de entrada obtidos;
- Comparar os resultados obtidos a partir da coleta com os obtidos pelo modelo computacional;
- Identificar gargalos no sistema e apresentar possíveis sugestões de otimização;
- Aplicar a possível otimização no sistema real e verificar sua eficiência.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Riscos:

Na coleta de dados dos processos produtivos, é possível que a presença do observador gere incômodo aos funcionários. Isto pode ser minimizado com as seguintes atitudes:

- Não identificação de dados/informações pessoais do funcionário, não possibilitando a sua identificação em nenhum momento da pesquisa e publicação de artigos científicos;
- Explicação aos funcionários acerca dos procedimentos da pesquisa;
- Explicação aos funcionários de que o observador não tem a função de monitorar ou denunciar o comportamento dos mesmos durante o trabalho;
- A coleta de dados será feita em local que não atrapalhe a rotina de trabalho.

Benefícios:

Otimização dos recursos nas empresas estudadas, contribuindo para aumento na produtividade, redução de gastos e melhor entendimento dos processos produtivos.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

Metodologia Proposta:

1. Classificação da pesquisa Quanto à natureza, o projeto se enquadra como pesquisa aplicada, que segundo Silva e Menezes (2005), objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática prevista. Do ponto de vista da forma de abordagem, a pesquisa é quantitativa pois vem traduzir em números e informações para classificá-las e analisá-las por uso de recursos e de técnicas estatísticas (SILVA E MENEZES, 2005). A respeito de seus objetivos, pode ser considerada como pesquisa descritiva que, segundo Gil (2002), visa descrever as características de determinado fenômeno, envolvendo técnicas

Endereço: Rodovia MGT 367 - Km 583, nº 5000

Bairro: Alto da Jacuba

CEP: 39.100-000

UF: MG

Município: DIAMANTINA

Telefone: (38)3532-1240

Fax: (38)3532-1200

E-mail: cep.secretaria@ufvjm.edu.br

Continuação do Parecer: 3.618.395

padronizadas de coleta de dados e estabelecendo relações entre variáveis. Com relação aos procedimentos técnicos, o projeto envolve a pesquisa experimental, pois é determinado um objeto de estudo e são selecionadas variáveis através da modelagem e simulação. Também há pesquisa bibliográfica, utilizando-se conhecimentos a partir de material já publicado de livros, artigos e periódicos, para a comparação com trabalhos similares e o aprendizado do uso da ferramenta (GIL, 2002).

2. Processo produtivo e coleta de dados Inicialmente será feito um estudo abrangente nos estabelecimentos, identificando os seus produtos fabricados e seus respectivos processos produtivos. Serão selecionados todas as etapas e procedimentos (exemplo: mistura de massa, amassamento, forno) inerentes à produção para a construção do modelo computacional.

Para cada processo, será identificado o tempo de operação, junto com os intervalos de chegada das entidades (subprodutos). Para tempos de operação fixos (tempo de assamento de forno por exemplo), estes valores são constantes. Para demais operações, os tempos serão obtidos por medição em cronômetro pelo pesquisador, por meio da observação do trabalho dos funcionários, e anotados em caderneta pessoal.

3. Verificação e validação do modelo A verificação do modelo consiste em avaliar se o modelo é consistente em sua lógica, sem apresentar erros de simulação. A validação consiste em mensurar se o modelo computacional é aplicável ao mundo real, se ambos possuem resultados compatíveis.

Para a verificação, Freitas Filho (2008) sugere que a simulação seja testada utilizando modelos determinísticos. Esta abordagem é importante pois a variabilidade das respostas do programa devido ao comportamento das variáveis aleatórias pode dificultar a interpretação. Assim, para fins de verificação, serão atribuídos valores determinísticos a estas variáveis. Com isto, fica mais simples a previsão de respostas do sistema e, como consequência, a verificação e busca de erros nos vários módulos do programa.

Para a validação do modelo será utilizado o teste-t para amostras independentes na comparação entre resultados do modelo simulado e do processo real, com o objetivo de verificar se o modelo pode, ou não, com a sua devida aproximação, representar a realidade.

4. Simulação e replicações do modelo Para fins de análise de resultados, serão analisados os tempos gastos no processamento de cada produto estudado, o tamanho de filas no sistema e o índice de utilização (razão entre tempo útil de operação e tempo total) de cada maquinário.

5. Comparação de resultados e alternativas

A comparação de alternativas de projetos costuma ser uma atividade comum entre usuários de modelagem e simulação de sistemas. Alternativas ao modelo podem compreender desde uma

Endereço: Rodovia MGT 367 - Km 583, nº 5000

Bairro: Alto da Jacuba

CEP: 39.100-000

UF: MG

Município: DIAMANTINA

Telefone: (38)3532-1240

Fax: (38)3532-1200

E-mail: cep.secretaria@ufvjm.edu.br

Continuação do Parecer: 3.618.395

mudança em um parâmetro até uma lógica diferenciada que reflita uma variação fundamental no funcionamento do sistema (FREITAS FILHO, 2008).

Estas alternativas serão propostas através do senso comum e aplicadas no sistema em um processo iterativo de acerto e erro, visto que com o modelo verificado e validado, fica fácil o teste de situações hipotéticas semelhantes.

Verifica-se então as diferenças entre os resultados das propostas de otimização e o modelo real. Caso sejam significativas e positivas, será analisado a viabilidade e possíveis custos de aplicação de cada cenário.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

O pesquisador apresentou ao CEP:

- 1) Informações básicas do projeto;
- 2) Folha de rosto assinada;
- 3) Carta de Instituição co-participante;
- 4) Projeto detalhado;
- 5) Cronograma de pesquisa;
- 6) Currículo lattes do pesquisador;
- 7) Roteiro de coleta de dados;
- 8) TCLE.

Recomendações:

De Acordo com a Resolução CNS 510-2016:

Art. 1º - Parágrafo único. Não serão registradas nem avaliadas pelo sistema CEP /CONEP:

VII - pesquisa que objetiva o aprofundamento teórico de situações que emergem espontânea e contingencialmente na prática profissional, desde que não revelem dados que possam identificar o sujeito.

Neste sentido, a partir das informações apresentadas nas Informações Básicas do Projeto, o CEP verificou que o projeto apresentado não se configura como pesquisa e o mesmo só avalia projetos que caracterizam pesquisas, desde que não revelem dados que possam identificar o sujeito.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

O parecer do CEP é para Retirar o projeto, uma vez que as informações apresentadas não se caracterizam como pesquisa, conforme item VII do Art. 1º da Resolução CNS 510-2016.

Endereço: Rodovia MGT 367 - Km 583, nº 5000

Bairro: Alto da Jacuba

CEP: 39.100-000

UF: MG

Município: DIAMANTINA

Telefone: (38)3532-1240

Fax: (38)3532-1200

E-mail: cep.secretaria@ufvjm.edu.br

Continuação do Parecer: 3.618.395

Considerações Finais a critério do CEP:

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_1400096.pdf	25/09/2019 13:34:08		Aceito
Folha de Rosto	folha_de_rosto_assinada.pdf	25/09/2019 13:25:06	PEDRO RAMALHO FIGUEIREDO	Aceito
Outros	Curriculo_Lattes.pdf	22/09/2019 20:35:57	PEDRO RAMALHO FIGUEIREDO	Aceito
Outros	Carta_Co_participe.pdf	22/09/2019 20:09:45	PEDRO RAMALHO FIGUEIREDO	Aceito
Outros	Coleta_de_Dados.pdf	22/09/2019 20:09:29	PEDRO RAMALHO FIGUEIREDO	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE.pdf	22/09/2019 20:07:26	PEDRO RAMALHO FIGUEIREDO	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto.pdf	22/09/2019 20:07:13	PEDRO RAMALHO FIGUEIREDO	Aceito
Cronograma	Cronograma.pdf	22/09/2019 20:06:47	PEDRO RAMALHO FIGUEIREDO	Aceito

Situação do Parecer:

Retirado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

DIAMANTINA, 03 de Outubro de 2019

Assinado por:

**Raquel Schwenck de Mello Vianna Soares
(Coordenador(a))**

Endereço: Rodovia MGT 367 - Km 583, nº 5000

Bairro: Alto da Jacuba

CEP: 39.100-000

UF: MG

Município: DIAMANTINA

Telefone: (38)3532-1240

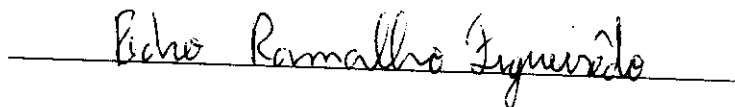
Fax: (38)3532-1200

E-mail: cep.secretaria@ufvjm.edu.br

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial do presente trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Teófilo Otoni, 02/02/2022.



Pedro Ramalho Figueirêdo

figueiredo.pedro@ufvjm.edu.br

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Campus do Mucuri - Rua do Cruzeiro, n. 01 - Jardim São Paulo - CEP 39803-371.