

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

JOÃO VITOR TOMOTANI

Aplicação do método de simulação e otimização ao problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção

São Paulo

2021

JOÃO VITOR TOMOTANI

Aplicação do método de simulação e otimização ao problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção

Versão Original

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de
Produção

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de
Mesquita

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Tomotani, João Vitor

Aplicação do método de simulação e otimização ao problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção / J. V. Tomotani -- São Paulo, 2021.

102 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Controle de estoques 2. Programação da produção 3. Pesquisa operacional I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II. t.

Nome: TOMOTANI, João Vitor

Título: Aplicação do método de simulação e otimização ao problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Profa. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento _____

Aos meus pais Lilian (*in memoriam*) e Rui

e à minha irmã Barbara

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, amigos e colegas, que me apoiaram durante todo o mestrado, dando suporte, conselhos e compreensão. São muitos para citar, mas saibam que seus apoios foram fundamentais.

Agradeço ao meu pai Rui, que me deu grande apoio e incentivo durante toda essa etapa – desde o início, com minha decisão de dar uma pausa em minha carreira profissional para iniciar um mestrado – e por sua compreensão e suporte nessa jornada.

Agradeço imensamente à minha irmã Barbara, inspiração acadêmica, grande conselheira, e ainda maior amiga. Agradeço ao meu cunhado Rodrigo Salvador, por sua amizade, parceria, sugestões, e revisões do texto.

Agradeço profundamente ao meu orientador Marco Mesquita, por sua eterna paciência, compreensão e parceria. Foi uma (muito) longa jornada, repleta de discussões, conselhos, revisões, momentos frustrantes e animadores, conversas relacionadas e não relacionadas ao trabalho, projetos concluídos e abandonados. De nossa primeira conversa, quando eu queria saber mais sobre o programa de mestrado, seguiram centenas de outras das quais pude aprender muito. Esse projeto jamais teria sido possível sem sua participação. Muito obrigado.

Agradeço ao time da Genoa: Afonso, Jonathan e Augusto, pelas valiosas sugestões para implementação computacional do modelo no software Anylogic.

Finalmente, agradeço à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado. A todos os professores, demais funcionários e colegas, por todas as ajudas necessárias, comunicações, discussões produtivas e descontraídas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é estudar o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção de múltiplos produtos em máquina única, com restrição de capacidade e demanda estocástica, denominado *Stochastic Economic Lot Scheduling Problem* (SELSP), aplicando a técnica de simulação e otimização, considerando duas estratégias de produção – sequência de produção fixa e sequência de produção variável. Para tal, foi desenvolvido um modelo de simulação e otimização no *software* Anylogic com o suplemento OptQuest, que maximiza a margem de contribuição total do sistema. Na etapa experimental, definiram-se múltiplas instâncias, variando-se as seguintes características do problema: número de itens, incremento de setup, coeficiente de variação da demanda, e taxa de ocupação do sistema, a fim de comparar as duas estratégias de produção: sequência fixa e variável, em diferentes cenários. A partir dos resultados dos experimentos, conclui-se que a melhor estratégia de produção depende das condições do sistema. Assim como observado em outros trabalhos da literatura, verificou-se que para cenários altamente restritivos do ponto de vista de capacidade de produção, a sequência fixa é melhor, enquanto a sequência variável é melhor em cenários de menor restrição. O presente trabalho diferencia-se de outros da literatura por partir de estratégias simples de controle de estoque, utilizando um modelo de simulação e otimização para calibração de seus parâmetros, podendo ser utilizado sem grande dificuldade em cenários industriais reais. O modelo elaborado mostrou-se efetivo na resolução do problema, gerando soluções adequadas rapidamente, mesmo utilizando a versão de aprendizado pessoal gratuita do *software*.

ABSTRACT

The objective of the present work is to study the problem of lot sizing and scheduling of multiple products in a single machine, with restricted capacity and stochastic demand, called Stochastic Economic Lot Scheduling Problem (SELSP), solving it by applying the Simulation Optimization technique, comparing two different production strategies – fixed production sequence and variable production sequence. To this end, a simulation model was developed in the Anylogic simulation software, and, through the OptQuest engine, the Simulation Optimization method was applied, seeking to maximize the total contribution margin. When designing the experiment, multiple instances were defined by varying characteristics of the problem: number of items, degree of setup increment, coefficient of demand variation, and system load, to compare the two production strategies in different scenarios. From the results of the experiments, it was possible to conclude that the best production strategy depends on the characteristics of the system. As observed in other works in the literature, it was found that in scenarios with highly restricted production capacity, the fixed production sequence is better, while the variable production sequence is better in scenarios that are less restricted. The present work differs from others in the literature by starting with simple stock control policies and using a Simulation Optimization model to define its control parameters, which can be used without great difficulty in real manufacturing scenarios. The model developed proved to be effective in solving the problem, quickly generating adequate solutions, even when using the free personal learning version of the software.

SUMÁRIO

1. Introdução	p. 13
1.1. Apresentação	p. 13
1.2. Formulação do problema	p. 14
1.3. Objetivos	p. 16
1.4. Estrutura do trabalho	p. 17
2. Revisão da Literatura	p. 18
2.1. Estoque	p. 18
2.2. Estratégia MTO e MTS	p. 19
2.3. Produção por lotes	p. 21
2.4. Do EOQ ao ELSP	p. 23
2.5. O Problema estocástico: SELSP	p. 27
3. Metodologia	p. 33
3.1. Pesquisa em Gestão de Operações	p. 33
3.2. Métodos de Simulação e Otimização	p. 34
3.3. Método da Pesquisa	p. 36
3.4. Anylogic e OptQuest	p. 39
4. Modelagem	p. 41
4.1. Modelos conceituais	p. 41
4.1.1. Sequência de produção fixa (s,S)	p. 42
4.1.2. Sequência de produção variável (R,Q)	p. 45
4.2. Implementação computacional	p. 46
4.3. Verificação e validação	p. 53
5. Delineamento dos experimentos	p. 57
5.1. Instâncias de teste	p. 57
5.2. Saídas da simulação	p. 63
6. Resultados e discussão	p. 66
6.1. Resultados dos experimentos	p. 66
6.2. Análise de variância	p. 69
6.3. Teste de normalidade	p. 72
6.4. Comparação entre as estratégias	p. 75
7. Conclusão	p. 80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	p. 82
ANEXO: RESULTADOS COMPLETOS	p. 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Dados de entrada para cada cenário.	p. 58
Tabela 02: Matriz de setup, exemplo para cinco itens.	p. 59
Tabela 03: Instâncias de simulação.	p. 60
Tabela 04: Experimento de calibração para definir os valores para os testes finais de otimização.	p. 63
Tabela 05: Resultados para sequência variável.	p. 64
Tabela 06: Resultados para sequência fixa.	p. 65
Tabela 07: Análise de variância de todos os fatores.	p. 70
Tabela 08: Resultado do teste T para todas as instâncias comparando as estratégias.	p. 76
Tabela 09: Agrupamento dos resultados do teste T conforme n.	p. 78
Tabela 10: Agrupamento dos resultados do teste T conforme ρ .	p. 78
Tabela 11: Agrupamento dos resultados do teste T conforme α .	p. 78
Tabela 12: Agrupamento dos resultados do teste T conforme cv.	p. 79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo esquemático do problema.	p. 16
Figura 2: Estratégias de manufatura e <i>lead times</i> de entrega Adaptado de Arnold et al. (2008).	p. 20
Figura 3: A solução do <i>common cycle</i> . Adaptado de Holmbom & Segerstedt (2014).	p. 25
Figura 4: A solução do <i>basic period</i> . Sequência de solução proposta: B-C-A-B-C. Adaptado de Holmbom & Segerstedt (2014).	p. 26
Figura 5: A solução do <i>extended basic period</i> . Sequência de solução proposta: B-C-B-A-B-C-B. Adaptado de Holmbom & Segerstedt (2014).	p. 26
Figura 6: Representação do método de simulação e otimização. Adaptado de Melouk et al. (2013).	p. 35
Figura 7: Passos de um estudo de simulação – adaptado de Banks et al. (2010).	p. 38
Figura 8: Fluxograma do modelo conceitual desenvolvido para a sequência fixa e lote variável.	p. 43
Figura 9: Fluxograma do modelo conceitual desenvolvido para a sequência variável.	p. 46
Figura 10: Detalhamento do bloco Source no Anylogic.	p. 47
Figura 11: Detalhamento do bloco delay1, que calcula o atendimento de ordens e atualiza níveis de estoque e margem total de contribuição no Anylogic.	p. 48
Figura 12: Detalhamento do módulo de produção e do bloco delay2, que avalia se o sistema deve produzir o próximo item da sequência ou entrar em ociosidade no modelo de produção de sequência fixa.	p. 49
Figura 13: Detalhamento do módulo de produção e do bloco selectOutput, que avalia se o sistema deve enviar uma nova ordem de produção para o sistema, no modelo de produção de sequência variável.	p. 49
Figura 14: Detalhamento do bloco Event no Anylogic.	p. 50
Figura 15: Detalhamento do bloco <i>Output</i> , denominado “Res” no Anylogic.	p. 51
Figura 16: Detalhamento do experimento de otimização do Optquest.	p. 51
Figura 17: Modelo em Anylogic desenvolvido para a estratégia de produção de sequência fixa e tamanho de lote variável.	p. 52
Figura 18: Modelo em Anylogic desenvolvido para a estratégia de produção de sequência variável e tamanho de lote fixo.	p. 52

Figura 19: Destaque para os parâmetros, variáveis e <i>output</i> , do modelo que segue a estratégia de produção de sequência fixa e tamanho de lote variável.	p. 53
Figura 20: Destaque para os parâmetros, variáveis e <i>output</i> , do modelo que segue a estratégia de produção de sequência variável e tamanho de lote fixo.	p. 53
Figura 21: Resultado da simulação para um cenário determinístico e com $n = 5$ itens, modelo de sequência fixa.	p. 54
Figura 22: Resultado da simulação para um cenário determinístico e com $n = 5$ itens, modelo de sequência variável.	p. 54
Figura 23: Resultado da simulação para um cenário determinístico, com $n = 5$ itens, modelo de sequência fixa e taxa de ocupação superior a 1.	p. 55
Figura 24: Experimento de otimização realizado no Anylogic, com a curva de evolução da função objetivo.	p. 56
Figura 25: Boxplot dos resultados da otimização, comparando estratégia de produção de sequência fixa (F) com variável (V).	p. 66
Figura 26: Boxplot dos resultados da otimização, comparando estratégia de produção de sequência variável (V) com sequência fixa (F), e abertura para valores de $n = 3, 5$ e 10 .	p. 67
Figura 27: Boxplot dos resultados da otimização da sequência de produção variável (V), e abertura para valores de $n = 3, 5$ e 10 e $\rho = 0,7; 0,8$ e $0,9$.	p. 68
Figura 28: Boxplot dos resultados da otimização da sequência de produção fixa (F), e abertura para valores de $n = 3, 5$ e 10 e $\rho = 0,7; 0,8$ e $0,9$.	p. 69
Figura 29: Boxplot dos resultados da otimização abertos pelo valor de <i>cv</i> .	p. 71
Figura 30: Regressão linear entre o resultado da simulação e o valor de n para o cenário de sequência variável.	p. 72
Figura 31: Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o cenário variável.	p. 73
Figura 32: Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o cenário variável, excluindo-se os outliers.	p. 73
Figura 33: Regressão linear entre o resultado da simulação e o valor de n para o cenário de sequência fixa.	p. 74
Figura 34: Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o cenário de sequência fixa.	p. 75

LISTA DE SIGLAS

ANOVA: Análise de Variância

ATO: Assemble-to-Order

CLSP: Capacitated Lot Sizing Problem

cv: Coeficiente de variação

DLSP: Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem

ELSP: Economic Lot Scheduling Problem

EOQ: Economic Order Quantity

EPQ: Economic Production Quantity

ETO: Engineer-to-Order

LSP: Lot Sizing and Scheduling Problem

MPCP: Multi-product Production Cycling Problem

MPKSCP: Multi-Product Kanban System Configuration Problem

MTO: Make-to-Order

MTS: Make-to-Stock

RL: Reinforced Learning

ROP: Reorder Point

SELSP: Stochastic Economic Lot Scheduling Problem

SO: Simulação e Otimização

SS: Scatter Search

1. Introdução

1.1. Apresentação

O aprimoramento das técnicas de planejamento e controle de estoques não é mais um diferencial e sim um imperativo para as empresas que desejam manter-se em um ambiente cada vez mais competitivo.

Estoques estão presentes nas atividades de produção, transporte e armazenagem, em todos os setores da economia (primário, indústria, comércio e serviços). Hopp e Spearman (2013) apontam que nenhuma área da gestão de operações motivou tanto o desenvolvimento de modelos matemáticos e foi tão importante para a gestão da produção quanto o controle de estoques. A gestão de estoques implica, basicamente, na tomada de decisões de quando e quanto abastecer o estoque de cada item, visando atender da melhor forma possível o *trade-off* entre os custos de estoque e o nível de atendimento aos clientes.

A crescente demanda por uma produção ágil e com foco no cliente aumentou o interesse pela produção puxada baseada em lotes e fez com que esta ganhasse grande importância na indústria (Barker & Rawtani, 2005).

A relevância do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes, e a consequente atenção que este tem recebido do meio acadêmico, não surpreende dada a importância que os estoques possuem no contexto da produção industrial (Glock *et al.*, 2014). A gestão de estoques é uma das atividades operacionais mais importantes na indústria, dado que o nível dos estoques influencia diretamente não apenas os custos da companhia – o custo de manutenção dos estoques pode representar de 20% a 40% do seu valor por ano (Ballou, 2006) – mas também o nível de atendimento ao cliente em termos de disponibilidade de produtos e velocidade de entrega, elementos indispensáveis para a competitividade em economias desenvolvidas (Vastag & Montabon, 2001; Glock *et al.*, 2014).

Em uma pesquisa conduzida com profissionais da indústria brasileira, verificou-se que o dimensionamento e sequenciamento de lotes é um problema de alta relevância na indústria, cujo objetivo é a maximização do nível de serviço e a minimização dos níveis de estoque (Tomotani & Mesquita, 2018). Verificou-se no mesmo estudo, no entanto, que raramente as empresas contam com ferramentas adequadas para lidar com esse problema, mesmo em empresas de maior porte.

Dentro da gestão de estoques e, em particular, do problema de dimensionamento de lotes de produção, uma das questões mais relevantes para a indústria é a existência dos tempos e custos de setup (ou preparação).

O setup é definido por Cox e Blackstone (2002) como o trabalho necessário para fazer a troca de produto (lote) em uma máquina, centro de trabalho ou linha de produção. O tempo de setup consiste no intervalo de tempo entre a produção da última peça do lote em curso e a primeira peça aprovada do lote seguinte. O setup possui associado a ele um custo (por exemplo, tempo de inatividade, de ajuste das máquinas e de descarte de material).

Para abordar o problema do custo de setup no controle de estoques, destacam-se duas abordagens: a melhoria do processo produtivo, visando reduzi-lo; e o aprimoramento das técnicas de programação da produção. O presente trabalho irá se concentrar nessa segunda.

1.2. Formulação do problema

Os problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes (LSP – *Lot Sizing and Scheduling Problems*) têm recebido constante atenção de pesquisadores da área de Planejamento e Controle da Produção. Esta linha de pesquisa tem origem na formulação original do problema do lote econômico (ou *Economic Order Quantity*, EOQ) proposta por Ford Harris, nos primórdios da engenharia industrial (Erlenkotter, 1990).

Uma formulação básica do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes é a programação da produção *make-to-stock* de múltiplos itens em máquina única, com restrição de capacidade e tempos de setup significativos, em um processo de produção por lotes. A tal problema de múltiplos produtos e máquina única, contínuo no tempo, onde os tempos de setup, tempos de produção e demandas são conhecidos, constantes e determinísticos, dá-se o nome de *Economic Lot Scheduling Problem* (ELSP). O objetivo na solução do ELSP é obter um padrão cíclico de produção que será repetido dentro de um horizonte de planejamento (conforme especificado por Gascon *et al.*, 1994), capaz de atender à demanda e às restrições de capacidade, minimizando custo total de setup e armazenagem. Por padrão cíclico, entenda-se uma sequência e quantidades fixas

de produção, com ou sem repetição de lotes por ciclo – por exemplo, com três produtos uma sequência sem repetição seria A – B – C, e uma sequência com repetição seria A – B – A – C.

Foi provado que a solução para o ELSP, isto é, encontrar um plano de produção cíclico, com sequências e tamanhos de lotes definidos, é NP-difícil (Hsu, 1983), tendo atraído considerável atenção do meio acadêmico na busca por propostas de métodos exatos e aproximados para sua solução. O ELSP possui algumas variantes, como o *Capacitated Lot Sizing Problem* (CLSP) – enquanto o ELSP considera um horizonte infinito de planejamento, com demanda constante, o CLSP considera horizonte finito de planejamento dividido em janelas de tempo (ou *time buckets*) e demandas determinísticas e variáveis. Drexel e Kimms (1997) fizeram uma revisão da literatura de problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, onde classificam artigos nos diferentes problemas como ELSP, CLSP, dentre outros.

O ELSP possui uma variante estocástica denominada *Stochastic Economic Lot Scheduling Problem* (SELSP), na qual a demanda é probabilística e estacionária, com tempos de produção e/ou tempos de setup podendo ser aleatórios também. Para a resolução do SELSP, encontrar uma política de produção rígida cíclica é insuficiente, sendo necessário definir uma política capaz de reagir aos eventos estocásticos do problema, que decida se é necessário continuar a produção do produto atual, mudar para outro produto ou deixar a máquina ociosa. Se a demanda é estocástica, a proposta de quando e quanto produzir deve ser dinâmica, respondendo à demanda real e considerando a necessidade de estoques de segurança (Glock *et al.*, 2014).

O presente trabalho irá abordar o SELSP, isto é, a versão estocástica do problema de produção *make-to-stock* (MTS) de múltiplos itens (n itens) em máquina única, com tempos e custos de setup significativos e dependentes da sequência de produção dos lotes. A demanda é estacionária – isto é, parâmetros das distribuições são constantes no tempo – e o objetivo é de maximizar a margem total esperada, ou seja, o faturamento total, subtraindo a soma dos custos totais: armazenagem, falta e setup. Considera-se que o suprimento de matéria-prima não é uma restrição para a produção e que o processo opera sem interrupção, 24 horas por dia, 7 dias por semana. A Figura 1 apresenta um modelo esquemático do problema.

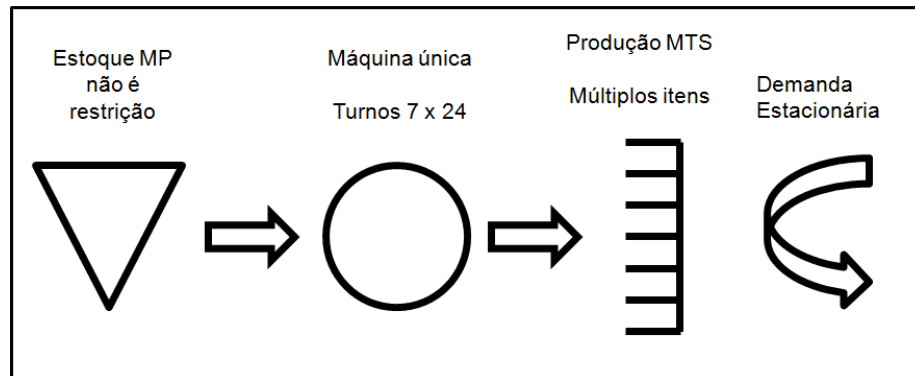


Figura 1: Modelo esquemático do problema.

1.3. Objetivos

O problema do SELSP já foi abordado por diversos autores, geralmente buscando políticas de controle de estoque simplificadas, por conta da dificuldade de encontrar soluções otimizantes (Lohndorf & Minner, 2013). Gallego (1990), por exemplo, propôs um modelo de planejamento em três níveis, que a priori define um plano de produção, e a posteriori aplica uma “política de recuperação” para retornar os estoques ao patamar desejado com mínimo custo. Brander *et al.* (2005), por sua vez, adotaram uma solução do problema determinístico para definir o tamanho dos lotes como ponto de partida para a solução do problema probabilístico, utilizando uma lógica de cálculo de tempo de cobertura para definir dinamicamente a sequência de produção.

Uma alternativa para a resolução de problemas estocásticos de dimensionamento de lotes é proposta por Byrne (1990), que utilizou técnicas de Simulação e Busca para testar diferentes configurações de tamanhos de lote. Esse autor aponta que uma das grandes vantagens do uso de simulação é que a complexidade do sistema a ser estudado não impõe grandes dificuldades para a modelagem do problema, pois a flexibilidade da simulação permite incorporar tais complexidades.

As soluções apresentadas para o SELSP em geral podem ser classificadas conforme sua abordagem quanto ao tamanho do lote de produção e quanto à sequência de produção. O tamanho do lote pode ser fixo (todos os lotes produzidos para um determinado item sempre possuem o mesmo tamanho) ou variável (tamanho do lote de produção varia conforme o estado do sistema), e a sequência

de produção pode ser fixa (os itens sempre são produzidos conforme uma sequência previamente estabelecida) ou variável (o próximo item a entrar em produção depende do estado do sistema).

O presente trabalho apresenta duas contribuições: 1) do ponto de vista teórico, visa entender e resolver o SELSP utilizando o método de simulação e otimização, considerando duas estratégias de produção distintas – sequência de produção fixa e sequência de produção variável – para sistemas com diferentes características – diferentes quantidades de produtos, taxa de ocupação do sistema, grau de variação da demanda e incremento de setup – analisando e comparando os resultados de cada estratégia e para cada configuração do problema; 2) do ponto de vista prático, propõe dois modelos de simulação, um para cada estratégia de produção, que permitem a variação das características do sistema, e que implementam o método de simulação e otimização, visando maximizar a margem total de contribuição do sistema, podendo ser adaptados para aplicação em casos reais da indústria.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: o primeiro capítulo define o problema de pesquisa, objetivos e a relevância e delimitação da pesquisa. O segundo capítulo faz uma revisão da literatura, passando por modelos de controle de estoque, processos de produção em lotes e finalmente o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes - SELSP. O terceiro capítulo explica o método de pesquisa adotado. O quarto capítulo trata da etapa de modelagem na pesquisa. O quinto capítulo discute o delineamento do experimento. O sexto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos. Finalmente, o sétimo capítulo conclui o trabalho.

2. Revisão da Literatura

2.1. Estoque

Existem diversas definições para estoque, a maioria em essência muito similares. Ballou (2005), por exemplo, define estoques como “acumulações de matérias-primas, suprimentos, componentes, materiais em processo e produtos acabados que surgem em numerosos pontos do canal de produção e logística das empresas”. Krajewski *et al.* (2009) classificam os estoques segundo suas funções, podendo estes ser:

- Estoque cíclico (ou de ciclo): estoque associado à produção em de lotes. Varia por conta do tamanho dos lotes, de modo que quanto maior o tamanho do lote, maior deve ser esse estoque. Tem como função gerar economia de escala e atender exigências técnicas do processo produtivo;
- Estoque de segurança: estoque excedente e proposital que protege contra incertezas da demanda e da oferta, tanto em questão de prazo quanto quantidade. Visa evitar problemas de atendimento da demanda e reduzir custos de controle;
- Estoque de antecipação ou sazonal: estoque usado para atender variações irregulares esperadas da demanda ou oferta;
- Estoque em trânsito: estoque em movimento de um ponto ao outro no sistema de fluxo de materiais. Pode ser dividido em estoque em movimentação (dentro do *lead time*, inevitável) e estoque em processo.

Ballou (2005) aponta ainda um quinto tipo de estoque, o especulativo, que busca se aproveitar de situações de mercado específicas.

Os custos associados à gestão de estoques são definidos por Krajewski *et al.* (2009) como:

- Custo dos itens comprados (ou *item cost*): valor dos materiais comprados / produzidos.
- Custo de armazenamento (ou de posse, ou ainda *holding cost*): soma do custo de capital imobilizado em estoque com os custos variáveis de se manter itens disponíveis, como custos e encargos de armazenamento e manuseio, seguro e perdas;

- Custo de pedido (ou *order cost*): custo de preparar um pedido de compra a um fornecedor ou um pedido de produção para a fábrica. Inclui custos de emissão e execução da ordem de compra, recebimento etc.;
- Custo de falta (ou *stockout cost*): uma falta de estoque ocorre quando um item de estoque não está disponível para satisfazer uma demanda no momento que ela ocorre, resultando na perda de vendas (ou parada de máquina, no caso de estoque de matéria prima). O custo de falta é a soma dos custos gerados por tal falta, incluindo lucro cessante ou adiado, custos de produção emergencial, etc.

2.2. Estratégia MTO e MTS

Para uma companhia que opere visando atender e superar a expectativa de seus clientes, é necessário desenvolver uma estratégia operacional que permita à cadeia de suprimentos atender as necessidades do mercado através de entregas rápidas e eficientes. Para o cliente, quanto menor o *lead time* de entrega melhor, e a empresa deve estruturar uma estratégia capaz de atingir essa expectativa. Existem quatro estratégias básicas: *engineer-to-order* (ETO), *make-to-order* (MTO), *assemble-to-order* (ATO), e *make-to-stock* (MTS) (Arnold *et al.*, 2008). A Figura 2, adaptada de Arnold *et al.* (2008), apresenta os efeitos de cada estratégia.

- **Engineer-to-order (ETO)**: se aplica em casos em que a necessidade do cliente possui especificações únicas, que necessitam de customizações significativas. A matéria-prima normalmente não é adquirida até que seja necessária pela manufatura e o *lead time* de entrega é muito longo e considera inclusive o tempo de design;
- **Make-to-order (MTO)**: nessa estratégia, o fabricante não inicia a produção até que a ordem do cliente tenha sido recebida. O produto usualmente é padronizado, mas pode conter alguns componentes personalizados. *Lead times* de entrega são menores que dos casos ETO por não ter o tempo de design do produto, e por normalmente contar com matéria-prima em estoque;
- **Assemble-to-order (ATO)**: nessa estratégia, os produtos finais são compostos de componentes padronizados, que a fábrica pode ter em

estoque e somente fazer o processo de montagem conforme as ordens dos clientes. O *lead time* de entrega é menor que do processo MTO por haver estoque em mãos pronto de componentes semiacabados prontos para montagem. A possibilidade de padronização dos produtos é menor que no caso MTO, pois o cliente necessita selecionar dentre as configurações disponíveis para montagem;

- **Make-to-Stock (MTS):** nessa estratégia, o fabricante produz os produtos finais e os disponibiliza para estoque, de modo que o *lead time* de entrega é o mais curto dentre as estratégias, consistindo somente no envio para o cliente.

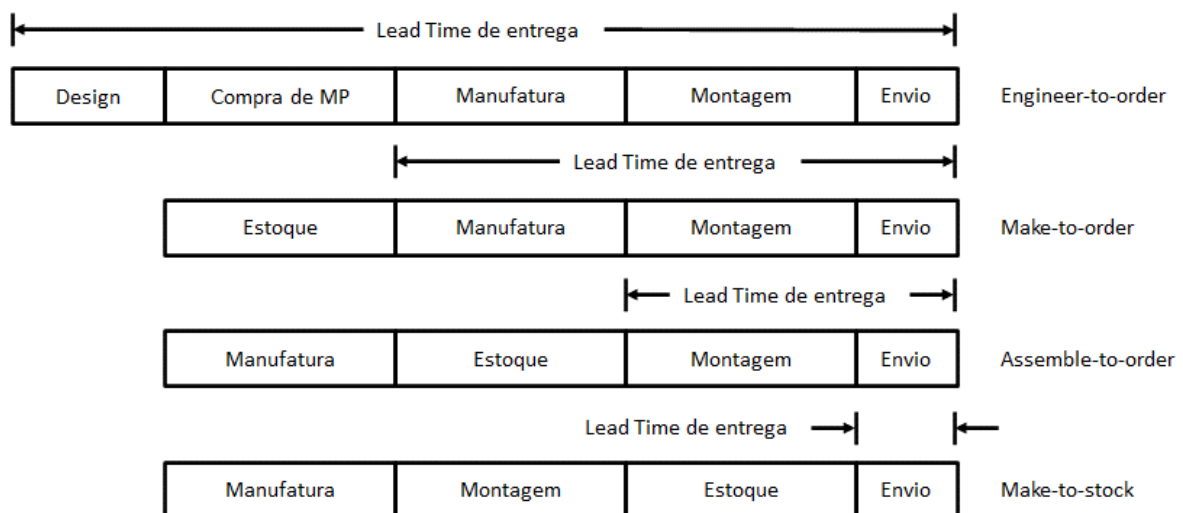


Figura 2: Estratégias de manufatura e *lead times* de entrega Adaptado de Arnold *et al.* (2008).

Geralmente, as empresas buscam uma estratégia MTS quando (Arnold *et al.*, 2008):

- A demanda é constante e previsível;
- Não há uma variedade muito grande de produtos;
- O mercado consumidor exige que o *lead time* de entrega seja mais curto que o tempo de manufatura do item;
- O produto possui longo prazo de validade.

Já em um ambiente MTO, normalmente as empresas buscam essa estratégia quando (Arnold *et al.*, 2008):

- Os produtos precisam seguir uma padronização específica;

- Os clientes estão dispostos a esperar o tempo de fabricação desse produto;
- O produto é caro tanto para ser fabricado quanto para ser armazenado;
- Há uma variedade grande de produtos que a empresa pode oferecer.

Trabalhos que comparam as estratégias MTO contra MTS em diversos cenários datam desde a década de 1960 (Rajagopalan, 2002). Alguns exemplos de trabalhos que desenvolvem modelos matemáticos para comparar o desempenho das estratégias em diversos cenários (incerteza da demanda, quantidade de materiais, custos e tempos de produção e armazenagem) são Rajagopalan (2002) e Olhager e Prajogo (2012). O problema SELSP, estudado no presente trabalho, parte da estratégia MTS, buscando dimensionar um estoque de segurança que garanta o atendimento imediato das ordens dos clientes, enquanto minimiza os custos totais associados à gestão do estoque.

2.3. Produção por lotes

Cox e Blackstone (2002) definem a produção por lotes como uma técnica de manufatura, na qual peças são acumuladas para, depois, serem processadas em conjunto em um lote ou fornada (*batch*). Ainda segundo esses autores, o lote a ser processado pode ser definido como o número de unidades a serem feitas entre setups sequenciais em um centro de trabalho.

Em um processo de produção por lotes, a saída do processo se dá em quantidades não unitárias de materiais ou lotes. O processo de produção tem um começo e um final e o processo não é nem contínuo nem discreto, mas possui características de ambos (Barker & Rawtani, 2005).

Segundo esses autores, um processo pode ser considerado por lotes se, por conta de restrições físicas do equipamento ou por outros motivos, consiste em uma sequência de um ou mais passos que devem ser realizados em uma determinada ordem e que, após completos, uma quantidade finita de produto acabado é produzida. Caso a sequência seja repetida, um novo lote de produtos é produzido. Alguns exemplos de produção por lotes são encontrados na fabricação e envase de bebidas, manufatura de produtos biotecnológicos, processamento de laticínios e

alimentos, manufatura de higiene e limpeza, injeção de termoplásticos, termoformagem de embalagens, estampagem de peças automotivas, dentre outros.

Os processos de produção por lotes (*batching*) possuem as seguintes características (Barker & Rawtani, 2005):

- Lidam com uma quantidade discreta de materiais ou produtos;
- Permitem o rastreamento dos lotes;
- Permitem o processamento de mais de um tipo de produto simultaneamente, contanto que os produtos estejam separados por equipamento;
- Estão vinculados à movimentação de produtos discretos de uma área de processamento para outra;
- Possuem instruções de processamento associadas a cada carga de matéria-prima que será processada;
- Tendem a ter uma lógica de processamento mais complexa do que se encontra em processos contínuos;
- Sempre incluem passos dentro de sua sequência nos quais podem ocorrer falhas, de modo que também incluem passos especiais a serem tomados no caso de falha.

Barker e Rawtani (2005) ainda caracterizam a natureza dos passos envolvidos em um processo de produção por lotes:

- Cada passo pode ser de natureza simples ou complexa, consistindo de uma ou mais operações;
- De modo geral, quando um passo é iniciado, ele só é considerado bem-sucedido quando é concluído;
- Não é incomum que seja requerida a aprovação do operador para que um passo seja concluído para se iniciar o próximo;
- Há a possibilidade constante de saídas não-usuais serem utilizados por conta de intervenção do operador, falha do equipamento, ou detecção de condições perigosas;
- A depender das instruções do produto sendo processado, alguns passos podem ser ignorados;
- As operações de processamento de cada passo geralmente seguem instruções de controle, mas podem ser sobrepostas pelo operador.

Uma vez que a economia de escala é uma chave para o sucesso dos negócios, empresas químicas e indústrias de processo focam grande parte de sua atenção no desenvolvimento de processos de produção contínuos nos últimos anos (Barker & Rawtani, 2005). No entanto, esses autores destacam alguns fatores técnicos que tornam o processo de produção por lotes mais favorável do que o de produção contínua:

- Os processos de lotes utilizam unidades de processamento mais simples que os processos de produção contínua;
- Uma unidade de processamento de lotes pode possuir múltiplas funcionalidades, pode ser usada para várias fases do processamento do lote e pode dar suporte à produção de múltiplos produtos dentro da fábrica;
- Fábricas que operam no processo de produção por lotes são comparativamente mais robustas do que fábricas que operam em produção contínua;
- As instalações que operam com lotes são mais fáceis de ampliar conforme demandas e requerimentos do mercado.

2.4. Do EOQ ao ELSP

A Fórmula de Harris foi uma das primeiras aplicações da matemática na engenharia industrial ao introduzir o conceito do lote econômico (ou *Economic Order Quantity*, EOQ) em 1913, a partir do qual seria possível calcular uma quantidade ótima a ser produzida, que minimizaria os custos totais de estoque através do entendimento do *trade-off* entre custos de armazenagem e custos de preparação (setup). O trabalho pioneiro de Harris iniciou uma série de estudos na área de gestão de estoques, ajudando a defini-la como uma ciência (Erlenkotter, 1990). A fórmula é apresentada na Equação 1.

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DK}{h}} \quad (1)$$

Onde Q^* é a quantidade ótima (ou econômica) a ser produzida, D é a demanda anual do item, K é o custo fixo de pedido desse item, e h é o custo unitário

anual de armazenagem. Uma revisão do EOQ e sua relevância na indústria foi feita por Andriolo *et al.* (2014).

O modelo original do lote econômico, no entanto, possui uma série de premissas em sua composição, de modo que posteriormente diversos autores buscaram formas de generalizá-la. Hopp e Spearman (2013), por exemplo, mostraram a evolução do conceito do lote econômico (EOQ) até o modelo de ponto de pedido (ou *Reorder Point*, ROP) além de outras extensões. Uma das extensões do EOQ é o *Economic Production Quantity* (EPQ) que, assim como o EOQ, visa minimizar os custos totais de produção, setup e armazenagem, mas, diferentemente do EOQ, não considera a reposição instantânea dos materiais, havendo uma taxa de produção com um crescimento gradual do estoque conforme os itens vão sendo produzidos. Um dos maiores impeditivos dos modelos EOQ e EPQ é tratar os itens de forma independente e com demanda constante. É comum na indústria que, por motivos econômicos, uma unidade produtiva (máquina, linha ou mesmo planta) capaz de produzir diversos itens diferentes seja adquirida, ao invés de diversas unidades para a produção individual de cada item, não sendo possível aplicar a fórmula do lote econômico sem gerar conflitos no sequenciamento dos lotes.

A restrição do EOQ em considerar apenas um produto foi apontada por Rogers (1958), que formalizou o *Economic Lot Scheduling Problem* (ELSP). A formulação original do ELSP considera uma unidade produtiva capaz de produzir apenas um item por vez, com taxas de produção, custos de setup e tempos de setup definidos e independentes da sequência de produção, com a demanda de cada item conhecida e constante em um horizonte de planejamento infinito e sem considerar a possibilidade de *backorder*, ou seja, toda a demanda deve ser atendida, sendo que o equipamento possui capacidade de atender a demanda.

Hanssmann (1962) apresentou o conceito do *common cycle schedule*, uma solução para o ELSP que considera um sequenciamento cíclico, onde os itens são produzidos exatamente uma vez por ciclo; Vaughan (2007) apresenta esse mesmo conceito sob o nome de *pure cycle*. A solução de *common cycle* de Hanssmann sempre possui uma programação factível, contanto que a unidade produtiva tenha capacidade suficiente para atender a demanda realizando todos os setups necessários. Por conta disso, o *common cycle schedule* passou a ser considerado como um limitante superior (*upper bound*) dentre as soluções possíveis e utilizado

como base de comparação para verificar a eficiência de planos propostos por outras estratégias e modelos de solução. A Figura 3, adaptada de Holmbom e Segerstedt (2014), representa a solução do *common cycle* para um problema de três itens (A, B e C).

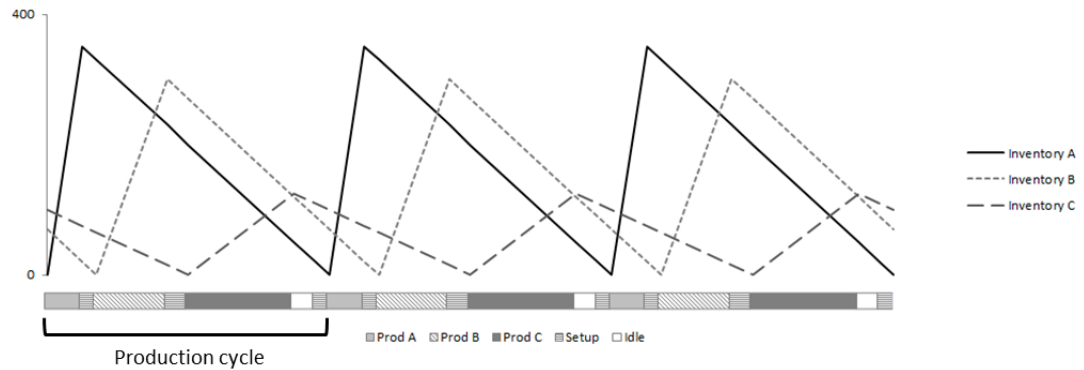


Figura 3: A solução do *common cycle*. Adaptado de Holmbom & Segerstedt (2014).

Bomberger (1966) introduziu o conceito de um período básico (*basic period*), dentro do qual haveria um sequenciamento ótimo dos lotes e que poderia ser repetido ao longo do ciclo de produção. Na solução do *basic period*, os itens podem possuir diferentes “tempos de ciclo”, ou ciclos de produção, contanto que tais ciclos sejam múltiplos inteiros do *basic period*. A Figura 4, adaptada de Holmbom e Segerstedt (2014), ilustra uma solução do *basic period* para o problema de três itens. Bomberger (1966) apresentou ainda um modelo de programação dinâmica para a resolução do ELSP e o testou em um cenário composto de 10 produtos. O exemplo de Bomberger serve, até hoje, como um dos principais cenários contra os quais diferentes heurísticas e algoritmos são testados (Nilsson & Segerstedt, 2008).

Bomberger (1966) considera em sua solução que cada ciclo de produção “T” é um inteiro múltiplo de “*basic periods*”, e impõe uma restrição de que a soma dos tempos de setup e de operação de todos os itens deve ser menor ou igual ao tempo do *basic period* (Axsater, 1987; Holmbom *et al.*, 2013). Essa restrição é relaxada na abordagem do *extended basic period*, que define que o *basic period* deve ser apenas maior do que a média dos tempos de setup e de processamento de todos os itens (Elmaghraby, 1978; Holmbom *et al.*, 2013). A Figura 5, adaptada de Holmbom e Segerstedt (2014), ilustra a solução do *extended basic period* para o problema de três itens.

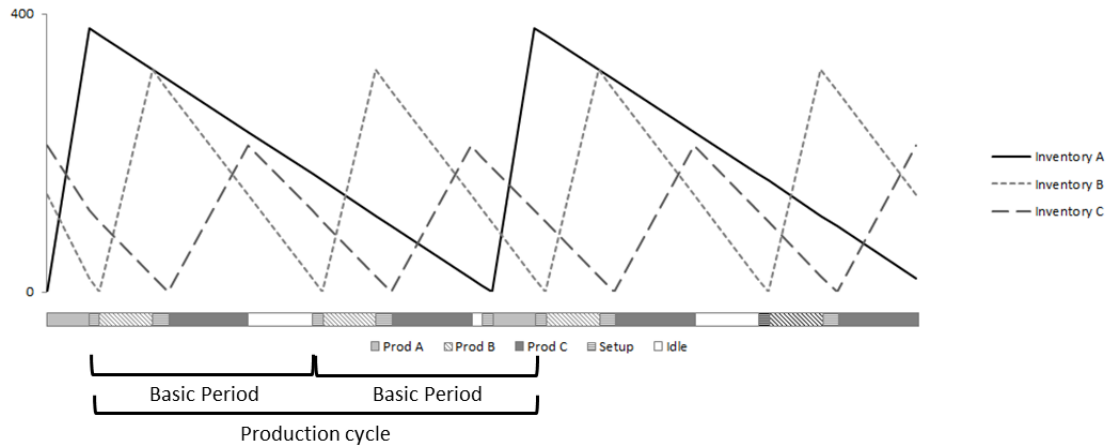


Figura 4: A solução do *basic period*. Sequência de solução proposta: B-C-A-B-C. Adaptado de Holmbom & Segerstedt (2014).

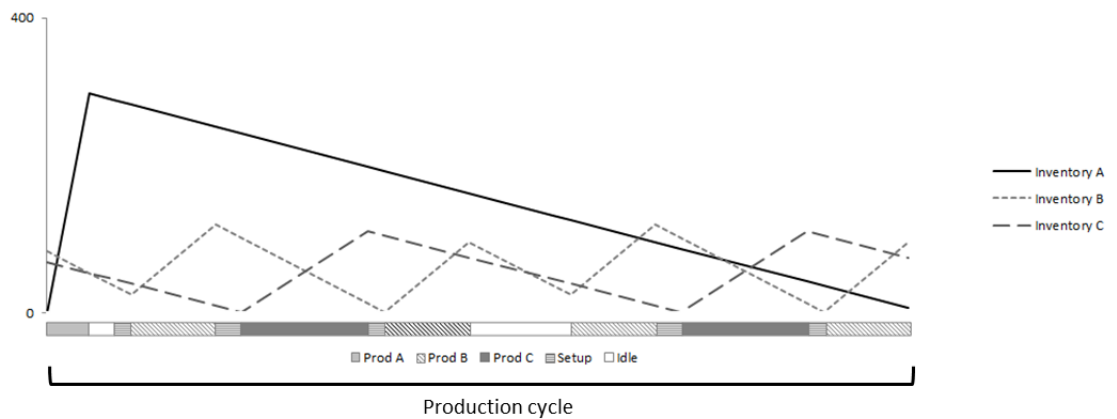


Figura 5: A solução do *extended basic period*. Sequência de solução proposta: B-C-B-A-B-C-B. Adaptado de Holmbom & Segerstedt (2014).

A solução de menor custo conhecida hoje para o problema de Bomberger foi encontrada por Doll e Whybark (1973) por meio de uma técnica iterativa. Essa técnica posteriormente viria a servir de base para uma nova heurística proposta por Segerstedt (1999), que chega ao mesmo resultado em menos iterações.

Uma revisão extensa do problema de dimensionamento de lotes e suas variantes, com foco nos trabalhos dentro da área de Pesquisa Operacional, é feita por Drexl e Kimms (1997). Holmbom e Segerstedt (2014) fazem uma revisão da literatura, traçando um panorama acerca da evolução do conceito do lote econômico ao ELSP, discutindo os trabalhos desenvolvidos que abordam o problema, ilustrando

ainda os conceitos de *common cycle*, *basic period* e *extended basic period*. Os autores defendem os trabalhos que buscam lógicas de dimensionamento de lotes, apontando que, ainda que trabalhos com lotes de tamanho variável no tempo tenham sido estudados e sugeridos, com resultados adequados na teoria, existem diversas desvantagens práticas a serem consideradas em tais soluções, como no suprimento de matéria-prima e espaço na fábrica.

Outros trabalhos que abordam o ELSP são: Taj *et al.* (2012), que aplicam de forma prática um modelo desenvolvido em planilha para um cenário real do ELSP; Holmbom *et al.* (2013), que discutem a aplicação de modelos para o ELSP em fábricas de alta taxa de utilização; e Hanson *et al.* (2015), que discutem o estoque inicial necessário para que uma solução para o problema do ELSP sem *stockout* seja factível.

Por fim, uma análise de conteúdo de artigos do ELSP foi feita por Beck e Glock (2019), visando identificar os temas de pesquisa mais abordados e oportunidades de pesquisa. Esses autores identificaram que as pesquisas no tema focaram majoritariamente no desenvolvimento de soluções para o problema, com menos foco tendo sido dado a outros aspectos do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes, como os custos energéticos e a sustentabilidade.

2.5. O Problema estocástico: SELSP

O problema do ELSP proposto por Rogers (1958) possui uma variante estocástica, que considera a demanda como aleatória ao longo do tempo. A esse problema, dá-se o nome de *Stochastic Economic Lot Scheduling Problem* (SELSP). Vergin e Lee (1978) apontaram a importância e complexidade do problema e foram os primeiros a questionar a ausência de trabalhos sobre ele na academia.

Um dos primeiros estudos onde múltiplos itens com demanda estocástica foram produzidos em uma única unidade produtiva foi feito por Goyal (1973). O autor propôs um modelo para esse problema visando minimizar a soma dos custos de armazenagem, setup e falta. No entanto, uma grande limitação no estudo de Goyal, conforme apontado por Vergin e Lee (1978), foi o fato do *lead time* de produção ser considerado como zero, de modo que o problema possuía capacidade ilimitada e não pode, portanto, ser classificado como SELSP.

Graves (1980) foi o primeiro a abordar o SELSP, chamando-o de *multi-product production cycling problem* (MPCP), analisando o problema de um único item como um problema de decisão de Markov, e utilizando uma regra heurística para a versão de múltiplos produtos. Para antecipar os conflitos onde mais de um item deveria ser produzido ao mesmo tempo, Graves (1980) introduziu o conceito de “produto composto” (*composite product*) para endereçar a necessidade agregada de múltiplos produtos. A solução de Graves usa uma política de revisão periódica onde somente um item pode ser produzido a cada janela de tempo (conceito de *time bucket*), criando uma restrição adicional de que somente um único produto poderia ser produzido durante toda a duração do *time bucket* (conceito similar ao *Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem*, ou DLSP, uma variante do CLSP, conforme explicado por Drexel e Kimms, 1987). Além da heurística de produto composto, Graves testou outras três heurísticas baseadas nas políticas (Q,R) e (s,S) de controle de estoque, usando simulações para estimar os parâmetros para essas políticas que minimizassem os custos totais. Por meio das simulações, Graves concluiu que sua heurística de produto composto apresentou bons resultados quando comparado aos outros métodos.

Após Graves, o próximo autor a endereçar o SELSP foi Zipkin, somente em 1986. Zipkin (1986) também não utilizou especificamente o termo SELSP, e formulou o problema como um problema de otimização, combinando-o com submodelos de filas.

Leachman e Gascon (1988) foram os primeiros autores que chamaram o problema com a demanda estocástica de ELSP estocástico (ainda que não tenham usado a sigla SELSP). Esses autores propuseram um modelo similar ao de Graves (1980), trabalhando com períodos de tempo (*time buckets*), mas permitindo uma quantidade limitada de horas extras por período. Assim como no trabalho de Graves (1980), havia a restrição de que somente um item poderia ser produzido em cada *time bucket*. O objetivo do modelo era o de definir uma programação de produção que minimizasse o inventário esperado e os custos de setup, enquanto evitava *backorders*. Os autores utilizaram uma heurística baseada no conceito de *runout times* (tempo médio até que um item chegue abaixo de seu nível de estoque de segurança) e *slack times* ou *down times* (intervalo de tempo em que a produção pode permanecer ociosa sem gerar faltas de estoque). Ao identificar um *slack time*

negativo projetado para o futuro, a heurística propõe a redução de todos os ciclos anteriores para eliminar esse *slack time* negativo. Para essa heurística, os autores calcularam tamanhos de lote considerando a versão determinística do problema.

O trabalho de Leachman e Gascon (1988) foi posteriormente revisitado por Leachman *et al.* (1991), que propuseram uma melhoria na heurística de *runout time*. Neste trabalho, os autores revisaram o cálculo para o tempo de ciclo e para os tempos ociosos. Por meio de testes de simulação, a nova heurística apresentada teve uma melhoria nos custos totais em 3,0% comparada com a original, mantendo níveis semelhantes de estoque. A heurística de *runout time* foi a base para diversos outros trabalhos posteriores, como Brander *et al.* (2005) e Levén e Segerstedt (2007).

Bourland e Yano (1994) desenvolveram um modelo baseado em otimização, considerando o planejamento de tempos ociosos, estoque de segurança, e horas extras como forma de lidar com a incerteza na demanda, avaliando o *trade-off* entre cada recurso. Além dos custos, os autores ainda consideraram a estabilidade do plano de produção como um resultado desejado da programação da produção.

Gascon *et al.* (1994) apresentaram uma simulação, comparando o desempenho de seis diferentes heurísticas, em três cenários de demanda diferentes (estacionária, não estacionária, e com erros de previsão).

Anupindi e Tayur (1998) também abordaram o problema por uma ótica de simulação, utilizando uma política de estoque-base (s,S), e uma sequência de produção fixa – tanto com repetição quanto sem repetição – para três itens. Através de uma técnica de otimização por meio de simulação, os autores buscaram bons parâmetros de controle para a lógica de estoque-base.

De modo semelhante, Federgruen e Katalan (1998) abordaram o problema utilizando uma política de estoque-base, buscando desenvolver uma heurística capaz de minimizar os custos totais, através da definição de um *basic period*. Esses autores identificaram que a heurística desenvolvida apresentava resultados superiores ao cenário de *common cycle*, principalmente em cenários de alta ocupação do sistema.

Krieg e Kuhn (2002) trataram o problema como um sistema de produção controlado por *kanban*, onde uma demanda não atendida seria perdida (*lost sales*),

chamando esse problema de *Multi-Product Kanban System Configuration Problem* (MPKSCP). O problema foi tratado pelo método de avaliação aproximada (*approximate evaluation method*), com o sistema de n produtos sendo decomposto em n sistemas de único produto, com os subsistemas sendo resolvidos numericamente. O trabalho foi posteriormente estendido em Krieg e Kuhn (2004), onde o estado do sistema passou a ser relevante na definição dos setups, com setups passando a ser realizados somente se o próximo produto a ser produzido possuísse cartões *kanban* no quadro de produção.

Eisenstein (2005) utilizou outro modo para abordar o SELSP. Esse autor assumiu um sistema que já possui uma programação de produção cíclica definida, com níveis de inventário desejados conhecidos, e um tempo ocioso previamente estabelecido para se proteger de incertezas. Eisenstein então definiu uma política que fizesse com que o sistema voltasse para o seu cenário de estabilidade frente a algum fator externo, como a quebra de uma máquina ou um pico de demanda, minimizando os custos e utilizando esse tempo ocioso. Esse autor conclui que essa política é efetiva também para tratar alterações frequentes no cenário estável, como o fator estocástico da demanda do SELSP.

Paternina-Arboleda e Das (2005) utilizaram uma técnica de *Simulation Optimization* conhecida como *Reinforced Learning* (RL) para a resolução do SELSP. O RL é uma técnica que consiste em ensinar políticas de controle quase-ótimas aos agentes (tomadores de decisão). Os agentes recebem feedbacks temporais com base em suas decisões, e devem escolher ações que melhorem o desempenho do sistema. A técnica RL faz com que se decida qual item produzir e se o sistema deve ou não se manter ocioso, seguindo uma política de estoque base (R). Para encontrar o valor de R , os autores utilizaram como base o problema apresentado por Anupindi e Tayur (1998) de política de estoque base cíclica (três itens, ABAC), variando os resultados estimados e testando por meio de força bruta.

Vaughan (2007) conduziu um estudo no qual comparou, por meio de simulação, diferentes alternativas de dimensionamento e sequenciamento de lotes para o SELSP, comparando o plano cíclico fixo com um plano potencialmente dinâmico, onde a ordem de produção dos itens poderia ser alterada conforme a necessidade. Esse autor buscou entender quais seriam as condições sob as quais um planejamento cíclico seria capaz de apresentar um desempenho superior ao

cenário dinâmico, verificando por meio de modelos de simulação que o cenário cíclico é mais adequado quando a capacidade do sistema é muito utilizada, havendo um pequeno número de itens com extensos tempos de setup.

Uma abordagem diferente para o SELSP é proposta por Brander *et al.* (2005), onde a demanda é inicialmente considerada como sendo determinística para a resolução do ELSP através da heurística de Segerstedt (1999), definindo lotes de tamanho ideais para esse caso determinístico. Os lotes são, então, sequenciados em revisões periódicas segundo uma priorização que considera os níveis de estoque, visando evitar faltas decorrentes da variação de demanda (heurística do *runout time*). Brander *et al.* (2005) realizam simulações de sua heurística e concluem que a tomada de decisões para o sequenciamento é mais impactante que o método de cálculo dos lotes em si.

Uma modificação da heurística de Brander *et al.* (2005) é proposta por Levén e Segerstedt (2007). Na heurística proposta, também se parte de lotes ótimos calculados para o ELSP. Contudo, além de se revisar o sequenciamento dos lotes, também são revisados os tamanhos dos lotes conforme se verificam faltas ao longo do horizonte de planejamento. Caso uma falta futura seja projetada, são feitas reduções nos tamanhos dos lotes para que haja antecipação na produção do lote do produto com risco de falta. Levén e Segerstedt (2007) resolvem um exemplo simples em seu trabalho para apresentar a dinâmica de funcionamento da heurística. Posteriormente, a heurística de Levén e Segerstedt foi implementada por Cortés-Fibla *et al.* (2015) e comparada com outras estratégias de controle para o SELSP, concluindo-se que a heurística possui bons resultados, principalmente em cenários de alta taxa de ocupação.

Löhndorf e Minner (2013) realizaram um estudo no qual abordam o SELSP por meio de técnicas de simulação e otimização, ou simulação e busca, concluindo, semelhantemente a Vaughan (2007), que políticas de estoque-base são boas para o problema, mas são superadas por políticas de estoque fixo em cenários de alta utilização da capacidade do sistema produtivo. O trabalho teve continuidade em Löhndorf *et al.* (2014), onde os autores consideraram tempos de setup dependentes da sequência para o problema do SELSP.

Revisões extensas do SELSP foram feitas por Sox *et al.* (1999) e Winands *et al.* (2011).

Alguns autores buscaram comparar os resultados de diferentes heurísticas de solução do SELSP, como Gascon *et al.* (1994), Vaughan (2007) e Cortés-Fibla *et al.* (2015), por meio da simulação de tais heurísticas. O presente trabalho se diferencia por dois fatores: 1) parte de estratégias simples de controle de estoque, utilizando um modelo de simulação e otimização para definição de seus parâmetros, que pode ser utilizado rapidamente em cenários industriais reais; 2) apresenta e discute o resultado para uma série de diferentes cenários produtivos, analisando como as diferentes configurações do problema podem impactar o resultado ótimo obtido.

3. Metodologia

3.1. Pesquisa em Gestão de Operações

Leedy e Ormrod (2013) definem pesquisa como “o processo sistemático de coletar, analisar e interpretar informação – dados – no intuito de aumentar o entendimento de um fenômeno acerca do qual estamos interessados ou preocupados” (tradução do autor).

Berto e Nakano (2000) apresentam uma classificação dos métodos e tipos de pesquisa, com enfoque nos trabalhos de engenharia de produção. Para os autores, as abordagens podem primeiramente ser classificadas como “quantitativas” ou “qualitativas”.

Abordagens de pesquisa quantitativas são, segundo os autores, aquelas de natureza empírica e hipóteses fortes e bem formuladas, baseando-se em métodos lógico-dedutivos para explicar relações de causa e efeito. Já as abordagens qualitativas são aquelas que buscam aproximar a teoria e os fatos através da interpretação de episódios isolados, destacando o conhecimento das relações entre contexto e ação (método indutivo).

Bertrand e Fransoo (2002) destacam que o uso de técnicas quantitativas de modelagem era predominante na maior parte das primeiras pesquisas em gestão de operações. Tais técnicas tiveram, no começo, o intuito prático de resolver problemas reais na gestão de operações, ao invés de objetivarem primeiramente a expansão do conhecimento teórico da área.

Berto e Nakano (2000) propõem ainda uma segunda classificação das abordagens, podendo esta consistir em uma reconstrução artificial da realidade ou uma observação direta da realidade.

A simulação, para Berto e Nakano (2000), consiste no “uso de técnicas computacionais para simular o funcionamento de sistemas produtivos, a partir de modelos matemáticos”, sendo classificada como uma abordagem dedutiva que reconstrói artificialmente a realidade. Tal abordagem pode ser classificada como “pesquisa experimental”, por conduzir diferentes experimentos nos quais há manipulação de variáveis, a fim de avaliar resultados em busca de conclusões por meio de deduções lógicas.

O problema do ELSP e do SELSP, conforme discutido acima, foi extensamente estudado por diversos autores, que utilizaram frequentemente métodos de simulação para testar a qualidade de suas soluções propostas para o problema.

3.2. Métodos de Simulação e Otimização

Banks *et al.* (2010) apresentam onze propósitos para os quais a simulação é uma ferramenta apropriada:

1. Simulação permite o estudo de, e a experimentação com, as interações internas de sistemas complexos;
2. Alterações em sistemas podem ser simuladas e os efeitos dessas alterações no comportamento do sistema podem ser observados;
3. O conhecimento ganho durante o processo de modelagem do sistema pode trazer propostas de melhoria à configuração do sistema;
4. O processo de mudar as entradas da simulação e observar as saídas produz conhecimento sobre quais variáveis são mais importantes e como elas interagem;
5. A simulação pode ser uma ferramenta pedagógica que reforça os métodos de solução analíticos;
6. A simulação pode ser usada para avaliar o efeito de novas políticas ou estruturas antes de sua implantação;
7. A simulação pode ser usada para validar resultados analíticos;
8. Simular diferentes capacidades para recursos pode ajudar na determinação dos requisitos do sistema;
9. Modelos de simulação para treinamentos tornam possível o aprendizado, sem os custos necessários para o treinamento “*on-the-job*”;
10. Modelos com interface gráfica e animações permitem a visualização de operações simuladas;
11. Diversos sistemas modernos são de complexidade tamanha que suas interações internas só são tratáveis por meio de modelos de simulação.

Com base nas potencialidades existentes no uso de técnicas de simulação para a pesquisa destacados por Banks *et al.* (2010), em particular o segundo e o quarto pontos, verifica-se que tais técnicas podem ser usadas não apenas para validação de modelos e previsão de resultados, mas também serem integradas como parte do método de solução, permitindo uma análise de sensibilidade por meio da variação dos dados de entrada.

Segundo Chwif e Medina (2007), um problema de Simulação e Otimização (SO, outra forma de se referir à Simulação e Busca) é um problema de otimização em que a função objetivo, restrições, ou ambos são respostas que podem ser avaliadas pela simulação computacional. Ainda segundo esses autores, a ideia básica do método consiste em, dada uma condição inicial, o procedimento de otimização irá atuar iterativamente com o modelo de simulação, fornecendo os valores das variáveis a serem simuladas e recebendo do modelo de simulação a função objetivo. A ideia do método de simulação e otimização está representada na Figura 6.

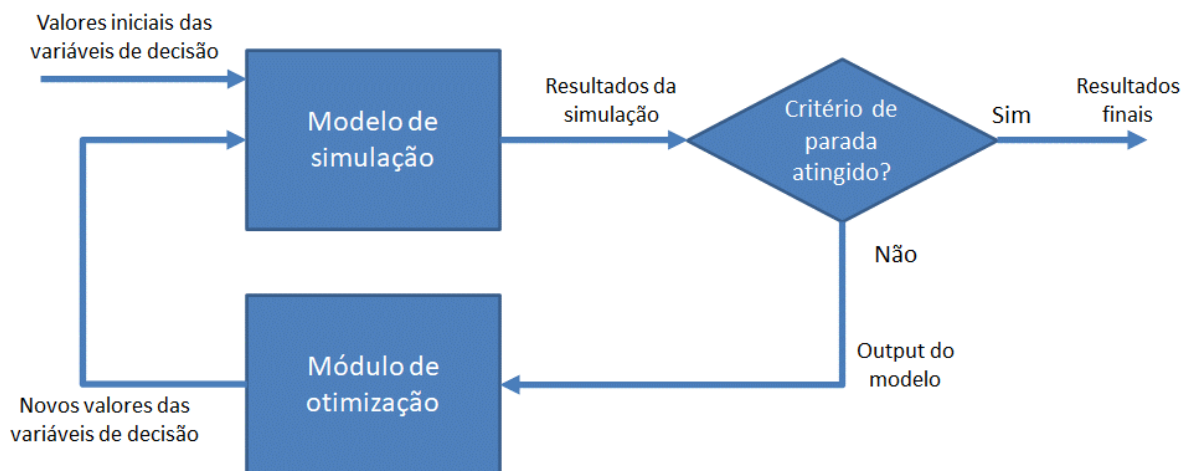


Figura 6: Representação do método de simulação e otimização. Adaptado de Melouk *et al.* (2013).

Banks *et al.* (2010) apontam desafios existentes na otimização via simulação. Segundo esses autores, o processo de otimização, mesmo em um caso sem incertezas, já é muito difícil para problemas de grande complexidade. O método de simulação e otimização aplicado ao modelo estocástico acrescenta a complicação

de que uma configuração particular do sistema não pode ter seu desempenho avaliado de forma exata, somente estimada. Por conta dessa estimativa, não é possível concluir com certeza se uma configuração é superior à outra, e qualquer conclusão a ser tomada exige muitas replicações das simulações.

Fu (2002) fez uma revisão sobre os trabalhos existentes na área de simulação e otimização, apresentando um tutorial para aplicação do método, e discute o distanciamento entre os trabalhos existentes nas áreas de SO – focados no desenvolvimento de algoritmos cada vez mais eficientes e “elegantes” – e os desenvolvimentos de *softwares* de simulação mais recentes, o que acaba gerando um distanciamento entre teoria e prática.

Um número considerável de trabalhos discutindo as práticas de simulação e otimização foram encontrados principalmente nos anais do congresso de simulação *Winter Simulation Conference*, mostrando a crescente relevância do tópico. Banks (2001) aponta que, alguns anos atrás, a otimização usando meta-heurísticas como o algoritmo genético e a busca tabu estavam dando seus primeiros passos, e hoje quase todos os *softwares* de simulação por eventos discretos possuem alguma forma de otimização. Aponta ainda que existem diversos problemas a serem trabalhados dentro dessa área, sendo um terreno fértil para pesquisas futuras.

Exemplos já citados anteriormente no presente trabalho, de métodos de simulação e busca aplicados ao problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes, podem ser vistos em Byrne (1990), Löhndorf e Minner (2013) e Löhndorf *et al.* (2014).

3.3. Método da pesquisa

O presente trabalho foi estruturado com base nos passos de um estudo de simulação propostos por Banks *et al.* (2010). A Figura 7 apresenta um modelo esquemático dos passos:

- **Formulação do problema:** todo estudo de simulação deve iniciar com um enunciado do problema, de modo a garantir que tal problema seja claramente descrito e compreendido. No caso de um projeto acadêmico, a formulação do problema pode ser considerada análoga à formulação da questão de pesquisa, que no presente trabalho é a

seguinte: utilizando o método de simulação e otimização, como se comparam as estratégias de produção de sequência fixa e variável no problema SELSP, considerando diferentes quantidades de produto, taxa de ocupação, variabilidade da demanda e incrementos de setup?

- Definição dos objetivos e planejamento do projeto: o objetivo consiste em responder as perguntas enunciadas pelo projeto de pesquisa. É importante nessa etapa avaliar se o método de simulação é adequado para abordar o problema. A definição dos objetivos está no Capítulo 1, enquanto um detalhamento da escolha do método de simulação se encontra no Capítulo 3;
- Modelagem conceitual: a construção do modelo conceitual consiste na extração dos elementos essenciais do problema, selecionando e modificando premissas básicas que caracterizam o sistema até chegar a uma simplificação útil. A revisão da literatura para auxiliar na identificação dos elementos do problema está no Capítulo 2. O detalhamento do modelo conceitual está no Capítulo 4;
- Coleta de dados: há uma forte sinergia entre a coleta de dados e o desenvolvimento do modelo conceitual, com a complexidade do sistema e dos dados sendo coletados, influenciando diretamente a complexidade do modelo. O presente projeto não é baseado em um sistema real específico e, dessa forma, não possui uma etapa de coleta de dados *in-loco*, com os dados sendo definidos no delineamento do experimento.
- Tradução do modelo: os modelos geralmente possuem alto grau de complexidade e trabalham com grande quantidade de informação, sendo necessário sua implementação em uma linguagem que seja reconhecida por um computador. A implementação do modelo computacional se encontra no Capítulo 4;
- Verificação do modelo: a verificação do modelo consiste na execução de testes com o modelo computacional, para identificar se o código foi feito de forma correta para a tarefa proposta. Essa etapa também se encontra no Capítulo 4;

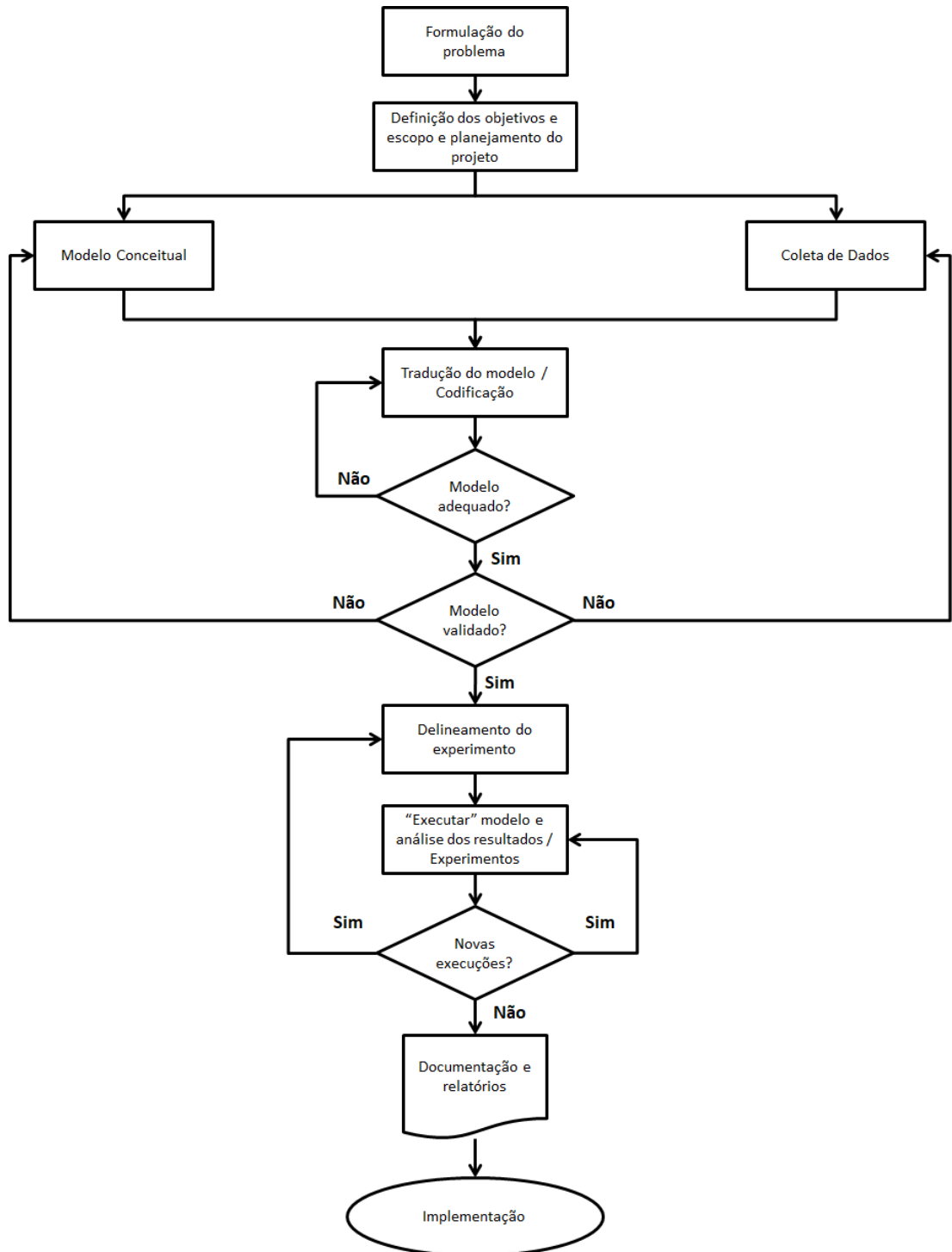


Figura 7: Passos de um estudo de simulação – adaptado de Banks *et al.* (2010).

- Validação do modelo: a validação do modelo consiste no processo iterativo de calibração do modelo, para identificar se os resultados obtidos pela simulação computacional são coerentes com as características reais do sistema modelado. No caso de um projeto de

pesquisa acadêmica, essa validação também tem o objetivo de verificar se o modelo proposto atende aos objetivos do projeto de pesquisa. Essa etapa se encontra no Capítulo 4;

- Delineamento do experimento: consiste na definição das instâncias a serem simuladas – parâmetros do modelo e horizonte da simulação. O delineamento é abordado no Capítulo 5;
- Execução dos experimentos e análise dos resultados: consiste em executar o modelo computacional para cada instância e analisar o desempenho do sistema nas diferentes condições estudadas. A análise dos resultados se encontra no Capítulo 6;
- Execuções adicionais: após a análise dos resultados da simulação, execuções adicionais do modelo sob outras condições podem ser necessárias. Essa necessidade não foi detectada no presente trabalho;
- Documentação e relatórios: consiste na documentação do projeto desenvolvido, para replicação do experimento caso necessário, e do progresso dos dados e da análise. O resultado dessa etapa consiste na presente dissertação;
- Implementação: nos projetos de simulação, esta etapa consiste na configuração do sistema com base nas recomendações do estudo de simulação. Esta etapa não se aplica em um projeto de pesquisa como o presente estudo.

3.4. Anylogic e OptQuest

O *software* de simulação Anylogic tem se provado uma ferramenta útil para a resolução de problemas, principalmente dentro da área de Gestão de Cadeias de Suprimento (Muravev *et al.*, 2020).

Para o presente trabalho, o *software* Anylogic foi utilizado por possuir, dentro de suas funcionalidades, uma ferramenta de Simulação e Otimização, o OptQuest, desenvolvida pela OptTek, além de uma interface amigável e um grau adequado de flexibilidade para modelagem. Apesar da versão de testes do Anylogic possuir algumas limitações para o uso do OptQuest, a versão utilizada se mostrou suficiente para os objetivos do presente trabalho. Outros fatores que levaram à escolha do *software* foram: diversos recursos para modelagem, flexibilidade do *software* com

módulos programáveis em JavaScript, o fato do Anylogic ser um dos líderes de mercado e a disponibilidade de acesso ao programa.

Laguna (1997) descreveu o funcionamento do otimizador de propósito geral OptQuest. O sistema foi desenvolvido para adaptar a metodologia meta-heurística *Scatter Search*. O *Scatter Search* foi proposto por Glover (1977) como uma heurística para abordar problemas de programação inteira, mas somente passou a ser utilizado de forma mais abrangente recentemente, quando ganhou significativa atenção na literatura e na prática como uma metodologia de simulação e otimização (Yang *et al.*, 2005). Para mais informações sobre o *Scatter Search*, verificar Martí *et al.* (2006).

O OptQuest permite a imposição de restrições lineares em uma solução, e contém aceleradores de redes neurais para melhorar a eficiência da busca por uma solução. Sua avaliação da função objetivo está vinculado à execução de uma simulação, como por exemplo um modelo de simulação por eventos discretos desenvolvido em *softwares* como Anylogic ou Arena (Yang *et al.*, 2005).

Alguns exemplos de aplicação do OptQuest podem ser vistos em trabalhos como: Yang *et al.* (2005), que utilizaram a ferramenta em um estudo de caso em uma fábrica de embalagens de circuitos integrados, buscando otimizar o *throughput* do sistema e os tempos de ciclo; Kleijnen e Wan (2007), que simularam um sistema de inventário com estratégia (s,S), sob diferentes condições de restrições, e compararam os resultados obtidos pelo OptQuest com outras abordagens de otimização; e Sadeghi *et al.* (2020), que simularam uma cadeia de suprimentos com múltiplos estágios, de tiras de glicose, e utilizaram o OptQuest para dimensionar os pontos de reorder ideais para os diferentes níveis da cadeia, objetivando otimizar os custos totais.

4. Modelagem

4.1. Modelos conceituais

Um modelo conceitual é um conjunto de conceitos e regras que busca transmitir os princípios fundamentais e a funcionalidade básica do sistema representado.

No caso do SELSP, é necessário estruturar um modelo que combine as características da unidade produtiva (capaz de produzir diferentes itens, um item por vez, com capacidade restrita, e tempo de setup significativo), o processo de recebimento e atendimento de pedidos, e uma gestão de níveis de estoque, tanto para definir o atendimento das ordens quanto para o cálculo dos custos associados ao nível de inventário.

Duas importantes decisões a serem tomadas na elaboração do modelo conceitual são a estratégia de dimensionamento dos lotes de produção e de sequenciamento de produção.

O tamanho do lote de produção pode ser definido como fixo ou variável. Alguns trabalhos de SELSP que adotaram a estratégia de lote de produção fixo foram Graves (1980), Vaughan (2007) e Jodlbauer e Reitner (2012); enquanto exemplos que adotaram a estratégia de lotes variáveis foram Paternina-Arboleda e Das (2005), Löhndorf e Minner (2013), Smits *et al.* (2004) e Wagner e Smits (2004).

A sequência de produção, por sua vez, também pode ser definida como fixa (os itens são produzidos sempre na mesma sequência) ou variável (há alguma lógica que analisa as condições do sistema para decidir o próximo item a ser produzido, podendo a sequência ser variável). Exemplos de trabalhos que adotaram a estratégia da sequência de produção fixa foram Jodlbauer e Reitner (2012) e Wagner e Smits (2004), enquanto trabalhos que adotaram a estratégia da sequência variável foram Graves (1980) e Paternina-Arboleda e Das (2005).

Conforme estabelecido, o objetivo desta pesquisa é identificar como algumas características do problema impactam a margem total de contribuição, tanto para o cenário de sequência de produção fixa quanto variável. Dessa forma, foram desenvolvidos dois modelos.

Para o primeiro modelo, de sequência fixa, definiu-se por um sistema que opera com estratégia de estoque-base, ou *can order point* (s,S). Nessa estratégia,

os itens são conferidos em uma sequência previamente determinada e, caso apresentem um estoque abaixo do ponto de reposição (s), inicia-se um lote de produção para retornar o estoque ao nível do estoque máximo (S), ou seja, o tamanho do lote é variável.

Para o segundo modelo, de sequência variável, optou-se por utilizar uma estratégia simples (R,Q) , onde para a chegada de cada nova ordem de venda de um material, verifica-se a posição de estoque desse material e, caso esteja abaixo de um ponto de pedido (R), coloca-se na fila de produção, uma ordem de tamanho fixo (Q).

Para ambos os cenários, foi desenvolvido um modelo composto de três módulos que atuam em paralelo:

- Módulo de Demanda;
- Módulo de Produção;
- Módulo de Controle.

A dinâmica de interação entre os diferentes módulos foi inspirada no modelo de produção e demanda apresentado por Altiok e Melamed (2007).

4.1.1. Sequência de produção fixa (s,S)

Um fluxograma representando o modelo conceitual para o sistema operando com uma política de sequência de produção fixa pode ser visto na Figura 8.

O módulo de produção é responsável por gerar as ordens de produção e o abastecimento dos estoques dos produtos, seguindo uma estratégia de estoque-base (s,S) , semelhante à abordagem adotada por, Federgruen e Katalan (1998).

O módulo de produção segue uma sequência de produção previamente estabelecida, que é um dado de entrada do modelo. Essa lista se mantém fixa durante todo o horizonte da simulação. A lista indica a ordem que os itens têm seu nível de estoque verificado, para definir se há a necessidade de iniciar a produção de um lote. O modelo confere qual é o próximo item da sequência e, caso o nível de estoque desse item esteja abaixo do *can order point* (s), um lote de produção de dimensão $(S_j - s_j)$ é iniciado (S , nessa estratégia, é chamado de “estoque máximo”).

Uma vez definido o material a ser produzido e o tamanho do lote, calcula-se o tempo de setup e o tempo de produção necessários para a produção desse lote.

No caso da estratégia de sequência de produção fixa, o objetivo do método de simulação e otimização, é identificar os valores de s e S para cada item, que maximizem a margem total de contribuição.

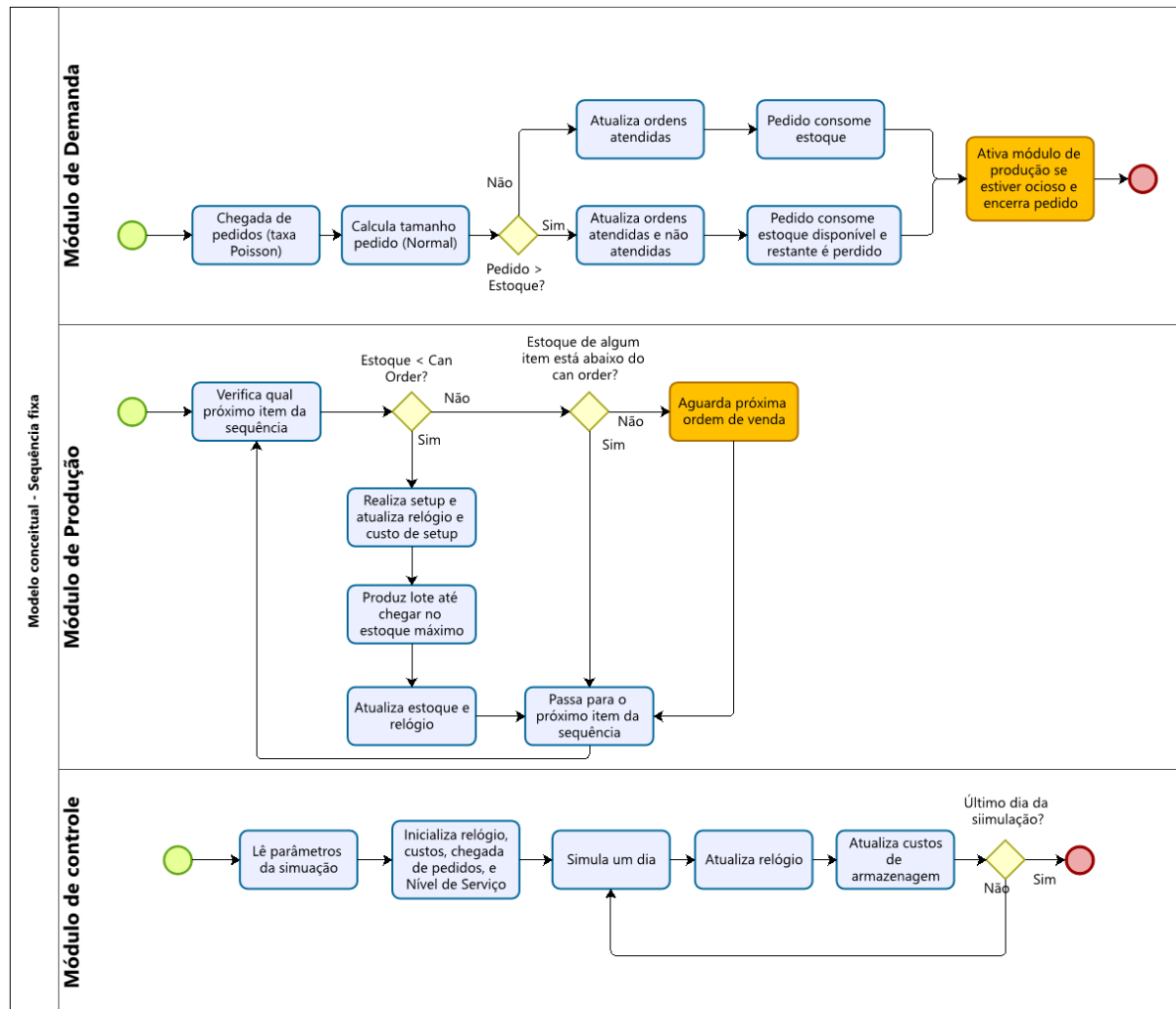


Figura 8: Fluxograma do modelo conceitual desenvolvido para a sequência fixa e lote variável.

Após finalizar a produção do lote, o modelo atualiza os níveis de estoque e acrescenta os custos de setup incorridos ao custo total, e o próximo item da sequência produtiva estabelecida é verificado, e assim sucessivamente.

Caso o nível de estoque do material verificado esteja acima do *can order point*, esse material não é produzido e o modelo segue para o próximo item da sequência.

Caso nenhum dos itens esteja com o nível de estoque abaixo do *can order point*, a máquina entra em ociosidade, e o modelo aguarda a próxima chegada de uma ordem de venda para reiniciar o processo de conferência dos níveis de estoque.

O módulo de demanda, por sua vez, é o responsável pela criação dos pedidos de clientes, atendimento de tais pedidos, baixa do estoque e atualização dos indicadores de nível de serviço. Para a simulação, é necessário a criação desse ambiente de geração de demanda artificial – mas a simulação poderia ser executada e otimizada a partir de uma lista de demandas reais, por exemplo.

Os pedidos são gerados segundo uma distribuição composta. A chegada dos pedidos segue um processo de Poisson, enquanto o tamanho dos pedidos segue uma distribuição normal. O trabalho de Wagner e Smits (2004), por exemplo, representou sua demanda estocástica utilizando as mesmas distribuições de probabilidade para configurar a demanda composta. Outros trabalhos que modelaram a demanda como um processo composto foram Vaughan (2007) e Löhndorf *et al.* (2013), trabalhos onde tanto a taxa de chegada dos pedidos quanto seu tamanho seguiram uma distribuição de Poisson. Cada ordem de venda é composta de apenas um dos produtos.

Caso haja estoque suficiente para atendimento integral do pedido no momento de sua chegada, o pedido é atendido instantaneamente em sua totalidade, abatendo-se do estoque o volume do pedido. Se o estoque disponível no momento for menor do que o tamanho do pedido, a ordem é atendida parcialmente, sendo o restante perdido (não é admitido *backorder*). O modelo não considera a existência de custo de falta diretamente, mas como a ordem não atendida é perdida, o faturamento não entra para a margem total de contribuição.

Caso, no momento da chegada de uma ordem de venda, a produção esteja inativa, verifica-se se o estoque do produto demandado fica abaixo do ponto de pedido após o atendimento da ordem. Em caso afirmativo, a produção é ativada novamente, iniciando a sequência de produção a partir deste produto. Dessa forma,

o módulo de demanda passa a atuar também como um gatilho para reiniciar a produção quando essa se encontra ociosa.

Por fim, o módulo de controle é o responsável pela leitura dos dados de entrada do problema, por finalizar o processo de simulação, e por fazer os controles que dependam de fatores temporais. Dessa forma, o módulo de produção é o responsável por controlar os fechamentos de cada dia – um ciclo de 24 horas, dado que o modelo opera 24 x 7 – e atualizar os custos de armazenagem a cada fechamento de um período de 24 horas.

4.1.2. Sequência de produção variável (R,Q)

Um fluxograma representando o modelo conceitual para o sistema operando com uma política de sequência de produção variável pode ser visto na Figura 9.

Assim como na sequência de produção fixa, aqui o módulo de produção é responsável por gerar as ordens de produção e o abastecimento dos níveis de estoque dos materiais. No entanto, no caso da sequência variável, a cada chegada de ordem de venda de um produto, o sistema verifica se a posição de estoque desse produto se encontra abaixo do valor de ponto de pedido R.

Caso sim, o sistema inclui uma ordem de produção de tamanho fixo Q na fila de produção.

Dessa forma, enquanto todos os produtos estiverem com sua posição de estoque acima de seu valor de ponto de pedido R, a máquina se mantém naturalmente ociosa, e o modelo aguarda a próxima chegada de uma ordem de venda.

Os módulos de demanda e controle possuem as mesmas características que as apresentadas no modelo conceitual para sequência de produção fixa.

No caso da estratégia de sequência de produção variável, o objetivo do método de simulação e otimização, é identificar os valores de R e Q para cada produto, que maximizem a margem total de contribuição.

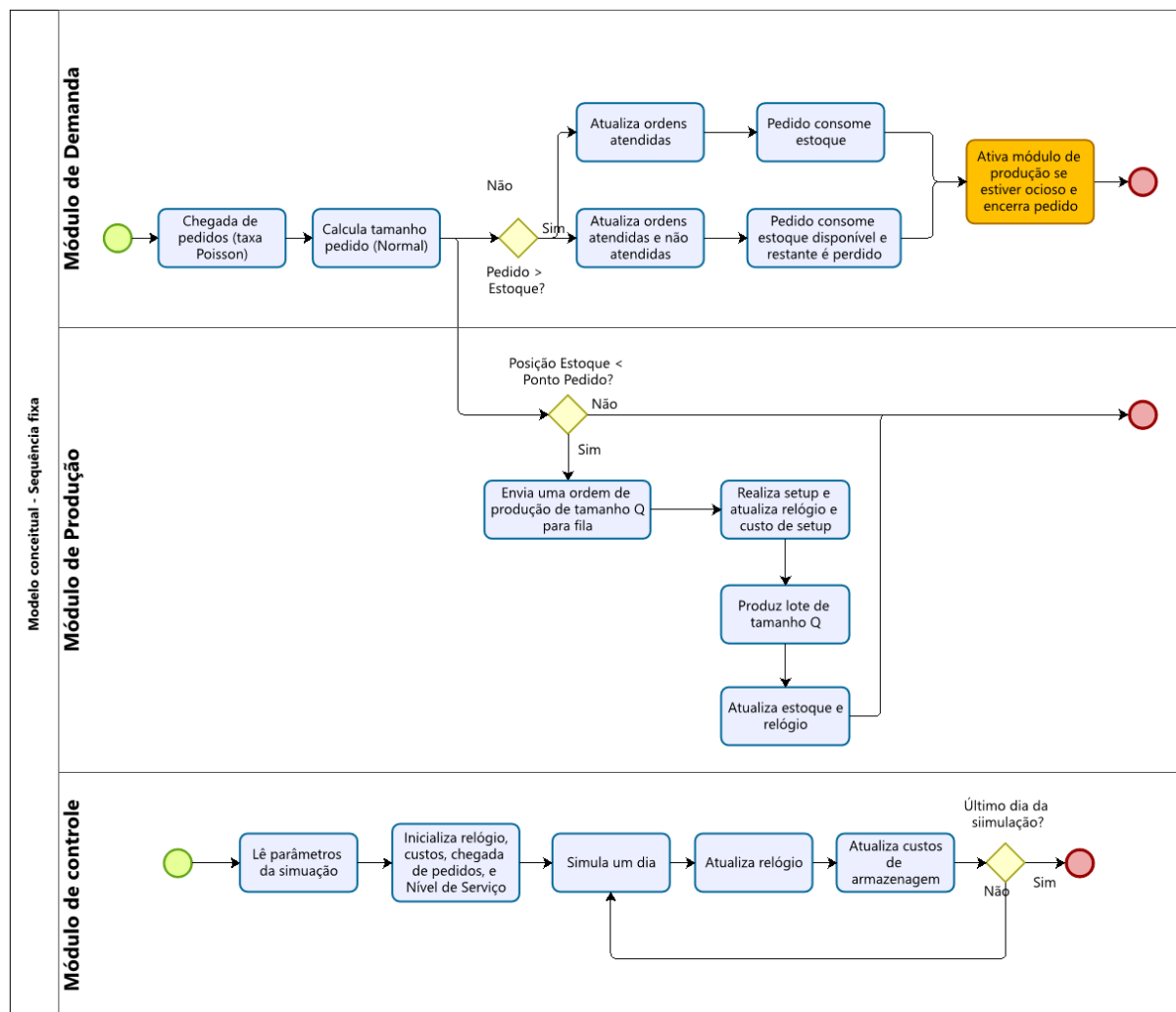


Figura 9: Fluxograma do modelo conceitual desenvolvido para a sequência variável.

Após finalizar a produção de um lote, o modelo atualiza os níveis de inventário e os custos de setup, e o cálculo dos tempos de cobertura é reiniciado.

4.2. Implementação computacional

Uma vez definidos os modelos conceituais, estes foram traduzidos para programa de computador *Anylogic*, para serem simulados computacionalmente.

Para ambos os modelos (sequência fixa e sequência variável), desenvolveu-se um módulo de demanda utilizando blocos do tipo “Source”. Para simplificar a modelagem, foram utilizados n blocos, um para cada produto. O bloco Source tem a

função de criar os agentes da simulação no Anylogic e, no caso dos presentes modelos, cada agente criado representa uma ordem de venda.

Ao criar o agente, o bloco Source já atribui à ordem de venda as suas características: o tipo de material, e a quantidade da ordem. Para tal, dois atributos foram criados, “agent.tipo”, que define o tipo de material, e “agente.qtd”, que calcula qual o tamanho da ordem considerando o fator estocástico. A Figura 10 mostra os detalhes do bloco Source, com a programação feita no Anylogic.

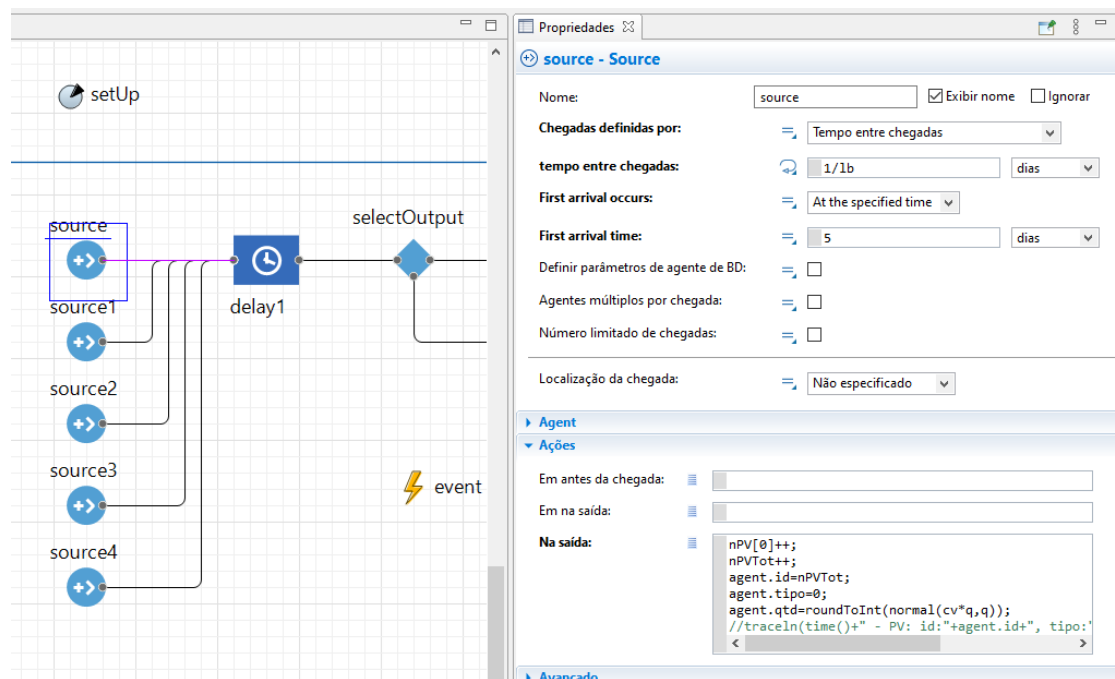


Figura 10: Detalhamento do bloco Source no Anylogic.

Também utilizou-se um bloco do tipo “Delay” em ambos os modelos, para calcular o atendimento das ordens de vendas, denominado “delay1”. Ao chegar uma ordem de venda, o bloco verifica de qual item se trata a ordem, e compara o tamanho do pedido com o estoque disponível desse material. Por fim, o bloco realiza o atendimento da ordem de venda (que pode ser atendida parcialmente), abatendo a quantidade atendida do estoque, e atualizando a margem total de contribuição acumulada com o volume vendido. Apesar do bloco ter como função primária o “Delay” no Anylogic, ou seja, poder gerar atrasos no processo para simular operações, no presente modelo o bloco foi utilizado unicamente com a função de assignar valores para as ordens de vendas. A Figura 11 mostra os detalhes do bloco delay1, com a programação feita no Anylogic.

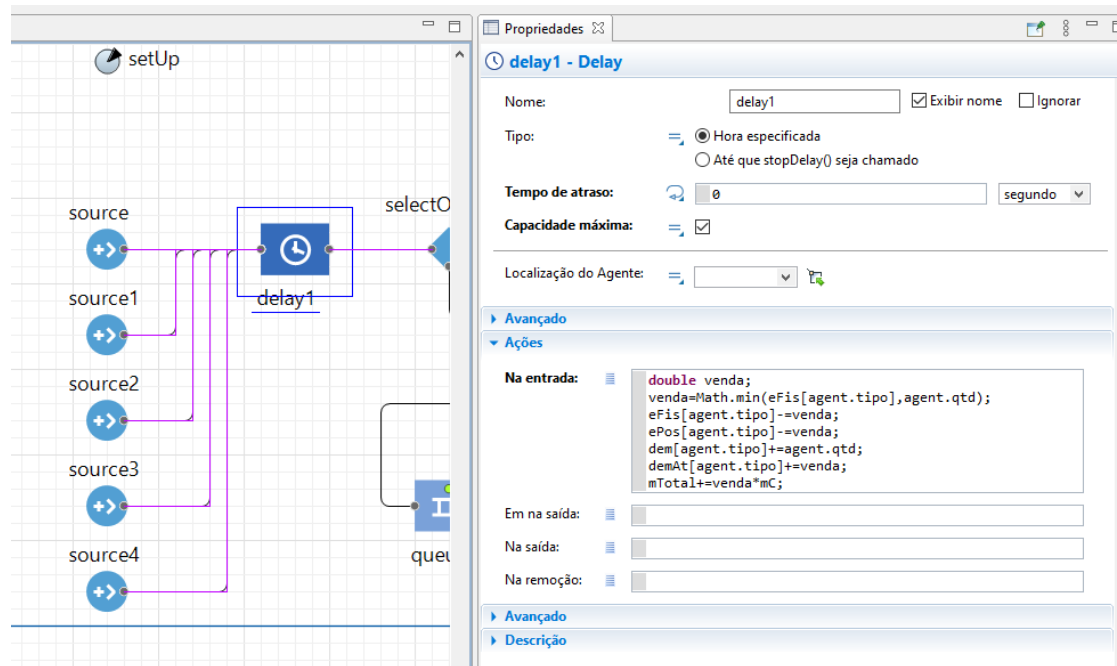


Figura 11: Detalhamento do bloco delay1, que calcula o atendimento de ordens e atualiza níveis de estoque e margem total de contribuição no Anylogic.

No caso do modelo de sequência de produção fixa – estoque-base (s,S), um bloco do tipo Delay denominado “delay2”, seguido de um bloco de decisão do tipo “Select Output” são os responsáveis por avaliar se o estoque do próximo item da sequência estabelecida a priori se encontra abaixo do *can order point* (s). Caso sim, o bloco delay2 calcula o do tempo e custo de setup, com base no último produto produzido e o próximo item a entrar na produção. No caso de nenhum item estar abaixo do *can order point*, um bloco do tipo Hold faz com que o módulo de produção entre em ociosidade. A Figura 12 mostra o módulo de produção, com destaque para o bloco delay2 e sua programação feita no Anylogic. Os módulos de produção e demanda estão ligados de forma lógica pelo bloco Hold, que relaciona a lógica de demanda e estoque.

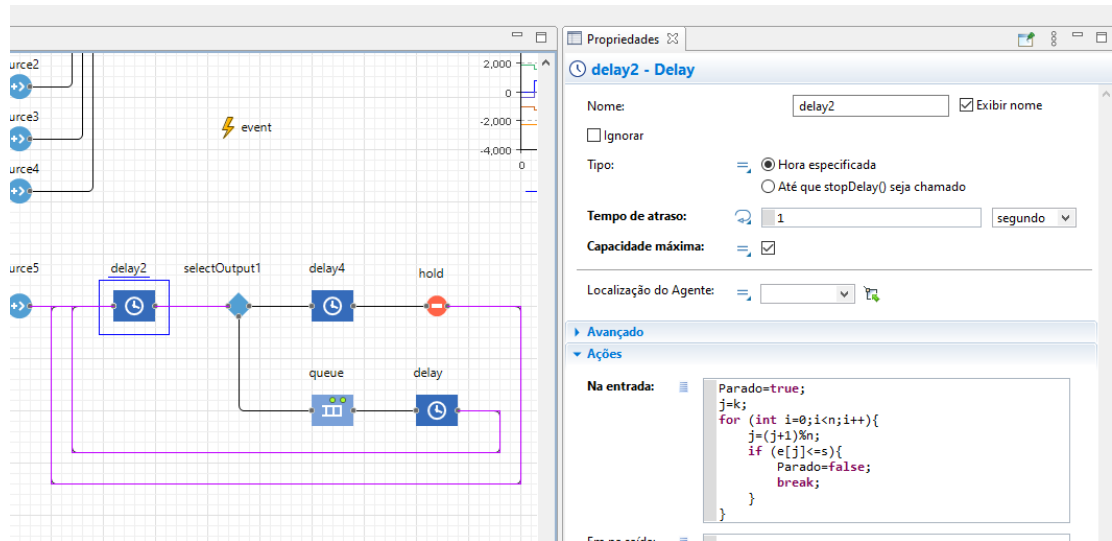


Figura 12: Detalhamento do módulo de produção e do bloco delay2, que avalia se o sistema deve produzir o próximo item da sequência ou entrar em ociosidade no modelo de produção de sequência fixa.

Já no caso do modelo de produção de sequência variável, a chegada de uma nova ordem de venda pode ativar uma nova produção (um sistema *demand driven*). Com a chegada de cada pedido, o sistema avalia se a posição de estoque fica abaixo do ponto de pedido R . Essa decisão é feita usando um bloco do tipo “selectOutput”. Caso sim, uma nova ordem de produção de tamanho fixo Q vai para a fila de produção. A Figura 13 essa lógica em mais detalhe.

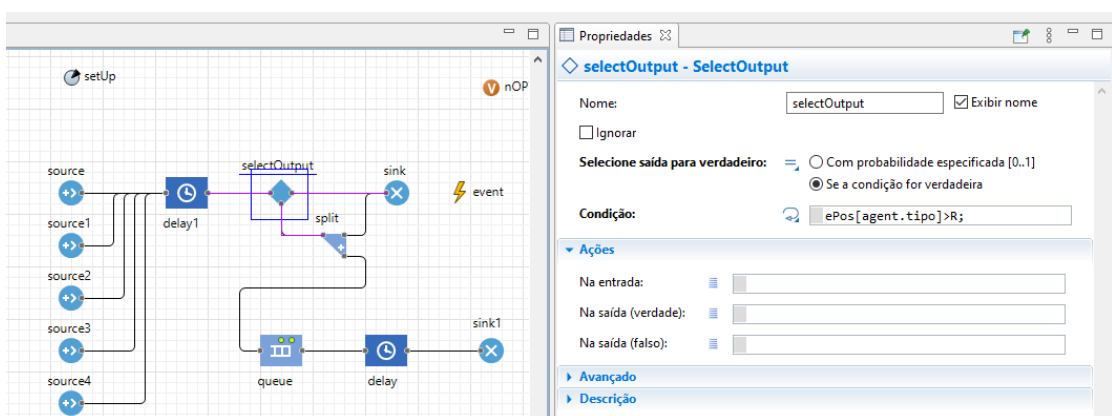


Figura 13: Detalhamento do módulo de produção e do bloco selectOutput, que avalia se o sistema deve enviar uma nova ordem de produção para o sistema, no modelo de produção de sequência variável.

Para ambos os modelos, utilizou-se o recurso “Event” do Anylogic para implementar o módulo de controle. O Event é um recurso usado para programar ações que devem acontecer durante a simulação, podendo sua ativação ser em um dado intervalo de tempo, ou como consequência de outra ação. No caso dos presentes modelos, o módulo de controle deve atualizar os custos de armazenagem diariamente, de modo que o Event é um evento cíclico que se repete a cada 24 horas. A Figura 14 mostra os detalhes do bloco Event, com a programação feita no Anylogic.

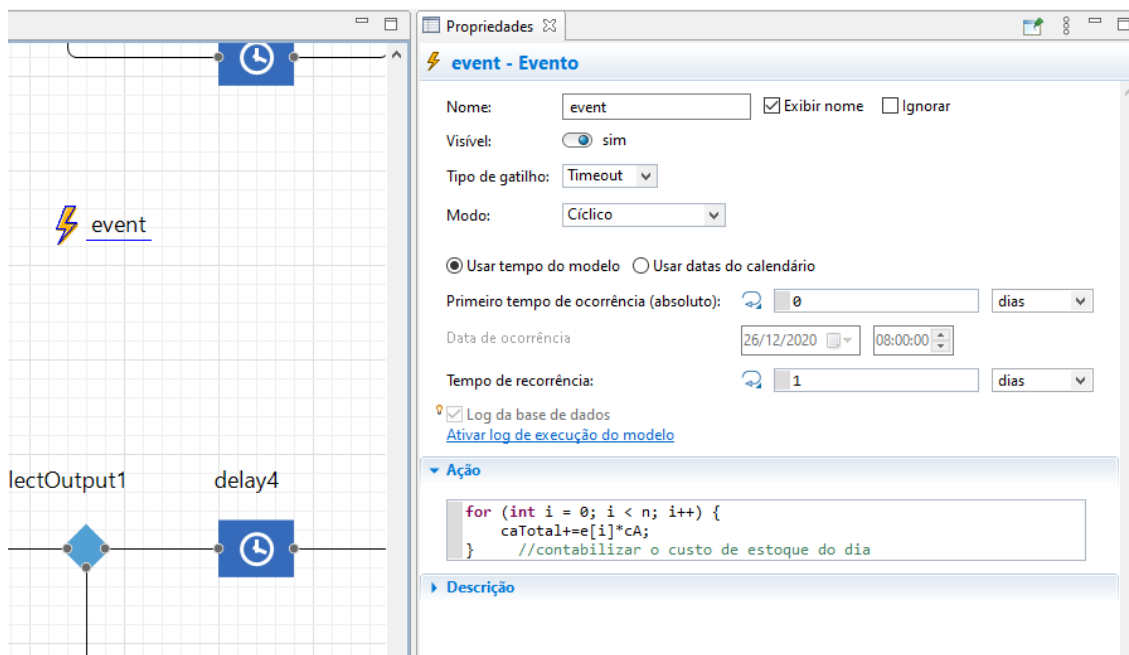


Figura 14: Detalhamento do bloco Event no Anylogic.

Para ambos os modelos, utilizou-se um bloco “output” para calcular o resultado. Deu-se o nome “Res” para esse bloco em ambos os modelos. O bloco Res foi programado para calcular o resultado médio anual da margem total no final da simulação. O *output* Res foi utilizado como função objetivo do experimento de otimização do Anylogic, de modo que a ferramenta de simulação e otimização Optquest buscou maximizar o valor de Res. A Figura 15 mostra os detalhes do bloco Output, com a programação feita no Anylogic, e a Figura 16 mostra a implementação do experimento de simulação e otimização que buscou maximizar o valor de Res.

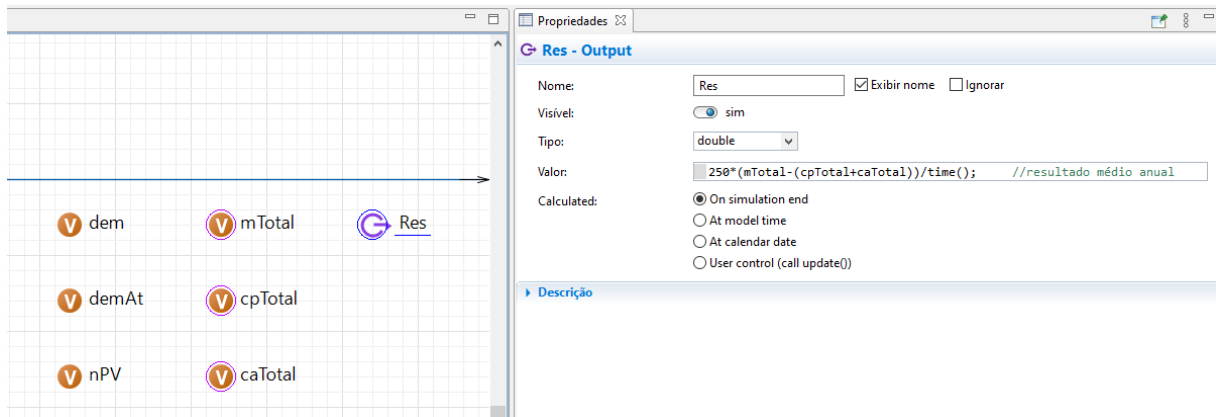


Figura 15: Detalhamento do bloco Output, denominado “Res” no Anylogic.

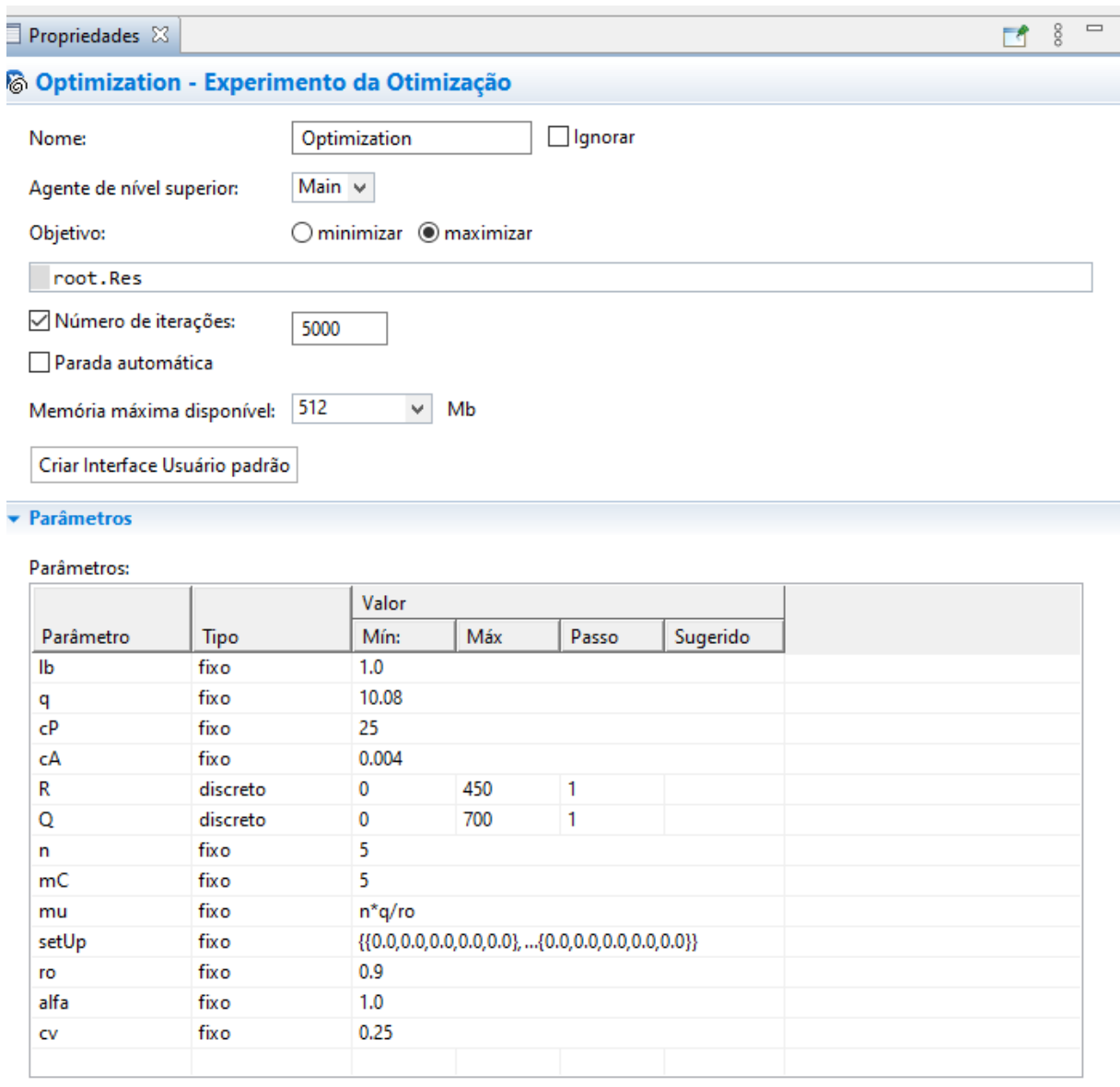


Figura 16: Detalhamento do experimento de otimização do Optquest.

Por fim, ambos os modelos utilizam uma combinação dos blocos Queue e Delay para simular o sistema de produção, onde as ordens de produção aguardam na fila para serem processadas, tendo a produção uma duração calculada com base nos parâmetros do sistema – tamanho do lote e produtividade.

As Figuras 17 e 18 apresentam, respectivamente, os modelos completos desenvolvidos para a estratégia de sequência de produção fixa e variável. Já as Figuras 19 e 20 apresentam os parâmetros, variáveis e *outputs* desenvolvidos respectivamente para os modelos de sequência de produção fixa e variável.

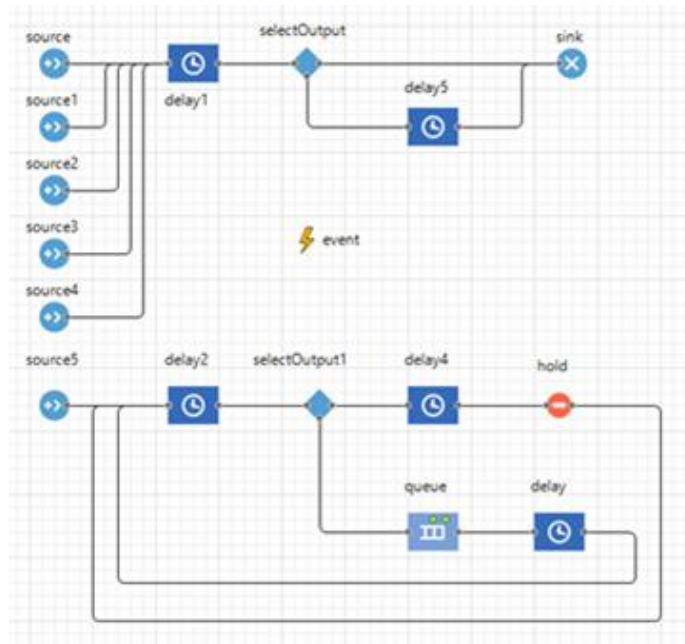


Figura 17: Modelo em Anylogic desenvolvido para a estratégia de produção de sequência fixa e tamanho de lote variável.

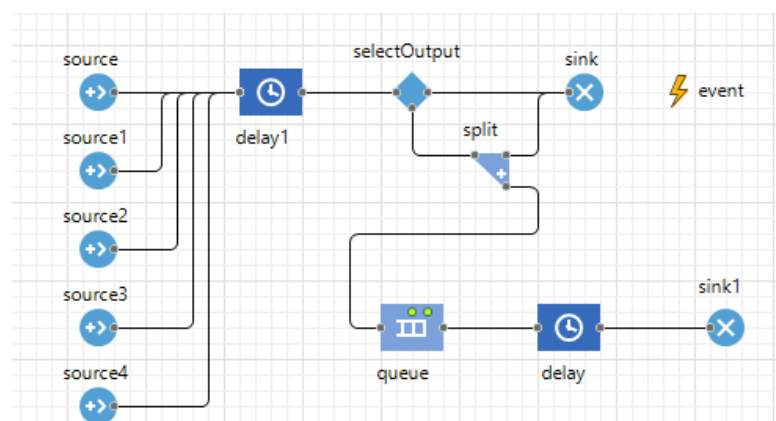


Figura 18: Modelo em Anylogic desenvolvido para a estratégia de produção de sequência variável e tamanho de lote fixo.

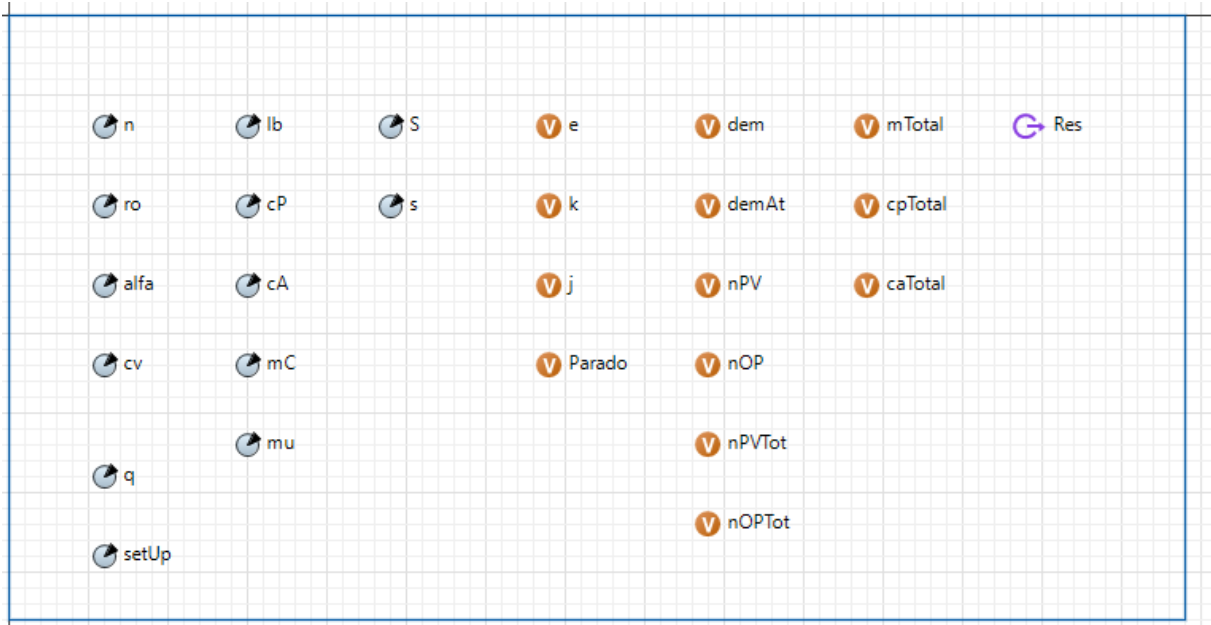


Figura 19: Destaque para os parâmetros, variáveis e *output*, do modelo que segue a estratégia de produção de sequência fixa e tamanho de lote variável.

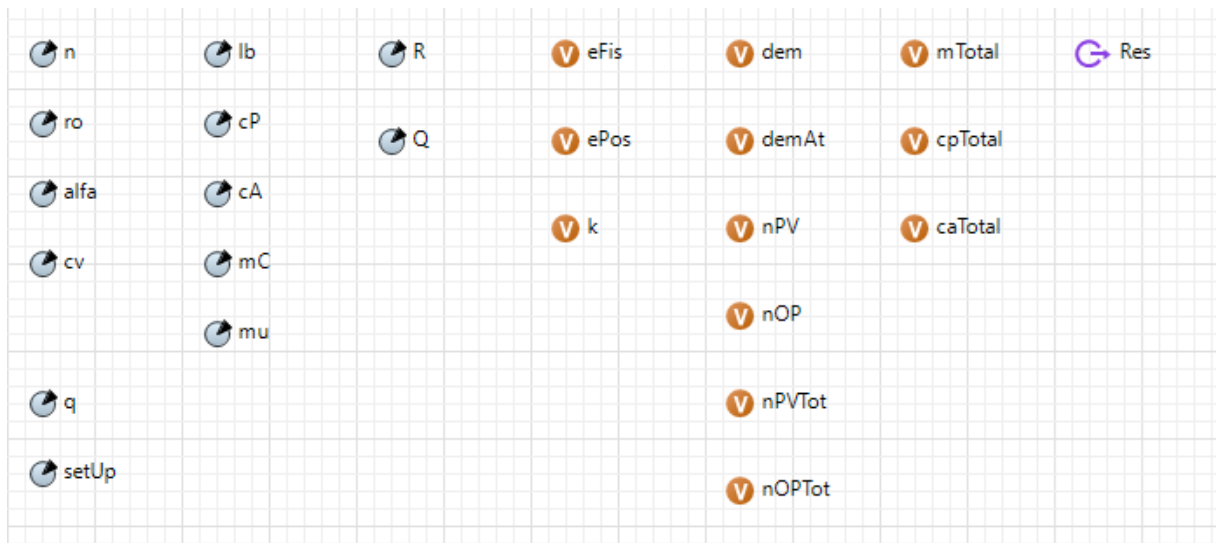


Figura 20: Destaque para os parâmetros, variáveis e *output*, do modelo que segue a estratégia de produção de sequência variável e tamanho de lote fixo.

4.3. Verificação e validação

Uma vez finalizada a tradução do modelo para o programa Anylogic, alguns testes considerando tanto o sistema determinístico quanto versões controladas do problema estocástico foram feitos para verificação lógica do modelo.

Primeiramente, executou-se uma simulação para o cenário determinístico, plotando um gráfico com os valores de inventário de cada um dos itens. Com isso, esperava-se observar um gráfico de inventário com o padrão conhecido de “dente de serra” para os n itens. Esse resultado de fato foi observado, como se pode ver nas Figuras 21 (sequência fixa) e 22 (sequência variável).

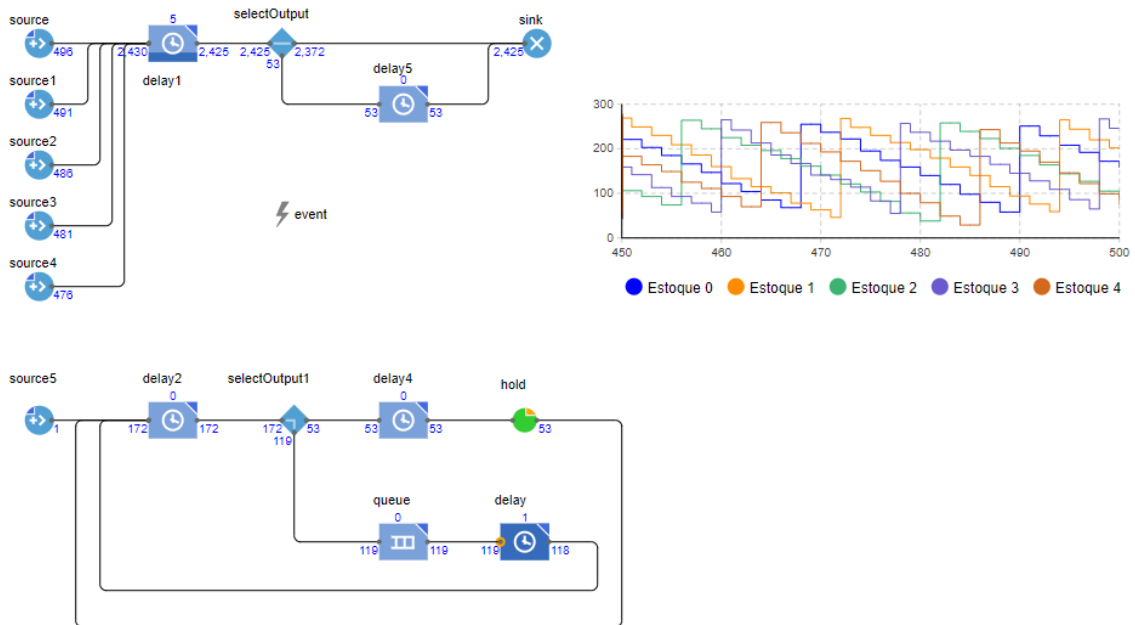


Figura 21: Resultado da simulação para um cenário determinístico e com $n = 5$ itens, modelo de sequência fixa.

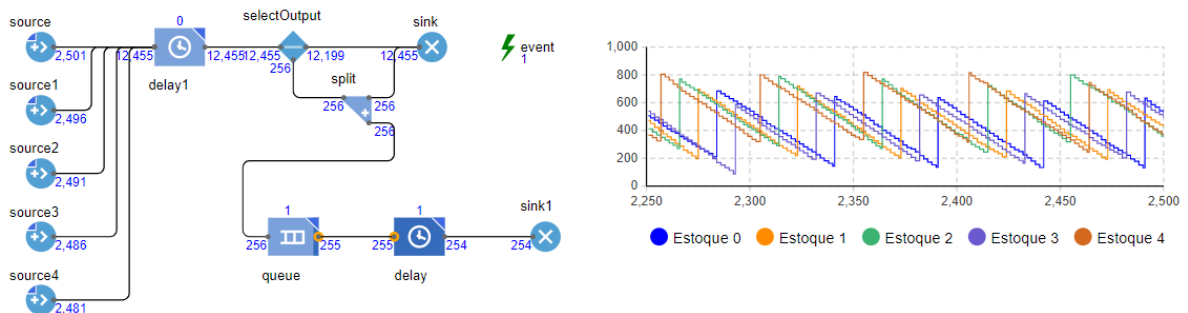


Figura 22: Resultado da simulação para um cenário determinístico e com $n = 5$ itens, modelo de sequência variável.

Um segundo teste para o modelo determinístico foi o de simular cenários nos quais a taxa de ocupação fosse superior a 1. Com isso, era esperado que não seria possível atender completamente todas as ordens, e que o estoque chegaria a zero em alguns momentos. A Figura 23 mostra um dos testes, onde isso foi observado.

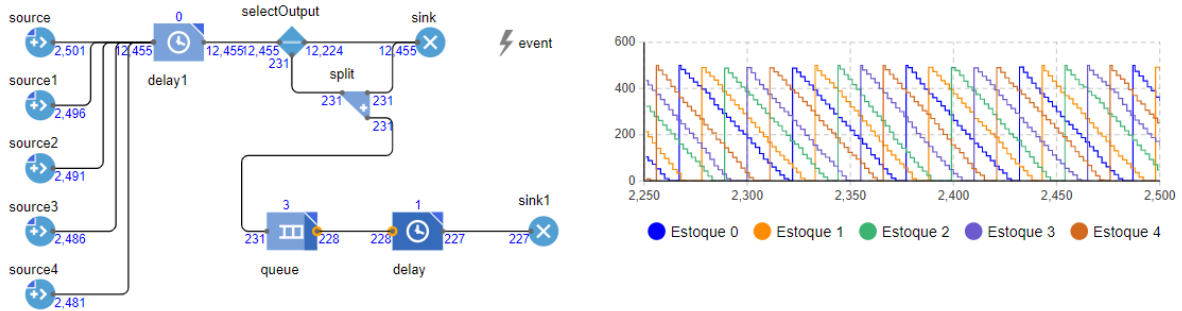


Figura 23: Resultado da simulação para um cenário determinístico, com $n = 5$ itens, modelo de sequência fixa e taxa de ocupação superior a 1.

Ao executar o experimento de otimização, acompanhou-se a evolução dos testes e dos resultados, para verificar a convergência e coerência dos dados testados. Em todos os cenários simulados, verificou-se uma convergência conforme o esperado. Durante o delineamento do experimento, definiu-se quais deveriam ser os parâmetros do modelo para cada cenário e, com isso, estipulou-se qual seria o resultado máximo teórico possível de ser obtido – margem de contribuição média anual de \$63.000. Verificou-se, para todos os testes, que os resultados foram coerentes com esse valor esperado, e a variação dos dados de entrada resultavam em variações coerentes desse resultado. A Figura 24 mostra a análise do experimento de otimização do Optquest.

Concluiu-se, assim, que os resultados foram satisfatórios, e que a variação dos parâmetros de entrada resultava em alterações coerentes nos dados de saída do modelo.

ELSP 15 seq livre - array - R&Q únicos - setup matriz : Optimization

	Current	Best
Iterations completed:	312	268
Objective: ↑	60,008.416	60,178.126
Parameters	Copy best	
lb	1	1
q	10.08	10.08
cP	25	25
cA	0.004	0.004
R	218	218
Q	502	471
n	5	5
mC	5	5
mu	56	56
setUp	[[D@2eb377a6	[[D@2eb377a6

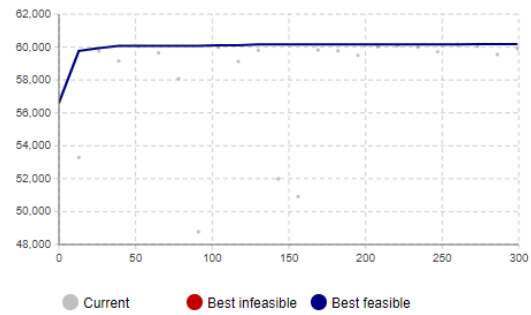


Figura 24: Experimento de otimização realizado no Anylogic, com a curva de evolução da função objetivo.

5. Delineamento dos experimentos

5.1. Instâncias de teste

Uma vez que o objetivo do trabalho é avaliar a solução do SELSP para diferentes condições de quantidade de itens, taxa de ocupação do sistema, coeficiente de variação da demanda e incremento de setup, foram desenvolvidas diferentes instâncias para testar diferentes valores para esses fatores.

Para cada fator, foram definidos três níveis, exceto para a estratégia de produção, para a qual foram considerados apenas dois níveis, totalizando assim 162 instâncias do problema:

- **Sequência de Produção (seq):** fixa ou variável;
- **Quantidade de itens (n):** 3, 5 e 10;
- **Coeficiente de variação da demanda (cv):** 5%, 10% e 25%;
- **Taxa de ocupação do sistema produtivo (ρ):** 70%, 80% e 90%;
- **Incremento de setup (α):** 0; 0,5 e 1.

Considerou-se, para todas as instâncias, que os produtos seriam homogêneos entre si. Isto é, os itens teriam os mesmos custos de armazenagem e setup, as mesmas taxas de demanda e produção, as mesmas margens de contribuição, e os mesmos parâmetros de controle de estoque (valores de s e S no cenário de produção fixo; valores de R e Q no cenário de produção variável). Essa simplificação foi estipulada para acelerar a convergência dos processos de simulação e otimização, assim como simplificar a análise e discussão dos resultados. Importante destacar que, ainda que os itens tenham sido considerados homogêneos no presente experimento, tanto o modelo de simulação quanto o experimento de otimização desenvolvidos aceitam valores heterogêneos para os produtos.

Para possibilitar a comparação dos resultados nas diferentes instâncias, optou-se por fixar o volume total de entrada de ordens, de modo que o potencial de faturamento médio para todos os cenários fosse o mesmo. A partir do volume de ordens estipulado, a taxa de produção dos itens foi calculada utilizando-se a Equação 2, que calcula a taxa de ocupação do sistema produtivo, de modo a se chegar nas taxas de ocupação desejadas.

$$\rho = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{p_i} \times t_i \times q_i \right) \quad (2)$$

Onde:

- **n** = número de itens;
- **p_i** = produtividade do item i, em peças produzidas por dia;
- **t_i** = taxa de chegada dos pedidos do item i, em quantidade média de pedidos por dia;
- **q_i** = tamanho médio dos pedidos do item i, em peças.

Ainda com o intuito de simplificar a análise, estipulou-se a taxa média de chegada dos pedidos em 1 pedido / dia. O tamanho médio do pedido, dessa forma, foi calculado para cada n desejado. A Tabela 01 apresenta as informações de entrada para cada cenário.

Tabela 01: Dados de entrada para cada cenário.

Número de itens (n)	Taxa de ocupação (ρ)	taxa de produção μ (unid/dia)	taxa de chegada dos pedidos (ped/dia)	tamanho médio do pedido q (unid/ped)
3	70%	72	1	16,80
3	80%	63	1	16,80
3	90%	56	1	16,80
3	70%	72	1	16,80
3	80%	63	1	16,80
3	90%	56	1	16,80
3	70%	72	1	16,80
3	80%	63	1	16,80
3	90%	56	1	16,80
5	70%	72	1	10,08
5	80%	63	1	10,08
5	90%	56	1	10,08
5	70%	72	1	10,08
5	80%	63	1	10,08
5	90%	56	1	10,08
5	70%	72	1	10,08
5	80%	63	1	10,08
5	90%	56	1	10,08
10	70%	72	1	5,04
10	80%	63	1	5,04
10	90%	56	1	5,04
10	70%	72	1	5,04
10	80%	63	1	5,04
10	90%	56	1	5,04
10	70%	72	1	5,04
10	80%	63	1	5,04
10	90%	56	1	5,04

Para analisar o efeito do setup em relação à sequência de produção, um fator de setup α – incremento de setup – foi estabelecido. O fator α é um fator aditivo, segundo o qual quanto mais se distancia de uma sequência estipulada como “ideal”, maior o tempo de setup. A sequência ideal foi definida a priori, com os produtos seguindo sua ordem numérica de identificação (1, 2, 3, ... n, voltando para o 1). Foram considerados três cenários: 1) setup homogêneo independente da sequência ($\alpha = 0$); 2) cenário com pouco impacto ao se distanciar da sequência ideal ($\alpha = 0,5$); 3) cenário com muito impacto ao se distanciar da sequência ideal ($\alpha = 1$).

Adicionalmente, em cenários onde há maior quantidade de produtos, naturalmente há uma maior quantidade de setups mínimos necessários para se produzir todos os itens. Dessa forma, para ser possível comparar os cenários com diferentes quantidades de itens, foi preciso definir que o custo e o tempo de setup possuem dimensões inversamente proporcionais à quantidade de produtos, sendo necessário dividir seus valores por “n” em cada instância.

A matriz apresentada na Tabela 02 exemplifica como se distanciar da sequência ideal impacta o tempo de setup, por meio do fator aditivo α , e como o tempo de setup é inversamente proporcional à quantidade de produtos n.

Tabela 02: Matriz de setup, exemplo para cinco itens.

		Próximo				
		1	2	3	4	5
Atual	1	0	1/5	$(1 + \alpha)/5$	$(1 + 2*\alpha)/5$	$(1 + 3*\alpha)/5$
	2	$(1 + \alpha)/5$	0	1/5	$(1 + \alpha)/5$	$(1 + 2*\alpha)/5$
	3	$(1 + 2*\alpha)/5$	$(1 + \alpha)/5$	0	1/5	$(1 + \alpha)/5$
	4	$(1 + 3*\alpha)/5$	$(1 + 2*\alpha)/5$	$(1 + \alpha)/5$	0	1/5
	5	1/5	$(1 + 3*\alpha)/5$	$(1 + 2*\alpha)/5$	$(1 + \alpha)/5$	0

Considerou-se ainda que os tempos de produção e de setup são determinísticos, e estipulou-se que a margem de contribuição para cada unidade faturada do material era de 5\$, que o custo de armazenagem era de 0,004\$ por unidade por dia (ou 20% do valor da margem de contribuição do material a cada 250 dias úteis), e que o custo de setup era de 25\$ – somente o tempo de setup varia conforme a sequência.

A Tabela 03 resume as 162 diferentes instâncias estabelecidas.

Tabela 03: Instâncias de simulação.

#	Sequência de produção (seq)	Número de itens (n)	Taxa de ocupação (ρ)	Coefficiente de variação da demanda (cv)	Fator de setup (α)
1	Fixa	3	70%	5%	0
2	Fixa	3	70%	10%	0
3	Fixa	3	70%	25%	0
4	Fixa	3	80%	5%	0
5	Fixa	3	80%	10%	0
6	Fixa	3	80%	25%	0
7	Fixa	3	90%	5%	0
8	Fixa	3	90%	10%	0
9	Fixa	3	90%	25%	0
10	Fixa	5	70%	5%	0
11	Fixa	5	70%	10%	0
12	Fixa	5	70%	25%	0
13	Fixa	5	80%	5%	0
14	Fixa	5	80%	10%	0
15	Fixa	5	80%	25%	0
16	Fixa	5	90%	5%	0
17	Fixa	5	90%	10%	0
18	Fixa	5	90%	25%	0
19	Fixa	10	70%	5%	0
20	Fixa	10	70%	10%	0
21	Fixa	10	70%	25%	0
22	Fixa	10	80%	5%	0
23	Fixa	10	80%	10%	0
24	Fixa	10	80%	25%	0
25	Fixa	10	90%	5%	0
26	Fixa	10	90%	10%	0
27	Fixa	10	90%	25%	0
28	Fixa	3	70%	5%	0,5
29	Fixa	3	70%	10%	0,5
30	Fixa	3	70%	25%	0,5
31	Fixa	3	80%	5%	0,5
32	Fixa	3	80%	10%	0,5
33	Fixa	3	80%	25%	0,5
34	Fixa	3	90%	5%	0,5
35	Fixa	3	90%	10%	0,5
36	Fixa	3	90%	25%	0,5
37	Fixa	5	70%	5%	0,5
38	Fixa	5	70%	10%	0,5
39	Fixa	5	70%	25%	0,5
40	Fixa	5	80%	5%	0,5
41	Fixa	5	80%	10%	0,5
42	Fixa	5	80%	25%	0,5
43	Fixa	5	90%	5%	0,5
44	Fixa	5	90%	10%	0,5
45	Fixa	5	90%	25%	0,5
46	Fixa	10	70%	5%	0,5
47	Fixa	10	70%	10%	0,5
48	Fixa	10	70%	25%	0,5
49	Fixa	10	80%	5%	0,5
50	Fixa	10	80%	10%	0,5
51	Fixa	10	80%	25%	0,5
52	Fixa	10	90%	5%	0,5
53	Fixa	10	90%	10%	0,5
54	Fixa	10	90%	25%	0,5

Tabela 03 (cont): Instâncias de simulação.

#	Sequência de produção (seq)	Número de itens (n)	Taxa de ocupação (ρ)	Coefficiente de variação da demanda (cv)	Fator de setup (α)
55	Fixa	3	70%	5%	1
56	Fixa	3	70%	10%	1
57	Fixa	3	70%	25%	1
58	Fixa	3	80%	5%	1
59	Fixa	3	80%	10%	1
60	Fixa	3	80%	25%	1
61	Fixa	3	90%	5%	1
62	Fixa	3	90%	10%	1
63	Fixa	3	90%	25%	1
64	Fixa	5	70%	5%	1
65	Fixa	5	70%	10%	1
66	Fixa	5	70%	25%	1
67	Fixa	5	80%	5%	1
68	Fixa	5	80%	10%	1
69	Fixa	5	80%	25%	1
70	Fixa	5	90%	5%	1
71	Fixa	5	90%	10%	1
72	Fixa	5	90%	25%	1
73	Fixa	10	70%	5%	1
74	Fixa	10	70%	10%	1
75	Fixa	10	70%	25%	1
76	Fixa	10	80%	5%	1
77	Fixa	10	80%	10%	1
78	Fixa	10	80%	25%	1
79	Fixa	10	90%	5%	1
80	Fixa	10	90%	10%	1
81	Fixa	10	90%	25%	1
82	Variável	3	70%	5%	0
83	Variável	3	70%	10%	0
84	Variável	3	70%	25%	0
85	Variável	3	80%	5%	0
86	Variável	3	80%	10%	0
87	Variável	3	80%	25%	0
88	Variável	3	90%	5%	0
89	Variável	3	90%	10%	0
90	Variável	3	90%	25%	0
91	Variável	5	70%	5%	0
92	Variável	5	70%	10%	0
93	Variável	5	70%	25%	0
94	Variável	5	80%	5%	0
95	Variável	5	80%	10%	0
96	Variável	5	80%	25%	0
97	Variável	5	90%	5%	0
98	Variável	5	90%	10%	0
99	Variável	5	90%	25%	0
100	Variável	10	70%	5%	0
101	Variável	10	70%	10%	0
102	Variável	10	70%	25%	0
103	Variável	10	80%	5%	0
104	Variável	10	80%	10%	0
105	Variável	10	80%	25%	0
106	Variável	10	90%	5%	0
107	Variável	10	90%	10%	0
108	Variável	10	90%	25%	0

Tabela 03 (cont): Instâncias de simulação.

#	Sequência de produção (seq)	Número de itens (n)	Taxa de ocupação (ρ)	Coefficiente de variação da demanda (cv)	Fator de setup (α)
109	Variável	3	70%	5%	0,5
110	Variável	3	70%	10%	0,5
111	Variável	3	70%	25%	0,5
112	Variável	3	80%	5%	0,5
113	Variável	3	80%	10%	0,5
114	Variável	3	80%	25%	0,5
115	Variável	3	90%	5%	0,5
116	Variável	3	90%	10%	0,5
117	Variável	3	90%	25%	0,5
118	Variável	5	70%	5%	0,5
119	Variável	5	70%	10%	0,5
120	Variável	5	70%	25%	0,5
121	Variável	5	80%	5%	0,5
122	Variável	5	80%	10%	0,5
123	Variável	5	80%	25%	0,5
124	Variável	5	90%	5%	0,5
125	Variável	5	90%	10%	0,5
126	Variável	5	90%	25%	0,5
127	Variável	10	70%	5%	0,5
128	Variável	10	70%	10%	0,5
129	Variável	10	70%	25%	0,5
130	Variável	10	80%	5%	0,5
131	Variável	10	80%	10%	0,5
132	Variável	10	80%	25%	0,5
133	Variável	10	90%	5%	0,5
134	Variável	10	90%	10%	0,5
135	Variável	10	90%	25%	0,5
136	Variável	3	70%	5%	0
137	Variável	3	70%	10%	0
138	Variável	3	70%	25%	0
139	Variável	3	80%	5%	0
140	Variável	3	80%	10%	0
141	Variável	3	80%	25%	0
142	Variável	3	90%	5%	0
143	Variável	3	90%	10%	0
144	Variável	3	90%	25%	0
145	Variável	5	70%	5%	0
146	Variável	5	70%	10%	0
147	Variável	5	70%	25%	0
148	Variável	5	80%	5%	0
149	Variável	5	80%	10%	0
150	Variável	5	80%	25%	0
151	Variável	5	90%	5%	0
152	Variável	5	90%	10%	0
153	Variável	5	90%	25%	0
154	Variável	10	70%	5%	0
155	Variável	10	70%	10%	0
156	Variável	10	70%	25%	0
157	Variável	10	80%	5%	0
158	Variável	10	80%	10%	0
159	Variável	10	80%	25%	0
160	Variável	10	90%	5%	0
161	Variável	10	90%	10%	0
162	Variável	10	90%	25%	0

Todos os cenários foram simulados para um horizonte de 250 dias, e cada cenário foi simulado com 10 repetições, para um total de 1.620 simulações.

Para garantir a convergência dos resultados por conta da limitação do número de iterações presente na versão gratuita do *software*, um primeiro experimento de otimização para 30% da amostra total foi feito considerando uma faixa bastante larga de valores para R e Q (sequência variável), s e S (sequência fixa): valor mínimo de zero e máximo de 2.000 para as quatro variáveis, mas com um passo maior, de valor 10. Após esse experimento de otimização, considerou-se o maior valor obtido para cada uma das variáveis em cada cenário, e uma margem de segurança de 20% sobre esse valor. Dessa forma, o experimento final de otimização foi feito para 100% das instâncias, considerando a faixa revisada de valores, variando de zero ao valor máximo calculado, com um passo de 1. A Tabela 04 apresenta os resultados obtidos desse primeiro teste de calibração, os valores Q_max, R_max, s_max e S_max foram os valores máximos obtidos da otimização, e os valores Q_teste, R_teste, s_teste e S_teste foram os valores utilizados no experimento final de otimização.

Tabela 04: Experimento de calibração para definir os valores para os testes finais de otimização.

n	Regra	Amostras	Q_max	R_max	Q_teste	R_teste
3	Var	81	620	430	744	516
5	Var	81	570	370	684	444
10	Var	81	840	1000	1008	1200
n	Regra	Amostras	s_max	S_max	s_teste	S_teste
3	Fixo	81	730	750	876	900
5	Fixo	81	390	450	468	540
10	Fixo	81	180	280	216	336

5.2. Saídas da simulação

As Tabelas 05 e 06 mostram, respectivamente, os resultados médios obtidos para cada um dos 81 cenários, utilizando a lógica de sequência de produção variável e lógica de sequência de produção fixa. A média do “Resultado”, e dos parâmetros de controle “Q” e “R” para a regra de sequência variável, e “s” e “S” para a regra de controle fixa, foram calculados a partir de uma média simples dos resultados das dez

repetições realizadas para cada cenário. Todos os 1.620 resultados se encontram no Anexo.

Tabela 05: Resultados para sequência variável.

α	ρ	cv	n = 3			n = 5			n = 10		
			Resultado	Q	R	Resultado	Q	R	Resultado	Q	R
0	0,7	0,05	\$61.216	380	123	\$60.761	316	59	\$59.551	230	22
0	0,7	0,1	\$61.118	390	153	\$60.673	323	82	\$59.741	234	35
0	0,7	0,25	\$61.056	366	212	\$60.610	321	108	\$59.674	233	46
0	0,8	0,05	\$61.167	393	141	\$60.712	301	70	\$59.512	233	26
0	0,8	0,1	\$61.064	377	175	\$60.626	295	95	\$59.698	234	40
0	0,8	0,25	\$60.987	351	237	\$60.550	301	120	\$59.612	228	55
0	0,9	0,05	\$61.035	508	256	\$60.652	308	101	\$59.473	234	33
0	0,9	0,1	\$60.926	507	327	\$60.566	314	133	\$59.655	229	47
0	0,9	0,25	\$60.750	524	387	\$60.448	322	170	\$59.550	233	64
0,5	0,7	0,05	\$61.212	388	127	\$60.763	313	59	\$59.463	242	33
0,5	0,7	0,1	\$61.114	389	140	\$60.664	320	83	\$59.641	247	46
0,5	0,7	0,25	\$61.033	380	225	\$60.578	328	120	\$59.554	244	61
0,5	0,8	0,05	\$61.165	394	145	\$60.711	299	70	\$59.413	263	52
0,5	0,8	0,1	\$61.063	378	180	\$60.609	298	100	\$59.540	286	63
0,5	0,8	0,25	\$60.973	386	273	\$60.497	330	141	\$59.421	280	78
0,5	0,9	0,05	\$61.035	508	269	\$60.650	306	99	\$58.201	503	106
0,5	0,9	0,1	\$60.921	505	328	\$60.529	317	111	\$58.236	514	123
0,5	0,9	0,25	\$60.553	568	353	\$60.162	434	227	\$58.160	468	328
1	0,7	0,05	\$61.212	393	127	\$60.761	316	61	\$59.318	302	50
1	0,7	0,1	\$61.110	389	142	\$60.659	324	82	\$59.369	332	66
1	0,7	0,25	\$61.004	384	249	\$60.523	341	141	\$59.257	333	86
1	0,8	0,05	\$61.167	396	146	\$60.712	297	70	\$58.619	443	90
1	0,8	0,1	\$61.048	389	163	\$60.599	308	89	\$58.699	450	142
1	0,8	0,25	\$60.831	497	323	\$60.309	426	177	\$58.422	462	220
1	0,9	0,05	\$61.035	508	269	\$60.652	307	95	\$55.841	826	160
1	0,9	0,1	\$60.922	506	315	\$60.518	320	106	\$55.882	773	303
1	0,9	0,25	\$60.531	534	310	\$59.907	507	218	\$56.190	607	557

Tabela 06: Resultados para sequência fixa.

α	ρ	cv	n = 3			n = 5			n = 10		
			Resultado	s	S	Resultado	s	S	Resultado	s	S
0	0,7	0,05	\$60.933	188	610	\$60.743	65	386	\$59.568	22	241
0	0,7	0,1	\$60.949	187	550	\$60.698	72	386	\$59.801	28	247
0	0,7	0,25	\$60.901	218	683	\$60.591	97	405	\$59.738	37	244
0	0,8	0,05	\$61.017	339	346	\$60.652	74	402	\$59.539	26	245
0	0,8	0,1	\$60.968	351	359	\$60.612	81	401	\$59.765	31	247
0	0,8	0,25	\$60.861	334	449	\$60.509	107	402	\$59.676	42	241
0	0,9	0,05	\$60.896	558	682	\$60.614	296	369	\$59.515	28	238
0	0,9	0,1	\$60.830	649	694	\$60.555	301	375	\$59.716	36	243
0	0,9	0,25	\$60.657	673	729	\$60.421	369	402	\$59.606	50	241
0,5	0,7	0,05	\$60.976	182	619	\$60.743	65	386	\$59.563	22	243
0,5	0,7	0,1	\$60.924	193	571	\$60.698	72	386	\$59.789	28	242
0,5	0,7	0,25	\$60.888	224	692	\$60.584	99	402	\$59.719	42	246
0,5	0,8	0,05	\$61.017	339	346	\$60.652	75	382	\$59.543	26	247
0,5	0,8	0,1	\$60.968	351	359	\$60.605	83	405	\$59.762	31	247
0,5	0,8	0,25	\$60.861	340	453	\$60.498	113	397	\$59.661	46	242
0,5	0,9	0,05	\$60.894	590	682	\$60.614	295	369	\$59.516	27	238
0,5	0,9	0,1	\$60.830	649	694	\$60.554	327	375	\$59.701	39	246
0,5	0,9	0,25	\$60.658	649	727	\$60.416	397	399	\$59.549	58	247
1	0,7	0,05	\$60.910	192	576	\$60.731	67	390	\$59.563	22	243
1	0,7	0,1	\$60.935	199	544	\$60.705	70	384	\$59.782	30	247
1	0,7	0,25	\$60.885	222	608	\$60.575	98	409	\$59.689	47	246
1	0,8	0,05	\$61.017	339	346	\$60.654	74	398	\$59.543	26	247
1	0,8	0,1	\$60.968	351	359	\$60.613	84	396	\$59.761	32	249
1	0,8	0,25	\$60.839	377	417	\$60.496	118	402	\$59.595	53	247
1	0,9	0,05	\$60.894	591	682	\$60.612	320	369	\$59.515	28	238
1	0,9	0,1	\$60.830	649	694	\$60.554	327	375	\$59.698	36	239
1	0,9	0,25	\$60.657	668	728	\$60.416	397	399	\$59.465	99	216

6. Resultados e discussão

6.1. Resultados dos experimentos

Para análise dos resultados, primeiramente foi feito um boxplot com todos os 1.620 resultados da simulação, separando as estratégias de produção com sequência fixa e variável (Figura 25). Nesse boxplot, é possível ver que as medianas e pontos máximos para ambas as estratégias se encontram muito próximos. No entanto, quando se considera a parte inferior das distribuições, a estratégia de produção variável possui uma dispersão maior dos resultados.

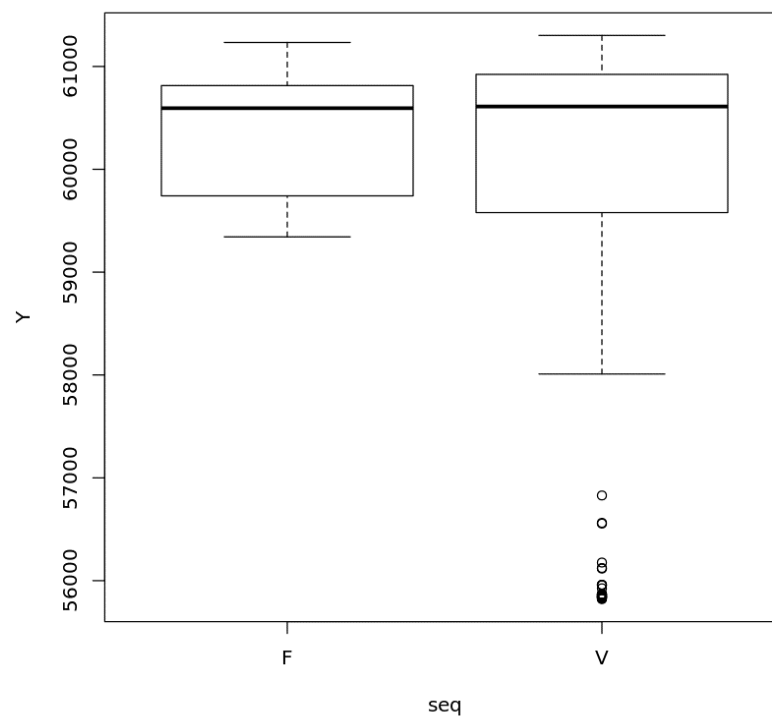


Figura 25: Boxplot dos resultados da otimização, comparando estratégia de produção de sequência fixa (F) com variável (V).

O boxplot é uma forma padronizada de apresentação de uma amostra a partir de cinco estatísticas: valor mínimo, primeiro quartil (Q_1), mediana, terceiro quartil (Q_3) e valor máximo. O boxplot representa também eventuais valores extremos, que são aqueles abaixo do limite inferior (LI) e limite superior (LS), calculados conforme equações 3 e 4 respectivamente.

$$LI = Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (3)$$

$$LS = Q_3 + 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (4)$$

Analisando-se no detalhe, é possível verificar a existência de 30 outliers no caso da sequência variável, todos abaixo do LI, sendo esses os resultados obtidos nas simulações que tiveram os valores $n = 10$, $\alpha = 1$ e $\rho = 0,9$. Ainda comparando os boxplots, verifica-se que o ponto inferior do boxplot à esquerda (sequência fixa) está muito acima do ponto inferior do boxplot à direita (sequência variável).

A seguir, foi feito um segundo boxplot dos resultados, considerando os cenários de sequência variável e sequência fixa para $n = 3, 5$ e 10 , conforme Figura 26. A partir dessa figura, verifica-se que os resultados dependem muito do valor de n , tanto na sequência fixa quanto na sequência variável – quanto maior o número de produtos, pior é o resultado.

A análise da dispersão dos resultados indica ainda que a sequência variável tem dispersão maior e mais pontos extremos, em especial para $n = 10$. Essa dispersão é sempre para o lado inferior do box-plot, o que significa que essas instâncias tiveram mais falta de produto (“*stockout*”), limitando o faturamento.

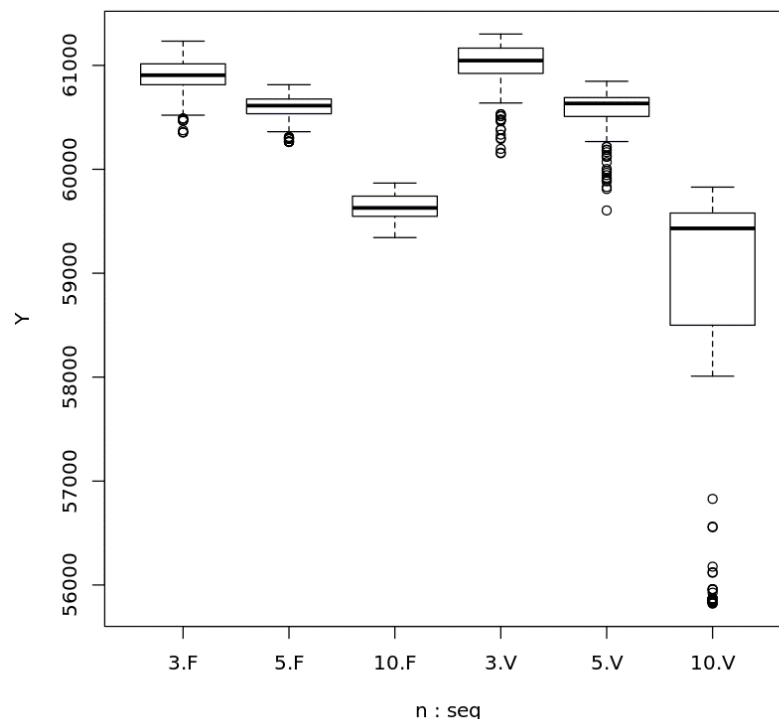


Figura 26: Boxplot dos resultados da otimização, comparando estratégia de produção de sequência variável (V) com sequência fixa (F), e abertura para valores de $n = 3, 5$ e 10 .

Para analisar esse efeito, foi elaborado um terceiro boxplot, focando somente nos resultados da sequência de produção variável, com a abertura para os valores de $n = 3, 5$ e 10 , e para as diferentes taxas de ocupação do sistema $\rho = 70\%, 80\%$ e 90% . Esse boxplot pode ser visto na Figura 27.

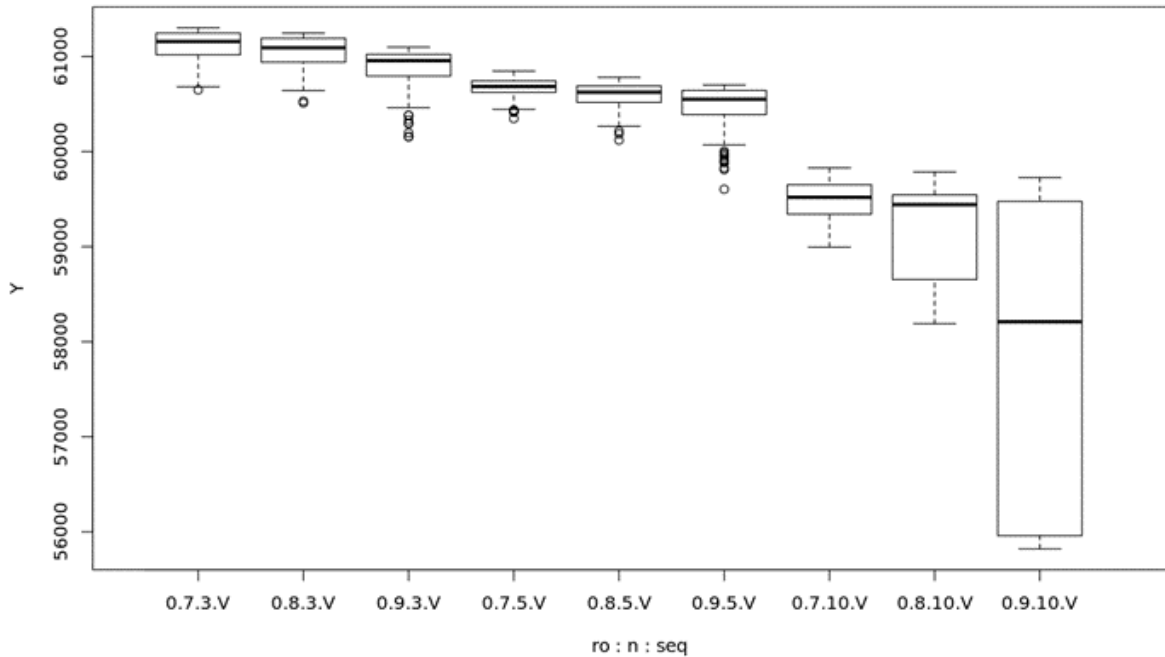


Figura 27: Boxplot dos resultados da otimização da sequência de produção variável (V), e abertura para valores de $n = 3, 5$ e 10 e $\rho = 0,7; 0,8$ e $0,9$.

Com esse boxplot, vemos novamente que a maior dispersão se observa nos grupos com $n = 10$, em particular no último em que $\rho = 0,9$, sendo muito menor nos demais grupos. Analisando em conjunto com a Tabela 05, fica claro que a concentração dos resultados mais baixos está no cenário de capacidade mais restrita – onde $n = 10$, $\rho = 0,9$ e $\alpha = 1,0$, onde já haviam sido identificados todos os outliers da Figura 25.

Esse resultado é bastante lógico quando se considera a característica da matriz de setup adotada – onde um fator aditivo é acrescentado ao tempo de setup quanto mais se distancia da sequência tida como ideal. Em um cenário de sequência flexível, onde a chegada das ordens de venda é responsável por definir a sequência de produção, quanto maior o número de itens, maior a probabilidade de que a produção siga uma sequência distante da “ótima”. Em um cenário onde a capacidade produtiva é mais restrita, esses setups mais longos e frequentes causam

gargalos significativos, impossibilitando o atendimento de todas as ordens de venda, resultando em *stockout* e impactando o resultado.

Destaca-se que um resultado igual não é observado para a estratégia de sequência fixa (Figura 28). Ainda que o aumento da quantidade de produtos resulte em uma menor margem total de contribuição, a dispersão dos resultados para o cenário mais restritivo é muito menor que na estratégia de sequência variável.

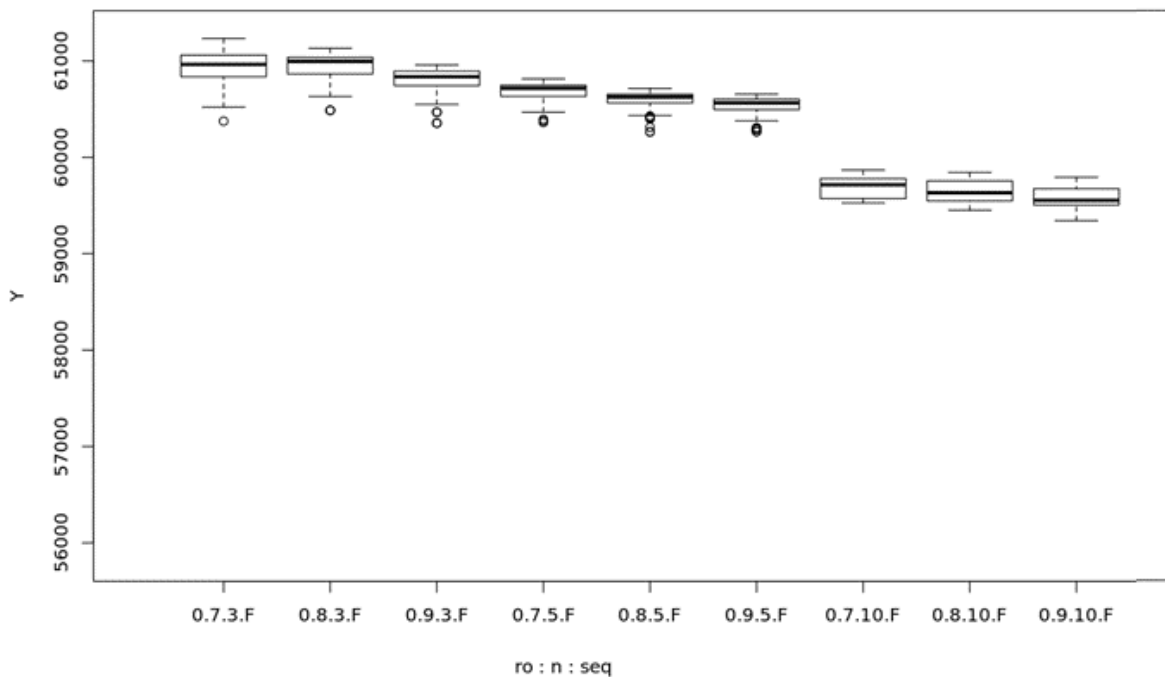


Figura 28: Boxplot dos resultados da otimização da sequência de produção fixa (F), e abertura para valores de $n = 3, 5$ e 10 e $\rho = 0,7; 0,8$ e $0,9$.

6.2. Análise de Variância

Para avaliar se os diferentes fatores do problema influenciam o resultado da margem total de contribuição, aplicou-se a técnica da análise de variância (*Analysis of Variance* - ANOVA) sobre o conjunto de resultados dos experimentos. A análise de variância é uma técnica que compara as médias de diferentes tratamentos, e avalia se os fatores exercem influência sobre a variável dependente ou variável de resposta.

A análise de variância foi realizada, utilizando a linguagem R e o resultado pode ser visto na Tabela 07. A análise foi feita considerando todos os fatores – sequência (fixa ou variável), n , ρ , α e cv – e todas as combinações de fatores.

Tabela 07: Análise de variância de todos os fatores.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)			
seq	1	20168913	20168913	1700.548	< 2e-16	***		
n	2	852661078	426330539	35946.183	< 2e-16	***		
ro	2	49757887	24878943	2097.675	< 2e-16	***		
alfa	2	26755428	13377714	1127.946	< 2e-16	***		
cv	2	6150855	3075427	259.306	< 2e-16	***		
seq:n	2	60855883	30427942	2565.541	< 2e-16	***		
seq:ro	2	24201290	12100645	1020.269	< 2e-16	***		
n:ro	4	30422978	7605744	641.281	< 2e-16	***		
seq:alfa	2	24085825	12042912	1015.402	< 2e-16	***		
n:alfa	4	40170446	10042611	846.746	< 2e-16	***		
ro:alfa	4	16854794	4213699	355.279	< 2e-16	***		
seq:cv	2	784617	392308	33.078	8.93e-15	***		
n:cv	4	6014724	1503681	126.783	< 2e-16	***		
ro:cv	4	883578	220894	18.625	6.08e-15	***		
alfa:cv	4	485492	121373	10.234	3.58e-08	***		
seq:n:ro	4	34008487	8502122	716.859	< 2e-16	***		
seq:n:alfa	4	37468136	9367034	789.784	< 2e-16	***		
seq:ro:alfa	4	16638977	4159744	350.730	< 2e-16	***		
n:ro:alfa	8	28813242	3601655	303.675	< 2e-16	***		
seq:n:cv	4	260826	65206	5.498	0.000215	***		
seq:ro:cv	4	23473	5868	0.495	0.739591			
n:ro:cv	8	602796	75349	6.353	3.98e-08	***		
seq:alfa:cv	4	204816	51204	4.317	0.001784	**		
n:alfa:cv	8	154131	19266	1.624	0.113073			
ro:alfa:cv	8	161215	20152	1.699	0.094046	.		
seq:n:ro:alfa	8	27368474	3421059	288.448	< 2e-16	***		
seq:n:ro:cv	8	739022	92378	7.789	2.78e-10	***		
seq:n:alfa:cv	8	345400	43175	3.640	0.000331	***		
seq:ro:alfa:cv	8	140083	17510	1.476	0.160930			
n:ro:alfa:cv	16	434360	27147	2.289	0.002592	**		
seq:n:ro:alfa:cv	16	607831	37989	3.203	1.83e-05	***		
Residuals	1458	17292237	11860					

Signif. codes:	0	'***'	0.001	'**'	0.01	'*' 0.05	'.' 0.1	' ' 1

A partir da análise de variância, avalia-se o valor de F, que representa o quanto os valores esperados de cada grupo distinto (no caso, os grupos formados pelos resultados dos cenários simulados com os diferentes fatores) se diferenciam entre si. F é calculado pela razão entre a “variância explicada”, ou a variância calculada entre a média total da amostra completa e as médias de cada grupo, e a “variância inexplicada”, ou a somatória das variâncias calculadas para cada agrupamento individual. Para a ANOVA, testa-se a hipótese nula que, se verdadeira, indica que as observações podem ser explicadas por uma média global μ acrescido de um componente de variação aleatório ϵ , ou seja, a variação da amostra pode ser explicada por uma distribuição normal sem efeito dos fatores testados (Montgomery & Runger, 2009).

No caso dos resultados obtidos na Tabela 07, verifica-se que a hipótese nula é rejeitada para todos os fatores estudados a níveis bastante significativos. A coluna “Pr(>F)” indica a probabilidade de se obter um F maior do que o calculado, considerando-se somente a aleatoriedade da distribuição normal, e verifica-se que os resultados são bastante baixos. O nível de significância para todos os fatores é bastante elevado.

Verifica-se, dessa forma, que todos os fatores estudados possuem influência significativa sobre o resultado da variável dependente. O maior valor de F é observado para o número de produtos n – o que é compatível com as distribuições vistas nas Tabelas de resultado 05 e 06, bem como nos boxplots. Em seguida, o segundo maior valor de F é observado na combinação de n com a estratégia de produção (seq), o que também é condizente com o observado no boxplot da Figura 26. Na sequência, os fatores de F mais elevado são a taxa de ocupação ρ , a estratégia de produção, e o incremento de setup α . Dentre os fatores individuais, sem considerar as interações, percebe-se que o coeficiente de variação da demanda cv possui um valor de F bem inferior aos demais – ainda que seja significativo. Esse fenômeno pode ser observado, por exemplo, na Figura 29, onde se destaca que os conjuntos de resultados para os diferentes valores de cv apresentam boxplots bastante semelhantes, mas com uma quantidade muito mais significativa de valores baixos – decorrentes de *stockout* – nos cenários de cv mais alto.

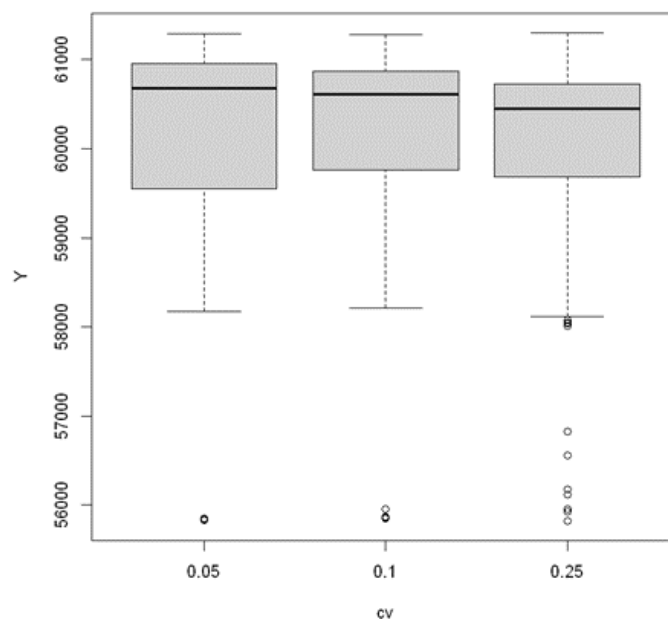


Figura 29: Boxplot dos resultados da otimização abertos pelo valor de cv .

6.3. Teste de normalidade

Para seguir com os testes estatísticos, é importante validar a premissa de que os resíduos dos resultados são independentes e seguem uma distribuição normal.

Para se fazer essa validação, foi realizado um teste de normalidade de Shapiro-Wilk. O teste de Shapiro-Wilk para testar a normalidade foi originalmente desenvolvido em 1965, e possuía uma restrição de amostra com no máximo 50 elementos, por conta de sua tabela de valores críticos. O teste foi posteriormente modificado por Royston em 1982 e, novamente, aprimorado em 1985, passando a ser possível testar valores de tamanho de amostra entre 3 e 5.000. O teste de normalidade expandido de Shapiro-Wilk foi comparado com outros três testes (Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors e Anderson-Darling) por Razali e Wah (2011), concluindo-se que o teste de Shapiro-Wilk foi o mais forte para todos os tamanhos de amostra e distribuições, sendo particularmente efetivo para tamanhos maiores de amostra.

Para se calcular os resíduos, uma vez que os valores dos resultados para a estratégia de produção variável apresentaram uma alta dependência do valor de n , foi considerada uma regressão linear para se definir os valores esperados de “Resultado” para cada valor de n . A reta obtida pode ser vista na Figura 30.

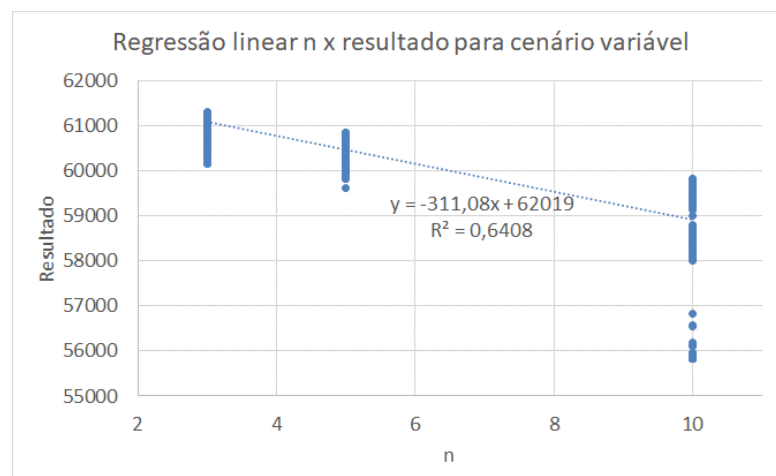


Figura 30: Regressão linear entre o resultado da simulação e o valor de n para o cenário de sequência variável.

O teste de normalidade foi feito por meio da ferramenta desenvolvida em R disponibilizada no website Statistics Kingdom (2021). Os resultados obtidos para o cenário variável podem ser vistos na Figura 31.

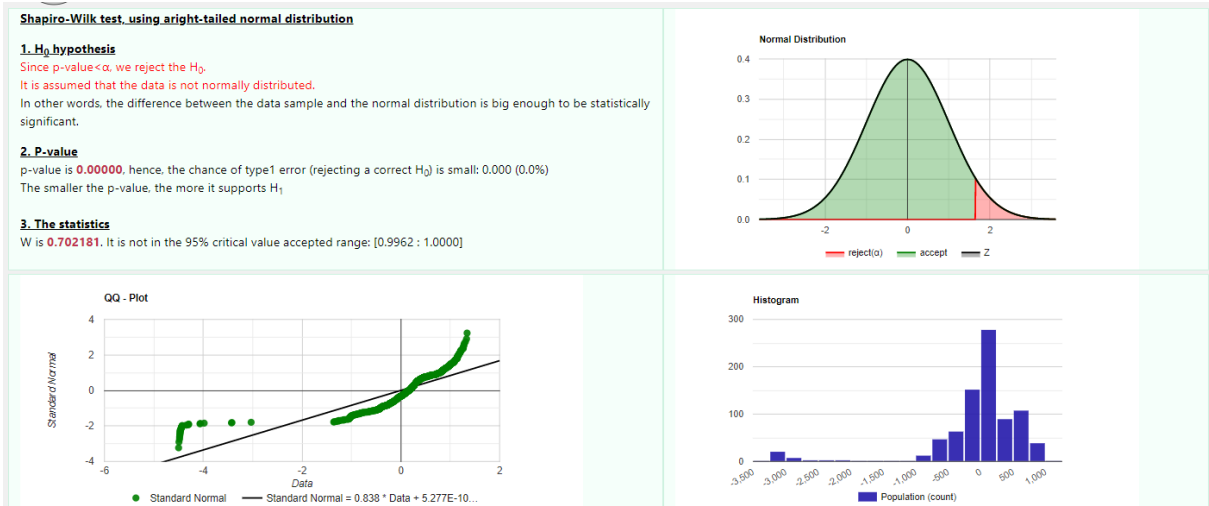


Figura 31: Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o cenário variável.

O teste de normalidade rejeita H_0 , de modo que não seria possível definir que os resultados estão distribuídos normalmente. Tanto no gráfico QQ quanto no histograma, é possível verificar o efeito dos outliers discutidos anteriormente, quando $n = 10$, $\rho = 0,9$ e $\alpha = 1,0$. Assim, um novo teste de normalidade foi conduzido, excluindo-se esses outliers. O resultado pode ser visto na Figura 32.

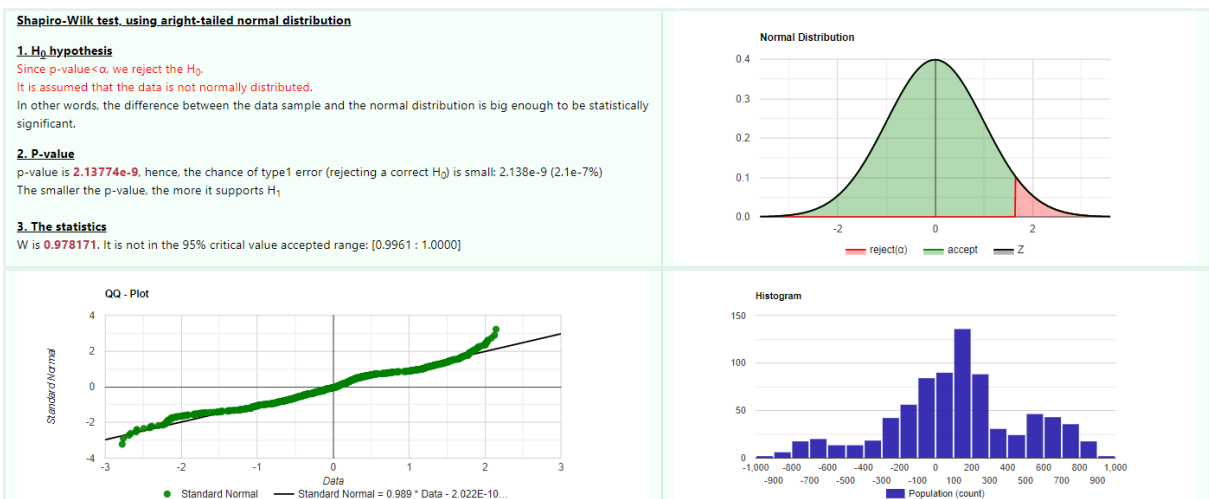


Figura 32: Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o cenário variável, excluindo-se os outliers.

Ainda assim, o teste de normalidade rejeita H_0 , de modo que não seria possível definir que os resultados estão distribuídos normalmente. Dessa vez, no

entanto, o resultado de W foi muito superior ($W = 0,978$ contra $0,702$ com outliers) e tanto o gráfico Q-Q quanto o histograma se assemelham de uma distribuição normal.

Para o caso do cenário de sequência de produção fixa, também se aplicou uma regressão linear para se calcular os resíduos, uma vez que os valores dos resultados para o cenário variável também apresentam alta dependência do valor de n . A reta obtida pode ser vista na Figura 33.

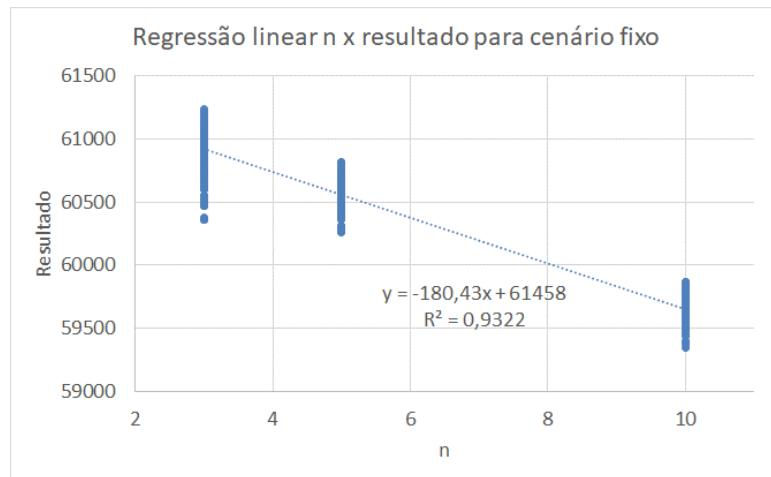


Figura 33: Regressão linear entre o resultado da simulação e o valor de n para o cenário de sequência fixa.

Novamente, o teste de normalidade foi feito por meio da ferramenta desenvolvida em R disponibilizada no website Statistics Kingdom (2021). Os resultados obtidos para o cenário variável podem ser vistos na Figura 34.

Assim como no caso da sequência de produção variável, o teste de normalidade rejeita H_0 , de modo que não seria possível definir que os resultados estão distribuídos normalmente. Assim como no caso da sequência variável sem outliers, o valor de W ($0,966$ contra um valor crítico de $0,996$) se manteve próximo do fator crítico, e o gráfico Q-Q se assemelha ao esperado de uma normal.

Para a ANOVA, realizada na sessão 6.2 deste trabalho, idealmente se deseja que a amostra atenda um requisito de normalidade, ou que ao menos se apresente próxima de uma normal, para não afetar a confiabilidade dos resultados em caso contrário. A distribuição dos resultados sendo estudada no presente trabalho está sujeita a fatores que afetam a distribuição dos resíduos – existência de outliers e diversos fatores que se relacionam e potencialmente fazem o teste rejeitar a

hipótese de normalidade. Ainda assim, dado que para ambos os testes as amostras apresentaram resultados próximos de uma normal após a exclusão dos outliers, podemos seguir com as conclusões obtidas na sessão 6.2.

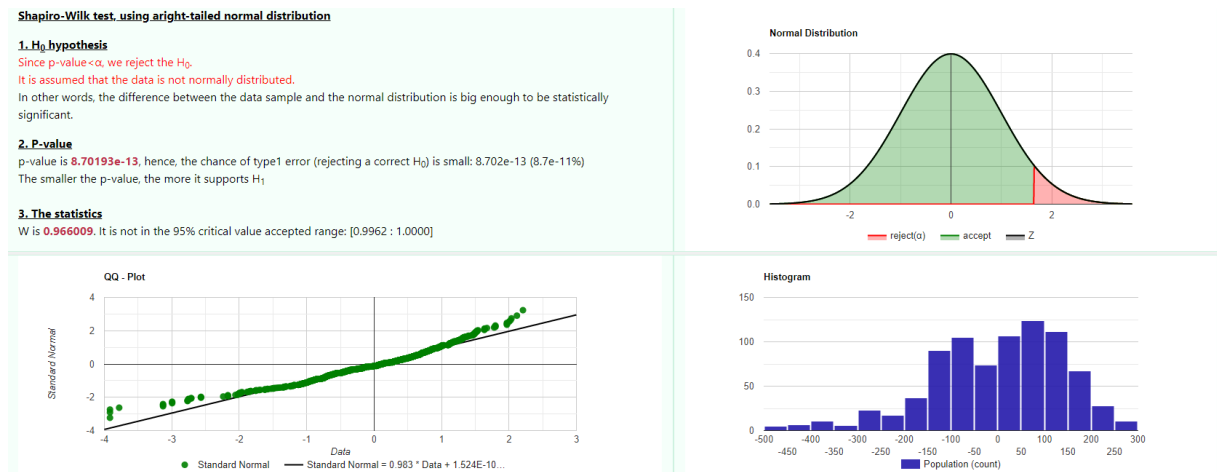


Figura 34: Resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o cenário de sequência fixa.

6.4. Comparação entre as estratégias

Para se comparar as duas estratégias de gestão de estoque, foi realizado um teste T considerando os resultados para cada instância. Assim como para a ANOVA, para o teste T idealmente se deseja que a normalidade dos grupos de amostra seja obtida pois, caso contrário, não há garantia da centralidade das médias dos grupos sendo comparados. No entanto, o teste T é considerado um teste estatístico relativamente robusto contra normalidade, desde que as amostras estejam suficientemente próximas de uma distribuição normal e que tenham um tamanho adequado. Considerando os resultados obtidos na sessão 6.3., optou-se por assumir que o teste poderia ser realizado para os conjuntos de amostras e que os resultados poderiam ser interpretados tendo em mente essa restrição.

Assim, para cada uma das 81 combinações, calculou-se a média e desvio padrão das 10 repetições para as duas diferentes estratégias, e aplicou-se o teste T bicaudal. O resultado pode ser visto na Tabela 08.

Tabela 08: Resultado do teste T para todas as instâncias comparando as estratégias.

n	α	ρ	cv	Média - V	Desv Pad - V	Média - F	Desv Pad - F	t	Resultado
3	0	0,7	0,05	\$61.216	66,43	\$60.933	195,21	4,334	V maior, com 1% de signif.
3	0	0,7	0,1	\$61.118	115,18	\$60.949	172,42	2,573	V maior, com 5% de signif.
3	0	0,7	0,25	\$61.056	196,58	\$60.901	225,50	1,637	Sem diferença significativa
3	0	0,8	0,05	\$61.167	64,06	\$61.017	31,98	6,617	V maior, com 1% de signif.
3	0	0,8	0,1	\$61.064	110,81	\$60.968	75,52	2,265	V maior, com 5% de signif.
3	0	0,8	0,25	\$60.987	196,28	\$60.861	212,61	1,369	Sem diferença significativa
3	0	0,9	0,05	\$61.035	47,95	\$60.896	39,71	7,054	V maior, com 1% de signif.
3	0	0,9	0,1	\$60.926	97,06	\$60.830	63,60	2,622	V maior, com 5% de signif.
3	0	0,9	0,25	\$60.750	179,16	\$60.657	164,94	1,203	Sem diferença significativa
3	0,5	0,7	0,05	\$61.212	64,77	\$60.976	187,40	3,772	V maior, com 1% de signif.
3	0,5	0,7	0,1	\$61.114	118,50	\$60.924	197,95	2,594	V maior, com 5% de signif.
3	0,5	0,7	0,25	\$61.033	198,85	\$60.888	206,06	1,602	Sem diferença significativa
3	0,5	0,8	0,05	\$61.165	65,20	\$61.017	31,98	6,447	V maior, com 1% de signif.
3	0,5	0,8	0,1	\$61.063	113,30	\$60.968	75,52	2,211	V maior, com 5% de signif.
3	0,5	0,8	0,25	\$60.973	186,83	\$60.861	212,59	1,254	Sem diferença significativa
3	0,5	0,9	0,05	\$61.035	47,95	\$60.894	39,89	7,179	V maior, com 1% de signif.
3	0,5	0,9	0,1	\$60.921	101,38	\$60.830	63,60	2,415	V maior, com 5% de signif.
3	0,5	0,9	0,25	\$60.553	259,42	\$60.658	164,09	-1,074	Sem diferença significativa
3	1	0,7	0,05	\$61.212	64,29	\$60.910	215,30	4,245	V maior, com 1% de signif.
3	1	0,7	0,1	\$61.110	121,69	\$60.935	186,71	2,482	V maior, com 5% de signif.
3	1	0,7	0,25	\$61.004	201,83	\$60.885	265,52	1,125	Sem diferença significativa
3	1	0,8	0,05	\$61.167	65,53	\$61.017	31,98	6,499	V maior, com 1% de signif.
3	1	0,8	0,1	\$61.048	122,69	\$60.968	75,52	1,755	Sem diferença significativa
3	1	0,8	0,25	\$60.831	204,39	\$60.839	203,01	-0,093	Sem diferença significativa
3	1	0,9	0,05	\$61.035	47,95	\$60.894	39,89	7,179	V maior, com 1% de signif.
3	1	0,9	0,1	\$60.922	101,16	\$60.830	63,60	2,447	V maior, com 5% de signif.
3	1	0,9	0,25	\$60.531	290,74	\$60.657	164,87	-1,193	Sem diferença significativa
5	0	0,7	0,05	\$60.761	45,70	\$60.743	46,82	0,884	Sem diferença significativa
5	0	0,7	0,1	\$60.673	43,69	\$60.698	65,61	-1,029	Sem diferença significativa
5	0	0,7	0,25	\$60.610	128,62	\$60.591	122,61	0,330	Sem diferença significativa
5	0	0,8	0,05	\$60.712	39,55	\$60.652	36,75	3,491	V maior, com 1% de signif.
5	0	0,8	0,1	\$60.626	45,33	\$60.612	56,83	0,601	Sem diferença significativa
5	0	0,8	0,25	\$60.550	134,58	\$60.509	132,10	0,697	Sem diferença significativa
5	0	0,9	0,05	\$60.652	31,04	\$60.614	31,23	2,739	V maior, com 5% de signif.
5	0	0,9	0,1	\$60.566	43,59	\$60.555	45,06	0,586	Sem diferença significativa
5	0	0,9	0,25	\$60.448	108,73	\$60.421	110,84	0,550	Sem diferença significativa
5	0,5	0,7	0,05	\$60.763	45,77	\$60.743	46,82	0,945	Sem diferença significativa
5	0,5	0,7	0,1	\$60.664	52,33	\$60.698	65,61	-1,288	Sem diferença significativa
5	0,5	0,7	0,25	\$60.578	130,16	\$60.584	130,64	-0,097	Sem diferença significativa
5	0,5	0,8	0,05	\$60.711	39,94	\$60.652	31,87	3,655	V maior, com 1% de signif.
5	0,5	0,8	0,1	\$60.609	56,11	\$60.605	52,31	0,172	Sem diferença significativa
5	0,5	0,8	0,25	\$60.497	133,09	\$60.498	120,92	-0,024	Sem diferença significativa
5	0,5	0,9	0,05	\$60.650	26,55	\$60.614	31,30	2,799	V maior, com 5% de signif.
5	0,5	0,9	0,1	\$60.529	58,07	\$60.554	46,22	-1,061	Sem diferença significativa
5	0,5	0,9	0,25	\$60.162	163,34	\$60.416	104,88	-4,131	F maior, com 1% de signif.
5	1	0,7	0,05	\$60.761	46,29	\$60.731	47,71	1,419	Sem diferença significativa
5	1	0,7	0,1	\$60.659	61,72	\$60.705	50,08	-1,848	Sem diferença significativa
5	1	0,7	0,25	\$60.523	125,82	\$60.575	123,40	-0,933	Sem diferença significativa
5	1	0,8	0,05	\$60.712	40,95	\$60.654	32,01	3,547	V maior, com 1% de signif.
5	1	0,8	0,1	\$60.599	67,97	\$60.613	54,51	-0,538	Sem diferença significativa
5	1	0,8	0,25	\$60.309	121,97	\$60.496	116,09	-3,525	F maior, com 1% de signif.
5	1	0,9	0,05	\$60.652	28,56	\$60.612	30,33	3,060	V maior, com 1% de signif.
5	1	0,9	0,1	\$60.518	55,86	\$60.554	46,22	-1,580	Sem diferença significativa
5	1	0,9	0,25	\$59.907	151,19	\$60.416	104,88	-8,738	F maior, com 1% de signif.

Tabela 08 (cont): Resultado do teste T para todas as instâncias comparando as estratégias.

n	α	ρ	cv	Média - V	Desv Pad - V	Média - F	Desv Pad - F	t	Resultado
10	0	0,7	0,05	\$59.551	22,31	\$59.568	15,36	-1,889	Sem diferença significativa
10	0	0,7	0,1	\$59.741	57,42	\$59.801	43,22	-2,650	F maior, com 5% de signif.
10	0	0,7	0,25	\$59.674	95,51	\$59.738	88,59	-1,566	Sem diferença significativa
10	0	0,8	0,05	\$59.512	21,82	\$59.539	21,79	-2,759	F maior, com 5% de signif.
10	0	0,8	0,1	\$59.698	61,74	\$59.765	45,61	-2,748	F maior, com 5% de signif.
10	0	0,8	0,25	\$59.612	105,75	\$59.676	85,66	-1,474	Sem diferença significativa
10	0	0,9	0,05	\$59.473	20,19	\$59.515	18,03	-4,997	F maior, com 1% de signif.
10	0	0,9	0,1	\$59.655	56,00	\$59.716	51,53	-2,556	F maior, com 5% de signif.
10	0	0,9	0,25	\$59.550	100,78	\$59.606	94,39	-1,279	Sem diferença significativa
10	0,5	0,7	0,05	\$59.463	19,90	\$59.563	17,11	-12,056	F maior, com 1% de signif.
10	0,5	0,7	0,1	\$59.641	54,60	\$59.789	46,04	-6,548	F maior, com 1% de signif.
10	0,5	0,7	0,25	\$59.554	101,18	\$59.719	87,97	-3,893	F maior, com 1% de signif.
10	0,5	0,8	0,05	\$59.413	22,09	\$59.543	16,93	-14,817	F maior, com 1% de signif.
10	0,5	0,8	0,1	\$59.540	58,15	\$59.762	45,95	-9,478	F maior, com 1% de signif.
10	0,5	0,8	0,25	\$59.421	99,11	\$59.661	88,32	-5,700	F maior, com 1% de signif.
10	0,5	0,9	0,05	\$58.201	11,78	\$59.516	17,48	-197,320	F maior, com 1% de signif.
10	0,5	0,9	0,1	\$58.236	22,97	\$59.701	58,10	-74,155	F maior, com 1% de signif.
10	0,5	0,9	0,25	\$58.160	122,36	\$59.549	87,91	-29,157	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,7	0,05	\$59.318	22,32	\$59.563	17,49	-27,272	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,7	0,1	\$59.369	95,66	\$59.782	50,40	-12,073	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,7	0,25	\$59.257	133,65	\$59.689	89,89	-8,484	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,8	0,05	\$58.619	16,72	\$59.543	16,48	-124,455	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,8	0,1	\$58.699	47,38	\$59.761	47,63	-49,984	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,8	0,25	\$58.422	128,54	\$59.595	102,32	-22,579	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,9	0,05	\$55.841	4,93	\$59.515	17,79	-629,269	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,9	0,1	\$55.882	40,16	\$59.698	54,47	-178,290	F maior, com 1% de signif.
10	1	0,9	0,25	\$56.190	346,55	\$59.465	97,26	-28,771	F maior, com 1% de signif.

A coluna “Resultado” da Tabela 08 indica o resultado com o grau de significância do teste T aplicado. Quando o resultado é “V maior, com 1% de signif.”, isso indica que, para essa instância, a sequência variável apresentou um resultado superior à sequência fixa, com um grau de significância de 1%. Quando o resultado é “V maior, com 5% de signif.”, isso indica um resultado superior para sequência variável com significância de 5%, e analogamente para os resultados onde a sequência flexível (F) é superior.

Para simplificar a interpretação dos resultados, agrupou-se os resultados de cada instância nos diferentes valores testados para n, α , ρ e cv, comparando-se quantas vezes cada estratégia apresentou resultados superiores.

O resultado para comparação dos diferentes valores de n pode ser visto na Tabela 09. Com base nesse agrupamento, verifica-se que para n = 3, a sequência variável apresentou o melhor resultado em 17 das 27 instâncias. Destaca-se que, para os 10 casos com n = 3 onde não se teve diferença significativa entre as estratégias, 9 foram as instâncias onde cv = 0,25, um impacto esperado quando se restringe a sequência produtiva. Já nos casos em que n = 10, para 23 dos 27 casos

verificou-se que a sequência fixa apresentou o melhor resultado. Esse resultado já era esperado, com as análises dos boxplots realizada na sessão 6.1. Destaca-se aqui que, para os 4 casos em que não se observou diferença significativa, todos são instâncias de $\alpha = 0$, mostrando que o impacto combinado de um α elevado com uma grande quantidade de itens é muito impactante na qualidade da sequência fixa.

Tabela 09: Agrupamento dos resultados do teste T conforme n.

Teste para n	3	5	10
V maior, com 1% de signif.	9	4	0
V maior, com 5% de signif.	8	2	0
Sem diferença significativa	10	18	4
F maior, com 5% de signif.	0	0	4
F maior, com 1% de signif.	0	3	19

O agrupamento dos resultados para os diferentes valores de ρ , α e cv podem ser vistos respectivamente nas Tabelas 10, 11 e 12. Para esses quatro agrupamentos, percebe-se de forma clara como o fator n possui uma interferência significativa e direta sobre os resultados dos demais fatores, e como a combinação dos valores é responsável pela superioridade da estratégia variável ou fixa com diferentes graus de significância.

Tabela 10: Agrupamento dos resultados do teste T conforme ρ .

Teste para ρ	0,7	0,8	0,9
V maior, com 1% de signif.	3	6	4
V maior, com 5% de signif.	3	2	5
Sem diferença significativa	14	10	8
F maior, com 5% de signif.	1	2	1
F maior, com 1% de signif.	6	7	9

Tabela 11: Agrupamento dos resultados do teste T conforme α .

Teste para α	0	0,5	1
V maior, com 1% de signif.	4	4	5
V maior, com 5% de signif.	4	4	2
Sem diferença significativa	14	9	9
F maior, com 5% de signif.	4	0	0
F maior, com 1% de signif.	1	10	11

Tabela 12: Agrupamento dos resultados do teste T conforme cv.

Teste para cv	0,05	0,1	0,25
V maior, com 1% de signif.	13	0	0
V maior, com 5% de signif.	2	8	0
Sem diferença significativa	4	10	18
F maior, com 5% de signif.	1	3	0
F maior, com 1% de signif.	7	6	9

Dessa forma, os resultados do teste T indicam que, para o cenário com 3 itens, há uma diferença significativa entre as médias das duas estratégias, de modo que a sequência variável apresenta um resultado melhor. Já no cenário de 5 itens, não foi identificada uma diferença estatisticamente significativa entre as duas estratégias. Por fim, no cenário de 10 itens, verificou-se uma diferença significativa, de modo que a estratégia de sequência fixa apresentou um resultado melhor.

Uma maior quantidade de itens sendo produzidos tendem a indicar um sistema com maior restrição de sua capacidade de produção, já que isso geralmente incorre em um maior número de setups – principalmente no caso de um alto valor de α , como verificado anteriormente. Dessa forma, é possível interpretar que os cenários com menor valor de n (menor diversidade) geralmente geram cenários com menor restrição do sistema, enquanto os cenários com maior valor de n (maior diversidade) geram resultados com maior restrição. Destaca-se que os experimentos foram planejados para que os resultados obtidos nos diferentes cenários fossem potencialmente equivalentes, permitindo tal comparação. Nesse contexto, os resultados obtidos – onde para um sistema de menor restrição, a sequência flexível gera melhores resultados enquanto para um sistema de alta restrição, a sequência fixa gera melhores resultados – estão alinhados com os obtidos por Vaughan (2007).

No entanto, é importante destacar nesses resultados o *trade-off* entre a significância estatística obtida pelos resultados e a significância prática de uma implementação dessas estratégias em um cenário produtivo real. Com base nos resultados analisados, verificou-se que uma grande diferença nos resultados é observada em cenários específicos de grande quantidade de itens, e um setup muito dependente da sequência de produção. Nesse contexto, é importante entender a relevância de outros fatores que são observados na realidade de um cenário produtivo, para entender a real relevância desses ganhos estatísticos observados.

7. Conclusão

No presente trabalho, considerou-se o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção de múltiplos produtos em máquina única, com restrição de capacidade e demanda estocástica, denominado SELSP. O objetivo da pesquisa foi resolver o SELSP utilizando o método de simulação e otimização, considerando duas estratégias de produção distintas – sequência de produção fixa e sequência de produção variável – variando-se alguns parâmetros do sistema.

Foi desenvolvido um modelo de simulação e otimização no *software* Anylogic com o complemento OptQuest, que permite a calibração dos parâmetros de duas políticas de estoque diferentes (sequência de produção fixa e sequência de produção variável) para cada instância estudada. Na elaboração do design experimental, restringiu-se que os itens seriam homogêneos (mesmos custos, demandas médias, taxas de produção, e parâmetros de controle de inventário) para facilitar a convergência do método de resolução, bem como simplificar a interpretação e análise dos resultados.

A partir dos resultados dos experimentos de otimização, foi possível realizar comparações para os diferentes cenários – número de itens, taxa ocupação do sistema, impacto do setup conforme a sequência de produção, variação estocástica da demanda – concluindo-se que a melhor estratégia de produção depende das condições do sistema. Assim como observado em outros trabalhos da literatura, verificou-se que para cenários altamente restritivos do ponto de vista de capacidade de produção, a sequência fixa é melhor, enquanto a sequência variável é melhor em cenários com menor restrição.

O presente trabalho diferencia-se de outros da literatura por partir de estratégias simples de controle de estoque, utilizando um modelo de simulação e otimização para calibração de seus parâmetros, podendo ser utilizado sem grande dificuldade em cenários industriais reais.

O modelo elaborado mostrou-se efetivo na resolução do problema, gerando soluções adequadas rapidamente, mesmo utilizando a versão de aprendizado pessoal gratuita do *software*. No entanto, uma das limitações da pesquisa é justamente o uso de um *software* comercial “*black box*” genérico – ou seja, que deve ser flexível o suficiente para atender uma grande variação de problemas que

possam ser simulados por eventos discretos – podendo esta não ser a ferramenta mais adequada para tratar o problema SELSP. Como outras limitações da pesquisa, destaca-se que não foram testadas as políticas de sequência fixa e tamanho de lote fixo, e sequência variável com tamanho de lote variável; outras políticas de estoque simples e de alta aplicação na indústria – como uma política envolvendo tamanho de lotes múltiplos – e a falta de uma aplicação industrial real para o problema, não sendo possível avaliar a significância dos resultados obtidos em um cenário real de manufatura.

Como possíveis desdobramentos para o projeto, sugere-se o teste de outras políticas de controle de estoques, aproveitando-se a existência de um modelo funcional, capaz de gerar resultados rapidamente e de forma confiável, e a comparação de tais resultados com outras heurísticas que tratem do SELSP. Outro possível desdobramento é a implementação do modelo desenvolvido em um caso prático na forma de um estudo de caso. Dessa forma, seria possível coletar dados reais de uma fábrica e estudar como o modelo desenvolvido gera melhorias efetivas para a programação da produção, além de permitir verificar quais seriam os desafios para implementação desse modelo na prática como ferramenta de suporte à tomada de decisões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altiok, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. Academic Press, Waltham, Massachusetts.
- Andriolo, A., Battini, D., Grubbström, R.W., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2014). A century of evolution from Harris's basic lot size model: Survey and research agenda. *International Journal of Production Economics*, v. 155, p. 16-38.
- Anupindi, R., & Tayur, S. (1998). Managing Stochastic Multiproduct Systems: Model, Measures, and Analysis. *Operations Research*, v. 46, n. 3, p. 98-111.
- Arnold, T.J.R., Chapman, S.N., & Clive, L.M. (2008). *Introduction to Materials Management* (6th ed.). Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- Axsäter, S. (1987). An Extension of the Extended Basic Period Approach for the Economic Lot Scheduling Problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, v. 52, n. 2, p. 179-189.
- Ballou, R.H. (2006). *Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial* (5ª ed.). Booksman, Porto Alegre.
- Banks J. (2001). The Future of Simulation. *3e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation "Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels"*. Troyes, França.
- Banks, J., Carson II, J.S., Nelson, B.L., & Nicol, D.M. (2010). *Discrete-Event System Simulation* (5th ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Barker, M., & Rawtani, J. (2005). *Practical Batch Process Management*. Elsevier, Amsterdam.
- Beck, F.G., & Glock, C.H. (2019). The economic lot scheduling problem: a content analysis. *International Journal of Production Research*, v. 58, n. 11, p. 3437-3454.
- Berto, R.M.V.S., & Nakano, D.N. (2000). A produção Científica nos Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: Um Levantamento de Métodos e Tipos de Pesquisa. *Produção*, v. 9, n. 2, p. 65-76.

Bertrand, J.W.M., & Fransoo, J.C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 241- 264.

Bomberger, E.E. (1966). A dynamic programming approach to a deterministic lot sizing scheduling problem. *Management Science*, v. 12, n. 11, p. 778-784.

Bourland, K.E., & Yano, C.A. (1994). The Strategic Use of Capacity Slack in the Economic Lot Scheduling Problem with Random Demand. *Management Science*, v.40, n. 12, p. 1690-1704.

Brander, P., Levén, E., & Segerstedt, A. (2005). Lot sizes in a capacity constrained facility – a simulation study of stationary stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, v. 93–94, p. 375–386.

Byrne, M.D. (1990). Multi-item production lot sizing using a search simulation approach. *Engineering Costs and Production Economics*, v. 19, p. 307-311.

Chwif, L., & Medina, A.C. (2007). *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & prática* (2ª ed.). Edição dos autores, São Paulo.

Cortes-Fibla, R., Vidal-Carreras P.I. & García-Sabater J.P. (2015). Considering the effect of demand diversity on the performance of different production strategies for the Economic Lot Scheduling Problem. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, p. 1303-1309.

Cox, J.F., & Blackstone, J.H. (2002). *APICS Dictionary*. Alexandria, VA, APICS.

Doll, C.L., & Whybark, D.C. (1973). An iterative procedure for the single-machine multi-product lot scheduling problem. *Management Science*, v. 20, n. 1, p. 50–55.

Drexl, A., & Kimms, A. (1997). Lot sizing and scheduling – Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, v. 99, p. 221-235.

Eisenstein, D.D. (2005). Recovering Cyclic Schedules Using Dynamic Produce-Up-To Policies. *Operations Research*, v. 53, n. 4, p. 675-688.

Elmaghraby, S.E. (1978). The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP): Review and Extensions. *Management Science*, v. 24, n. 6, p. 587-598.

Erlenkotter, D. (1990). Ford Whitman Harris and the Economics Order Quantity Model. *Operations Research*, v.38, n.6, p.937-946.

Federgruen, A., & Katalan, Z. (1998). Determining Production Schedules Under Base-Stock Policies in Single Facility Multi-Item Production Systems. *Operations Research*, v. 46, n. 6, p.883-898.

Fu, M.C. (2002). Optimization for Simulation: Theory vs. Practice. *INFORMS Journal on Computing*, v. 14, n. 3, p. 192-215.

Gallego, G.M. (1990). Scheduling the production of several items with random demands in a single facility. *Management Science*, v. 36, n. 12, p. 1579–1592.

Gascon A., Leachman, R.C., & Lefrancois P. (1994). Multi-item, single-machine scheduling problem with stochastic demands: a comparison of heuristics, *International Journal of Production Research*, v. 32, p. 583–596.

Glock, C.H., Grosse, E.H., & Ries, J.M. (2014). The lot sizing problem: A tertiary study. *International Journal of Production Economics*, v. 155, p. 39-51.

Glover, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, vol. 8, n. 1, p. 156–166.

Goyal, S.K. (1973). Lot Size Scheduling on a Single Machine for Stochastic Demand. *Management Science*, v. 19, n. 11, p. 1322-1325.

Graves, S.C. (1980). The Multi-Product Production Cycling Problem. *AIIE Transactions*, v. 12, n. 3, p. 233-240.

Hanson, B.B., Hodgson, T.J., Kay, M.G., King, R.E., & Barletta, K.A.T. (2015). On the economic lot scheduling problem: stock-out prevention and system feasibility. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 16, p. 1-14.

Hanssmann, F. (1962). *Operations-Research in Production and Inventory Control*. Wiley. New York.

Holmbom, M., & Segerstedt, A. (2014). Economic Order Quantities in production: From Harris to Economic Lot Scheduling Problems. *International Journal of Production Economics*, v. 155, p. 82-90.

Holmbom, M., Segerstedt, A. & van der Sluis, E. (2013) A solution procedure for Economic Lot Scheduling Problems even in high utilization facilities, *International Journal of Production Research*, v. 51, n. 12, p. 3765-3777.

Hopp, W.J., & Spearman, M.L. (2013). *A Ciência da Fábrica* (3a ed.). Bookman, Porto Alegre.

Hsu W.L. (1983). On the general feasibility test of scheduling lot sizes for several products on one machine, *Management Science*, v. 29, n. 1, p. 93–105.

Jodlbauer, H., & Reitner, S. (2012). Optimizing service-level and relevant cost for a stochastic multi-item cyclic production system, *International Journal of Production Economics*, v. 136, p. 306-317.

Kleijnen, J.P.C., & Wan, J. (2007). Optimization of simulated systems: OptQuest and alternatives. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 15, n. 3, p. 354–362.

Krajewski, L.J., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2009). *Administração de produção e operações*. Pearson Prentice Hall, São Paulo.

Krieg, G.N., & Kuhn, H. (2002). A decomposition method for multi-product kanban systems with setup times and lost sales. *IIE Transactions*, v. 34, n. 7, p. 613-625.

Krieg, G.N., & Kuhn, H. (2004). Analysis of Multi-Product Kanban Systems with State-Dependent Setups and Lost Sales. *Annals of Operations Research*, v. 125, p. 141-166.

Laguna M. (1997). *Optimization of complex systems with Optquest*. Graduate School of Business, University of Colorado: Boulder, Colorado

Leachman, R.C., & Gascon, A. (1988). A Heuristic Scheduling Policy for Multi-Item, Single-Machine Production Systems with Time-Varying Stochastic Demands. *Management Science*, v. 34, n. 3, p. 377-390.

Leachman, R.C., Xiong, Z.K., Gascon, A., & Park, K. (1991). Note: An improvement to the dynamic cycle lengths heuristic for scheduling the multi-item, single-machine. *Management Science*, v. 37, n. 9, p. 1201–1205.

Leedy, P.D., & Ormrod, J.E. (2013). *Practical research: planning and design* (10th ed.). Pearson, Upper Saddle River, New Jersey.

Levén, E., & Segerstedt, A. (2007). A scheduling policy for adjusting economic lot quantities to a feasible solution. *European Journal of Operational Research*, v. 179, n. 2, p. 414–423.

Löhndorf, N., & Minner, S. (2013). Simulation optimization for the stochastic economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, v. 45, n. 7, p. 796-810.

Löhndorf, N., Riel, M., & Minner, S. (2014). Simulation optimization for the stochastic economic lot scheduling problem with sequence-dependent setup times. *International Journal of Production Economics*, v. 157, p. 170-176.

Martí, R., Laguna, M., & Glover, F. (2006). Principles of scatter search. *European Journal of Operational Research*, v. 169, n. 2, p. 359–372.

Melouk, S.H., Freeman, N.K., Miller, D., & Dunning, M. (2013). Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing. *International Journal of Production Economics*, v. 141, n. 1, p. 269–276.

Montgomery, D.C., Runger, G.C. (2009). *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros* (4ª ed.). LTC, São Paulo.

Muravev, D., Hu, H., Rakhmangulov, A., & Mishkurov, P. (2020). Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: Case study on the Ningbo-Zhoushan Port. *International Journal of Information Management*, v. 57, 102133.

Nilsson, K., & Segerstedt, A. (2008). Corrections of costs to feasible solutions of economic lot scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, v. 54, n.1, p. 155–168.

Olhager, J., & Prajogo, D.I. (2012). The impact of manufacturing and supply chain improvement initiatives: A survey comparing make-to-order and make-to-stock firms. *Omega*, v. 40, n. 2, p. 159–165.

Paternina-Arboleda, C.D., & Das, T.K. (2005). A multi-agent reinforcement learning approach to obtaining dynamic control policies for stochastic lot scheduling problem. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 13, p. 389–406.

Rajagopalan, S. (2002). Make to Order or Make to Stock: Model and Application. *Management Science*, v. 48, n. 2, p. 241–256.

Razali, N.M., & Wah, Y.B. (2011). Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, v. 2, n. 1, p. 21-33.

Rogers, J. (1958). A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem. *Management Science*, v. 4, n.3, p. 264-291.

Sadeghi, A., Suer, G., Younes Sinaki, R., & Wilson, D. (2020). Cellular Manufacturing Design and Replenishment Strategy in a Capacitated Supply Chain System: A Simulation-Based Analysis. *Computers & Industrial Engineering*, v. 141, 106282.

Segerstedt, A. (1999). Lot sizes in a capacity constrained facility with available initial inventories. *International Journal of Production Economics*, v. 59, p. 469–475.

Smits, S.R., Wagner, M., & de Kok, T.G. (2004). Determination of an order-up-to policy in the stochastic economic lot scheduling model. *International Journal of Production Economics*, v. 90, p. 377–389.

Sox, C.R., Jackson, P.L., Bowman, A., & Muckstadt, J.A. (1999). A review of the stochastic lot scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, v. 62, p. 181-200.

Statistics Kingdom [internet]. Melbourne. Disponível em: <<https://www.statskingdom.com>>. Acesso em: 1 mai. 2021.

Taj, S., Nedeltcheva, G.N., Pfeil, G., & Roumaya, M. (2012). Spread-sheet model for efficient production and scheduling of a manufacturing line/cell, *International Journal of Production Research*, v. 50, n.4, p. 1141-1154.

Tomotani, J.V., & Mesquita, M.A. (2018). Lot sizing and scheduling: a survey of practices in Brazilian companies. *Production Planning & Control*, v.29, n.3, p.236-246.

Vastag, G., & Montabon, F. (2001). Linkages among manufacturing concepts, inventories, delivery service and competitiveness. *International Journal of Production Economics*, v.71, p.195-204.

Vaughan, T.S. (2007). Cyclical schedules vs. dynamic sequencing: Replenishment dynamics and inventory efficiency. *International Journal of Production Economics*, v. 107, p. 518-527.

Vergin, R.C., & Lee, T.N. (1978). Scheduling rules for the multiple product single machine system with stochastic demand. *INFOR*, v. 16 n. 1, p. 64–73.

Wagner, M., & Smits, S.R. (2004). A local search algorithm for the optimization of the stochastic economic lot scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, v. 90, p. 391-402.

Winands, E.M.M., Adan, I.J.B.F., & van Houtum, G.J. (2011). The stochastic economic lot scheduling problem: A survey. *European Journal of Operational Research*, v. 210, n. 1, p. 1-9.

Yang, T., Kuo, Y., & Chou, P. (2005). Solving a multiresponse simulation problem using a dual-response system and scatter search method. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 13, n. 4, p. 356–369.

Zipkin, P.H. (1986). Models for Design and Control of Stochastic, Multi-Item Batch Production Systems. *Operations Research*, v. 34, n. 1, p. 91-104.

ANEXO: RESULTADOS COMPLETOS

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
3	0	0,7	0,05	\$61.274	393	124	\$60.859	234	740
3	0	0,7	0,05	\$61.292	379	119	\$61.157	96	390
3	0	0,7	0,05	\$61.262	394	119	\$60.851	202	794
3	0	0,7	0,05	\$61.156	360	146	\$60.996	182	718
3	0	0,7	0,05	\$61.160	354	105	\$60.847	197	749
3	0	0,7	0,05	\$61.117	392	118	\$60.522	238	242
3	0	0,7	0,05	\$61.268	394	130	\$61.199	136	563
3	0	0,7	0,05	\$61.226	388	119	\$61.054	171	610
3	0	0,7	0,05	\$61.135	360	128	\$61.010	178	610
3	0	0,7	0,05	\$61.267	390	122	\$60.836	241	683
3	0	0,7	0,1	\$61.228	381	124	\$60.636	248	248
3	0	0,7	0,1	\$61.253	360	135	\$61.220	142	574
3	0	0,7	0,1	\$61.107	466	154	\$61.032	172	610
3	0	0,7	0,1	\$61.067	383	214	\$60.959	194	630
3	0	0,7	0,1	\$60.986	380	123	\$60.987	162	599
3	0	0,7	0,1	\$60.968	394	121	\$61.014	144	574
3	0	0,7	0,1	\$61.277	382	127	\$61.077	185	674
3	0	0,7	0,1	\$61.114	378	211	\$60.948	207	639
3	0	0,7	0,1	\$60.990	379	193	\$60.927	171	703
3	0	0,7	0,1	\$61.187	393	126	\$60.691	248	248
3	0	0,7	0,25	\$61.217	380	204	\$61.172	176	608
3	0	0,7	0,25	\$61.217	358	193	\$60.991	217	730
3	0	0,7	0,25	\$61.039	360	202	\$60.852	224	677
3	0	0,7	0,25	\$61.046	383	223	\$60.862	235	707
3	0	0,7	0,25	\$60.822	378	222	\$60.711	217	633
3	0	0,7	0,25	\$60.708	382	222	\$60.528	225	738
3	0	0,7	0,25	\$61.253	335	204	\$61.209	195	657
3	0	0,7	0,25	\$61.040	374	225	\$60.883	211	691
3	0	0,7	0,25	\$60.914	385	216	\$60.675	255	718
3	0	0,7	0,25	\$61.302	324	205	\$61.127	226	669
3	0	0,8	0,05	\$61.240	369	129	\$61.057	341	345
3	0	0,8	0,05	\$61.243	393	135	\$61.052	343	345
3	0	0,8	0,05	\$61.195	409	140	\$61.002	336	345
3	0	0,8	0,05	\$61.102	398	169	\$61.034	346	346
3	0	0,8	0,05	\$61.121	376	128	\$60.975	332	344
3	0	0,8	0,05	\$61.077	368	136	\$60.956	341	345
3	0	0,8	0,05	\$61.214	399	139	\$61.019	346	346
3	0	0,8	0,05	\$61.165	407	138	\$61.023	335	342
3	0	0,8	0,05	\$61.092	405	151	\$61.013	328	343
3	0	0,8	0,05	\$61.219	402	145	\$61.037	344	356
3	0	0,8	0,1	\$61.166	398	152	\$61.010	356	365
3	0	0,8	0,1	\$61.204	378	166	\$61.030	357	365
3	0	0,8	0,1	\$61.045	397	172	\$60.936	350	355
3	0	0,8	0,1	\$61.030	345	210	\$60.958	345	352
3	0	0,8	0,1	\$60.931	401	159	\$60.865	345	353
3	0	0,8	0,1	\$60.925	371	149	\$60.848	345	350
3	0	0,8	0,1	\$61.205	395	148	\$61.061	363	371
3	0	0,8	0,1	\$61.067	372	226	\$60.995	346	352
3	0	0,8	0,1	\$60.934	315	210	\$60.921	345	353
3	0	0,8	0,1	\$61.136	400	153	\$61.058	359	370
3	0	0,8	0,25	\$61.132	388	243	\$61.083	201	600
3	0	0,8	0,25	\$61.175	333	214	\$60.975	379	391
3	0	0,8	0,25	\$60.953	389	252	\$60.870	192	525
3	0	0,8	0,25	\$60.941	373	256	\$60.820	391	393
3	0	0,8	0,25	\$60.773	342	231	\$60.631	378	395
3	0	0,8	0,25	\$60.648	341	222	\$60.488	377	377
3	0	0,8	0,25	\$61.201	336	245	\$61.077	408	409
3	0	0,8	0,25	\$60.985	354	234	\$60.856	405	405

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
3	0	0,8	0,25	\$60.833	356	261	\$60.685	396	396
3	0	0,8	0,25	\$61.226	300	211	\$61.130	215	598
3	0	0,9	0,05	\$61.094	504	222	\$60.957	314	685
3	0	0,9	0,05	\$61.099	504	301	\$60.922	680	681
3	0	0,9	0,05	\$61.053	504	310	\$60.914	345	681
3	0	0,9	0,05	\$60.992	503	254	\$60.894	641	682
3	0	0,9	0,05	\$61.002	504	212	\$60.849	667	679
3	0	0,9	0,05	\$60.957	504	220	\$60.814	672	682
3	0	0,9	0,05	\$61.070	522	196	\$60.895	584	682
3	0	0,9	0,05	\$61.023	504	296	\$60.894	683	683
3	0	0,9	0,05	\$60.997	504	334	\$60.908	309	682
3	0	0,9	0,05	\$61.065	522	219	\$60.916	682	682
3	0	0,9	0,1	\$61.015	507	281	\$60.871	596	694
3	0	0,9	0,1	\$61.054	506	240	\$60.883	689	703
3	0	0,9	0,1	\$60.956	504	374	\$60.825	688	688
3	0	0,9	0,1	\$60.854	503	392	\$60.809	689	689
3	0	0,9	0,1	\$60.794	489	376	\$60.744	346	677
3	0	0,9	0,1	\$60.819	488	234	\$60.726	685	685
3	0	0,9	0,1	\$61.041	539	286	\$60.891	724	724
3	0	0,9	0,1	\$60.919	504	365	\$60.865	689	689
3	0	0,9	0,1	\$60.828	504	465	\$60.779	687	687
3	0	0,9	0,1	\$60.978	522	253	\$60.905	697	699
3	0	0,9	0,25	\$60.927	517	353	\$60.794	315	754
3	0	0,9	0,25	\$60.978	523	400	\$60.789	696	726
3	0	0,9	0,25	\$60.758	503	387	\$60.606	724	724
3	0	0,9	0,25	\$60.735	507	464	\$60.635	648	734
3	0	0,9	0,25	\$60.479	511	354	\$60.468	686	686
3	0	0,9	0,25	\$60.472	487	314	\$60.356	695	699
3	0	0,9	0,25	\$60.909	593	400	\$60.813	755	755
3	0	0,9	0,25	\$60.726	518	341	\$60.702	719	719
3	0	0,9	0,25	\$60.638	505	430	\$60.549	723	726
3	0	0,9	0,25	\$60.875	577	431	\$60.859	764	764
3	0,5	0,7	0,05	\$61.274	393	124	\$61.044	174	706
3	0,5	0,7	0,05	\$61.292	379	119	\$60.917	203	774
3	0,5	0,7	0,05	\$61.246	432	137	\$61.052	158	676
3	0,5	0,7	0,05	\$61.156	360	146	\$61.083	165	642
3	0,5	0,7	0,05	\$61.160	354	105	\$60.978	171	695
3	0,5	0,7	0,05	\$61.117	392	118	\$60.522	238	242
3	0,5	0,7	0,05	\$61.263	392	133	\$61.199	136	563
3	0,5	0,7	0,05	\$61.213	432	141	\$61.054	171	610
3	0,5	0,7	0,05	\$61.135	360	128	\$61.073	161	597
3	0,5	0,7	0,05	\$61.267	390	122	\$60.836	241	683
3	0,5	0,7	0,1	\$61.228	381	124	\$60.961	193	790
3	0,5	0,7	0,1	\$61.253	360	135	\$60.857	241	743
3	0,5	0,7	0,1	\$61.107	454	153	\$61.060	160	667
3	0,5	0,7	0,1	\$61.052	392	218	\$60.967	194	640
3	0,5	0,7	0,1	\$60.982	358	114	\$60.992	160	597
3	0,5	0,7	0,1	\$60.968	392	124	\$61.014	144	574
3	0,5	0,7	0,1	\$61.277	382	127	\$61.233	138	563
3	0,5	0,7	0,1	\$61.108	395	137	\$60.948	207	639
3	0,5	0,7	0,1	\$60.975	382	140	\$60.520	245	247
3	0,5	0,7	0,1	\$61.187	393	126	\$60.691	248	248
3	0,5	0,7	0,25	\$61.211	383	213	\$61.042	218	718
3	0,5	0,7	0,25	\$61.207	352	207	\$60.998	205	746
3	0,5	0,7	0,25	\$61.011	385	223	\$60.859	217	716
3	0,5	0,7	0,25	\$61.021	368	221	\$60.762	265	686
3	0,5	0,7	0,25	\$60.795	370	240	\$60.707	223	645
3	0,5	0,7	0,25	\$60.680	399	253	\$60.528	225	738
3	0,5	0,7	0,25	\$61.254	360	219	\$61.204	203	642
3	0,5	0,7	0,25	\$61.017	357	216	\$60.866	237	686

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
3	0,5	0,7	0,25	\$60.892	419	236	\$60.786	224	670
3	0,5	0,7	0,25	\$61.241	402	225	\$61.127	226	669
3	0,5	0,8	0,05	\$61.242	376	128	\$61.057	341	345
3	0,5	0,8	0,05	\$61.246	378	138	\$61.052	343	345
3	0,5	0,8	0,05	\$61.192	409	141	\$61.002	336	345
3	0,5	0,8	0,05	\$61.103	394	171	\$61.034	346	346
3	0,5	0,8	0,05	\$61.114	397	136	\$60.975	332	344
3	0,5	0,8	0,05	\$61.073	402	144	\$60.956	341	345
3	0,5	0,8	0,05	\$61.211	398	148	\$61.019	346	346
3	0,5	0,8	0,05	\$61.162	403	143	\$61.023	335	342
3	0,5	0,8	0,05	\$61.092	405	151	\$61.013	328	343
3	0,5	0,8	0,05	\$61.217	377	145	\$61.037	344	356
3	0,5	0,8	0,1	\$61.165	368	150	\$61.010	356	365
3	0,5	0,8	0,1	\$61.205	377	154	\$61.030	357	365
3	0,5	0,8	0,1	\$61.040	378	178	\$60.936	350	355
3	0,5	0,8	0,1	\$61.016	378	268	\$60.958	345	352
3	0,5	0,8	0,1	\$60.940	378	162	\$60.865	345	353
3	0,5	0,8	0,1	\$60.924	374	144	\$60.848	345	350
3	0,5	0,8	0,1	\$61.207	396	151	\$61.061	363	371
3	0,5	0,8	0,1	\$61.073	378	238	\$60.995	346	352
3	0,5	0,8	0,1	\$60.920	377	186	\$60.921	345	353
3	0,5	0,8	0,1	\$61.145	378	166	\$61.058	359	370
3	0,5	0,8	0,25	\$61.143	381	266	\$61.083	201	600
3	0,5	0,8	0,25	\$61.155	382	258	\$60.975	391	391
3	0,5	0,8	0,25	\$60.943	370	270	\$60.861	233	570
3	0,5	0,8	0,25	\$60.923	387	282	\$60.820	391	393
3	0,5	0,8	0,25	\$60.761	378	296	\$60.631	378	395
3	0,5	0,8	0,25	\$60.641	376	259	\$60.488	377	377
3	0,5	0,8	0,25	\$61.155	391	259	\$61.077	409	409
3	0,5	0,8	0,25	\$61.008	378	293	\$60.856	405	405
3	0,5	0,8	0,25	\$60.830	418	269	\$60.685	396	396
3	0,5	0,8	0,25	\$61.169	396	280	\$61.130	215	598
3	0,5	0,9	0,05	\$61.094	504	222	\$60.958	316	683
3	0,5	0,9	0,05	\$61.099	504	301	\$60.922	680	681
3	0,5	0,9	0,05	\$61.053	504	310	\$60.914	345	681
3	0,5	0,9	0,05	\$60.992	503	349	\$60.894	637	682
3	0,5	0,9	0,05	\$61.002	504	212	\$60.849	667	679
3	0,5	0,9	0,05	\$60.957	504	220	\$60.814	672	682
3	0,5	0,9	0,05	\$61.070	522	196	\$60.895	584	682
3	0,5	0,9	0,05	\$61.023	504	330	\$60.894	683	683
3	0,5	0,9	0,05	\$60.997	504	334	\$60.880	635	682
3	0,5	0,9	0,05	\$61.065	522	219	\$60.916	682	682
3	0,5	0,9	0,1	\$61.015	507	281	\$60.871	596	694
3	0,5	0,9	0,1	\$61.054	506	240	\$60.883	689	703
3	0,5	0,9	0,1	\$60.956	504	465	\$60.825	688	688
3	0,5	0,9	0,1	\$60.853	503	339	\$60.809	689	689
3	0,5	0,9	0,1	\$60.794	489	376	\$60.744	346	677
3	0,5	0,9	0,1	\$60.817	486	295	\$60.726	685	685
3	0,5	0,9	0,1	\$61.045	528	257	\$60.891	724	724
3	0,5	0,9	0,1	\$60.910	501	343	\$60.865	689	689
3	0,5	0,9	0,1	\$60.798	496	434	\$60.779	687	687
3	0,5	0,9	0,1	\$60.969	532	250	\$60.905	697	699
3	0,5	0,9	0,25	\$60.768	572	320	\$60.786	395	741
3	0,5	0,9	0,25	\$60.914	508	338	\$60.789	618	726
3	0,5	0,9	0,25	\$60.529	527	305	\$60.606	724	724
3	0,5	0,9	0,25	\$60.333	733	535	\$60.647	408	726
3	0,5	0,9	0,25	\$60.381	491	289	\$60.468	686	686
3	0,5	0,9	0,25	\$60.300	487	290	\$60.356	695	699
3	0,5	0,9	0,25	\$60.903	548	377	\$60.813	755	755
3	0,5	0,9	0,25	\$60.478	562	321	\$60.702	719	719

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
3	0,5	0,9	0,25	\$60.196	646	419	\$60.549	726	726
3	0,5	0,9	0,25	\$60.730	604	336	\$60.859	764	764
3	1	0,7	0,05	\$61.274	393	124	\$60.649	213	241
3	1	0,7	0,05	\$61.289	428	118	\$61.010	187	708
3	1	0,7	0,05	\$61.246	432	137	\$61.100	149	598
3	1	0,7	0,05	\$61.156	360	146	\$60.871	196	845
3	1	0,7	0,05	\$61.160	354	105	\$60.789	230	670
3	1	0,7	0,05	\$61.117	392	118	\$60.522	238	242
3	1	0,7	0,05	\$61.263	392	133	\$61.199	136	563
3	1	0,7	0,05	\$61.213	432	141	\$61.054	171	610
3	1	0,7	0,05	\$61.135	360	128	\$61.073	161	597
3	1	0,7	0,05	\$61.267	390	122	\$60.836	241	683
3	1	0,7	0,1	\$61.228	381	124	\$61.033	185	709
3	1	0,7	0,1	\$61.253	360	135	\$61.089	174	687
3	1	0,7	0,1	\$61.110	455	148	\$60.968	190	644
3	1	0,7	0,1	\$61.025	336	234	\$61.104	146	518
3	1	0,7	0,1	\$60.986	380	123	\$60.934	174	644
3	1	0,7	0,1	\$60.968	394	121	\$61.014	144	574
3	1	0,7	0,1	\$61.277	382	127	\$61.048	276	528
3	1	0,7	0,1	\$61.103	383	133	\$60.948	207	639
3	1	0,7	0,1	\$60.961	421	153	\$60.520	247	247
3	1	0,7	0,1	\$61.187	393	126	\$60.691	248	248
3	1	0,7	0,25	\$61.183	376	230	\$61.074	209	717
3	1	0,7	0,25	\$61.186	381	240	\$61.123	180	600
3	1	0,7	0,25	\$60.975	402	246	\$60.947	226	502
3	1	0,7	0,25	\$60.972	434	282	\$60.718	282	716
3	1	0,7	0,25	\$60.765	345	252	\$60.819	177	563
3	1	0,7	0,25	\$60.649	406	272	\$60.596	203	707
3	1	0,7	0,25	\$61.214	355	231	\$61.207	204	637
3	1	0,7	0,25	\$60.998	347	259	\$60.866	237	686
3	1	0,7	0,25	\$60.863	390	241	\$60.375	272	279
3	1	0,7	0,25	\$61.233	399	241	\$61.127	226	669
3	1	0,8	0,05	\$61.245	378	141	\$61.057	341	345
3	1	0,8	0,05	\$61.245	398	139	\$61.052	344	345
3	1	0,8	0,05	\$61.195	409	140	\$61.002	336	345
3	1	0,8	0,05	\$61.102	398	169	\$61.034	346	346
3	1	0,8	0,05	\$61.120	378	141	\$60.975	332	344
3	1	0,8	0,05	\$61.073	402	144	\$60.956	341	345
3	1	0,8	0,05	\$61.214	403	148	\$61.019	346	346
3	1	0,8	0,05	\$61.165	407	138	\$61.023	335	342
3	1	0,8	0,05	\$61.092	405	151	\$61.013	328	343
3	1	0,8	0,05	\$61.217	377	145	\$61.037	344	356
3	1	0,8	0,1	\$61.163	375	152	\$61.010	356	365
3	1	0,8	0,1	\$61.204	378	166	\$61.030	357	365
3	1	0,8	0,1	\$61.049	409	146	\$60.936	350	355
3	1	0,8	0,1	\$60.906	397	208	\$60.958	345	352
3	1	0,8	0,1	\$60.937	374	149	\$60.865	345	353
3	1	0,8	0,1	\$60.929	378	163	\$60.848	345	350
3	1	0,8	0,1	\$61.205	395	148	\$61.061	363	371
3	1	0,8	0,1	\$61.037	409	177	\$60.995	346	352
3	1	0,8	0,1	\$60.913	373	170	\$60.921	345	353
3	1	0,8	0,1	\$61.139	405	153	\$61.058	359	370
3	1	0,8	0,25	\$61.032	511	327	\$60.961	403	403
3	1	0,8	0,25	\$61.053	510	322	\$60.975	391	391
3	1	0,8	0,25	\$60.827	495	323	\$60.769	403	404
3	1	0,8	0,25	\$60.798	494	353	\$60.820	391	393
3	1	0,8	0,25	\$60.531	507	364	\$60.631	378	395
3	1	0,8	0,25	\$60.511	482	340	\$60.488	377	377
3	1	0,8	0,25	\$61.031	457	198	\$61.077	408	409
3	1	0,8	0,25	\$60.830	522	313	\$60.856	405	405

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
3	1	0,8	0,25	\$60.685	465	348	\$60.685	396	396
3	1	0,8	0,25	\$61.008	524	345	\$61.130	215	598
3	1	0,9	0,05	\$61.094	504	222	\$60.958	316	683
3	1	0,9	0,05	\$61.099	504	301	\$60.922	680	681
3	1	0,9	0,05	\$61.053	504	310	\$60.914	345	681
3	1	0,9	0,05	\$60.992	503	349	\$60.894	641	682
3	1	0,9	0,05	\$61.002	504	212	\$60.849	667	679
3	1	0,9	0,05	\$60.957	504	220	\$60.814	672	682
3	1	0,9	0,05	\$61.070	522	196	\$60.895	584	682
3	1	0,9	0,05	\$61.023	504	330	\$60.894	683	683
3	1	0,9	0,05	\$60.997	504	334	\$60.880	635	682
3	1	0,9	0,05	\$61.065	522	219	\$60.916	682	682
3	1	0,9	0,1	\$61.015	507	281	\$60.871	596	694
3	1	0,9	0,1	\$61.054	506	240	\$60.883	689	703
3	1	0,9	0,1	\$60.956	504	378	\$60.825	688	688
3	1	0,9	0,1	\$60.854	503	374	\$60.809	689	689
3	1	0,9	0,1	\$60.794	489	376	\$60.744	346	677
3	1	0,9	0,1	\$60.817	486	295	\$60.726	685	685
3	1	0,9	0,1	\$61.045	528	257	\$60.891	724	724
3	1	0,9	0,1	\$60.919	504	396	\$60.865	689	689
3	1	0,9	0,1	\$60.798	499	312	\$60.779	687	687
3	1	0,9	0,1	\$60.970	532	239	\$60.905	697	699
3	1	0,9	0,25	\$60.799	539	327	\$60.793	437	742
3	1	0,9	0,25	\$60.914	508	338	\$60.789	621	726
3	1	0,9	0,25	\$60.513	557	303	\$60.606	724	724
3	1	0,9	0,25	\$60.159	476	277	\$60.635	558	734
3	1	0,9	0,25	\$60.383	538	295	\$60.468	686	686
3	1	0,9	0,25	\$60.292	509	284	\$60.356	695	699
3	1	0,9	0,25	\$60.899	550	351	\$60.813	755	755
3	1	0,9	0,25	\$60.461	544	304	\$60.702	719	719
3	1	0,9	0,25	\$60.154	541	307	\$60.549	723	726
3	1	0,9	0,25	\$60.738	578	314	\$60.859	764	764
5	0	0,7	0,05	\$60.728	315	65	\$60.718	70	386
5	0	0,7	0,05	\$60.715	313	68	\$60.737	66	388
5	0	0,7	0,05	\$60.760	315	57	\$60.703	72	388
5	0	0,7	0,05	\$60.765	312	54	\$60.743	62	388
5	0	0,7	0,05	\$60.744	314	60	\$60.720	63	388
5	0	0,7	0,05	\$60.712	313	65	\$60.658	70	405
5	0	0,7	0,05	\$60.787	339	63	\$60.791	60	378
5	0	0,7	0,05	\$60.824	311	53	\$60.814	62	379
5	0	0,7	0,05	\$60.732	311	55	\$60.757	62	378
5	0	0,7	0,05	\$60.847	315	52	\$60.790	62	380
5	0	0,7	0,1	\$60.686	312	84	\$60.726	75	388
5	0	0,7	0,1	\$60.656	314	65	\$60.677	69	387
5	0	0,7	0,1	\$60.655	326	93	\$60.716	71	396
5	0	0,7	0,1	\$60.648	340	78	\$60.676	68	359
5	0	0,7	0,1	\$60.679	340	79	\$60.666	72	395
5	0	0,7	0,1	\$60.583	316	97	\$60.552	83	403
5	0	0,7	0,1	\$60.719	335	87	\$60.775	69	388
5	0	0,7	0,1	\$60.671	298	81	\$60.747	69	385
5	0	0,7	0,1	\$60.686	316	84	\$60.677	69	366
5	0	0,7	0,1	\$60.746	336	70	\$60.772	71	388
5	0	0,7	0,25	\$60.717	347	105	\$60.573	115	459
5	0	0,7	0,25	\$60.539	327	105	\$60.512	94	412
5	0	0,7	0,25	\$60.538	314	103	\$60.561	95	416
5	0	0,7	0,25	\$60.528	315	98	\$60.545	92	376
5	0	0,7	0,25	\$60.497	305	113	\$60.487	97	379
5	0	0,7	0,25	\$60.422	335	117	\$60.395	101	385
5	0	0,7	0,25	\$60.795	341	107	\$60.771	94	417
5	0	0,7	0,25	\$60.703	327	129	\$60.745	93	415

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
5	0	0,7	0,25	\$60.580	288	109	\$60.590	92	374
5	0	0,7	0,25	\$60.779	311	97	\$60.733	96	417
5	0	0,8	0,05	\$60.687	302	70	\$60.645	75	400
5	0	0,8	0,05	\$60.669	302	83	\$60.645	75	400
5	0	0,8	0,05	\$60.712	308	69	\$60.638	75	420
5	0	0,8	0,05	\$60.721	298	64	\$60.607	74	431
5	0	0,8	0,05	\$60.690	308	69	\$60.623	71	376
5	0	0,8	0,05	\$60.663	298	78	\$60.609	74	419
5	0	0,8	0,05	\$60.741	298	69	\$60.697	73	398
5	0	0,8	0,05	\$60.763	303	69	\$60.715	72	368
5	0	0,8	0,05	\$60.690	302	64	\$60.655	73	389
5	0	0,8	0,05	\$60.781	289	67	\$60.686	73	418
5	0	0,8	0,1	\$60.643	305	97	\$60.657	78	398
5	0	0,8	0,1	\$60.604	288	88	\$60.564	85	426
5	0	0,8	0,1	\$60.615	292	105	\$60.631	80	399
5	0	0,8	0,1	\$60.605	307	97	\$60.574	76	415
5	0	0,8	0,1	\$60.613	300	92	\$60.580	82	423
5	0	0,8	0,1	\$60.530	288	108	\$60.507	85	426
5	0	0,8	0,1	\$60.684	276	91	\$60.664	82	401
5	0	0,8	0,1	\$60.630	308	106	\$60.625	86	401
5	0	0,8	0,1	\$60.646	292	92	\$60.619	79	370
5	0	0,8	0,1	\$60.690	292	78	\$60.701	74	351
5	0	0,8	0,25	\$60.670	335	119	\$60.572	105	403
5	0	0,8	0,25	\$60.448	314	126	\$60.411	107	418
5	0	0,8	0,25	\$60.471	312	124	\$60.474	108	394
5	0	0,8	0,25	\$60.444	317	127	\$60.468	102	380
5	0	0,8	0,25	\$60.423	293	132	\$60.409	109	402
5	0	0,8	0,25	\$60.391	291	118	\$60.267	116	428
5	0	0,8	0,25	\$60.761	290	109	\$60.655	116	413
5	0	0,8	0,25	\$60.670	275	106	\$60.680	102	382
5	0	0,8	0,25	\$60.532	288	126	\$60.496	105	418
5	0	0,8	0,25	\$60.692	297	115	\$60.654	100	382
5	0	0,9	0,05	\$60.647	302	102	\$60.608	368	369
5	0	0,9	0,05	\$60.643	302	118	\$60.594	369	369
5	0	0,9	0,05	\$60.658	302	109	\$60.604	369	369
5	0	0,9	0,05	\$60.651	313	83	\$60.599	368	369
5	0	0,9	0,05	\$60.603	313	92	\$60.567	148	367
5	0	0,9	0,05	\$60.608	302	117	\$60.578	106	369
5	0	0,9	0,05	\$60.674	314	112	\$60.655	369	369
5	0	0,9	0,05	\$60.700	313	90	\$60.643	368	368
5	0	0,9	0,05	\$60.646	312	82	\$60.636	130	369
5	0	0,9	0,05	\$60.689	311	103	\$60.653	364	369
5	0	0,9	0,1	\$60.591	325	129	\$60.603	148	374
5	0	0,9	0,1	\$60.540	313	130	\$60.504	377	377
5	0	0,9	0,1	\$60.546	332	115	\$60.568	378	379
5	0	0,9	0,1	\$60.572	304	143	\$60.539	374	375
5	0	0,9	0,1	\$60.527	303	155	\$60.531	371	371
5	0	0,9	0,1	\$60.483	312	127	\$60.473	110	369
5	0	0,9	0,1	\$60.626	321	130	\$60.578	377	384
5	0	0,9	0,1	\$60.568	316	112	\$60.564	128	371
5	0	0,9	0,1	\$60.599	308	125	\$60.562	370	371
5	0	0,9	0,1	\$60.613	307	161	\$60.626	376	376
5	0	0,9	0,25	\$60.579	316	147	\$60.519	404	411
5	0	0,9	0,25	\$60.377	317	169	\$60.304	395	398
5	0	0,9	0,25	\$60.397	326	156	\$60.378	402	403
5	0	0,9	0,25	\$60.382	301	185	\$60.385	398	398
5	0	0,9	0,25	\$60.313	297	221	\$60.292	390	391
5	0	0,9	0,25	\$60.309	321	158	\$60.267	378	385
5	0	0,9	0,25	\$60.609	344	160	\$60.551	130	436
5	0	0,9	0,25	\$60.503	322	186	\$60.495	400	400

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
5	0	0,9	0,25	\$60.461	328	147	\$60.456	383	385
5	0	0,9	0,25	\$60.551	343	169	\$60.564	408	408
5	0,5	0,7	0,05	\$60.734	311	60	\$60.718	70	386
5	0,5	0,7	0,05	\$60.715	313	68	\$60.737	66	388
5	0,5	0,7	0,05	\$60.760	315	57	\$60.703	72	388
5	0,5	0,7	0,05	\$60.768	313	52	\$60.743	62	388
5	0,5	0,7	0,05	\$60.747	316	55	\$60.720	63	388
5	0,5	0,7	0,05	\$60.705	311	65	\$60.658	70	405
5	0,5	0,7	0,05	\$60.796	315	55	\$60.791	60	378
5	0,5	0,7	0,05	\$60.819	312	60	\$60.814	62	379
5	0,5	0,7	0,05	\$60.735	313	62	\$60.757	62	378
5	0,5	0,7	0,05	\$60.847	315	52	\$60.790	62	380
5	0,5	0,7	0,1	\$60.661	305	82	\$60.726	75	388
5	0,5	0,7	0,1	\$60.656	314	65	\$60.677	69	387
5	0,5	0,7	0,1	\$60.661	333	87	\$60.716	71	396
5	0,5	0,7	0,1	\$60.650	311	82	\$60.676	68	359
5	0,5	0,7	0,1	\$60.679	340	79	\$60.666	72	395
5	0,5	0,7	0,1	\$60.542	302	107	\$60.552	83	403
5	0,5	0,7	0,1	\$60.714	340	90	\$60.775	69	388
5	0,5	0,7	0,1	\$60.672	316	70	\$60.747	69	385
5	0,5	0,7	0,1	\$60.660	303	96	\$60.677	69	366
5	0,5	0,7	0,1	\$60.746	336	70	\$60.772	71	388
5	0,5	0,7	0,25	\$60.684	307	117	\$60.637	105	417
5	0,5	0,7	0,25	\$60.495	342	122	\$60.489	98	381
5	0,5	0,7	0,25	\$60.493	329	124	\$60.540	101	422
5	0,5	0,7	0,25	\$60.486	349	115	\$60.516	101	376
5	0,5	0,7	0,25	\$60.473	309	130	\$60.468	102	402
5	0,5	0,7	0,25	\$60.414	324	123	\$60.378	104	388
5	0,5	0,7	0,25	\$60.792	331	113	\$60.750	98	422
5	0,5	0,7	0,25	\$60.683	325	123	\$60.740	95	417
5	0,5	0,7	0,25	\$60.536	341	118	\$60.569	96	381
5	0,5	0,7	0,25	\$60.727	327	112	\$60.750	92	411
5	0,5	0,8	0,05	\$60.687	294	68	\$60.654	72	366
5	0,5	0,8	0,05	\$60.664	294	78	\$60.645	75	400
5	0,5	0,8	0,05	\$60.715	304	66	\$60.638	75	420
5	0,5	0,8	0,05	\$60.721	298	64	\$60.631	73	410
5	0,5	0,8	0,05	\$60.690	308	69	\$60.623	71	376
5	0,5	0,8	0,05	\$60.663	298	78	\$60.615	73	418
5	0,5	0,8	0,05	\$60.739	294	72	\$60.697	73	398
5	0,5	0,8	0,05	\$60.763	303	69	\$60.715	72	368
5	0,5	0,8	0,05	\$60.691	292	70	\$60.662	73	377
5	0,5	0,8	0,05	\$60.780	308	66	\$60.644	90	286
5	0,5	0,8	0,1	\$60.615	285	95	\$60.657	78	398
5	0,5	0,8	0,1	\$60.609	297	88	\$60.564	85	426
5	0,5	0,8	0,1	\$60.597	290	108	\$60.631	80	399
5	0,5	0,8	0,1	\$60.593	295	93	\$60.569	84	402
5	0,5	0,8	0,1	\$60.612	308	96	\$60.580	82	423
5	0,5	0,8	0,1	\$60.480	305	123	\$60.495	87	403
5	0,5	0,8	0,1	\$60.674	302	99	\$60.664	82	401
5	0,5	0,8	0,1	\$60.607	297	114	\$60.625	86	401
5	0,5	0,8	0,1	\$60.613	298	112	\$60.626	75	366
5	0,5	0,8	0,1	\$60.693	298	76	\$60.639	87	433
5	0,5	0,8	0,25	\$60.644	303	134	\$60.567	104	384
5	0,5	0,8	0,25	\$60.396	351	141	\$60.434	103	382
5	0,5	0,8	0,25	\$60.428	333	139	\$60.472	112	387
5	0,5	0,8	0,25	\$60.387	360	147	\$60.447	114	402
5	0,5	0,8	0,25	\$60.384	314	149	\$60.422	107	367
5	0,5	0,8	0,25	\$60.328	328	153	\$60.261	134	418
5	0,5	0,8	0,25	\$60.726	332	128	\$60.594	132	459
5	0,5	0,8	0,25	\$60.537	357	142	\$60.652	105	383

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
5	0,5	0,8	0,25	\$60.517	301	148	\$60.478	110	415
5	0,5	0,8	0,25	\$60.620	322	132	\$60.654	104	377
5	0,5	0,9	0,05	\$60.640	312	96	\$60.608	368	369
5	0,5	0,9	0,05	\$60.643	302	108	\$60.594	369	369
5	0,5	0,9	0,05	\$60.658	302	98	\$60.604	369	369
5	0,5	0,9	0,05	\$60.645	304	90	\$60.599	368	369
5	0,5	0,9	0,05	\$60.603	313	92	\$60.567	148	367
5	0,5	0,9	0,05	\$60.626	302	80	\$60.578	106	369
5	0,5	0,9	0,05	\$60.667	303	134	\$60.655	369	369
5	0,5	0,9	0,05	\$60.687	303	105	\$60.643	368	368
5	0,5	0,9	0,05	\$60.643	302	94	\$60.637	119	369
5	0,5	0,9	0,05	\$60.690	313	91	\$60.653	364	369
5	0,5	0,9	0,1	\$60.526	333	113	\$60.603	148	374
5	0,5	0,9	0,1	\$60.529	305	112	\$60.504	377	377
5	0,5	0,9	0,1	\$60.556	313	113	\$60.568	378	379
5	0,5	0,9	0,1	\$60.564	301	128	\$60.539	374	375
5	0,5	0,9	0,1	\$60.509	336	118	\$60.531	371	371
5	0,5	0,9	0,1	\$60.397	302	95	\$60.468	372	372
5	0,5	0,9	0,1	\$60.550	308	109	\$60.578	377	384
5	0,5	0,9	0,1	\$60.565	325	112	\$60.564	128	371
5	0,5	0,9	0,1	\$60.486	314	102	\$60.562	370	371
5	0,5	0,9	0,1	\$60.612	330	108	\$60.626	376	376
5	0,5	0,9	0,25	\$60.268	414	235	\$60.519	404	411
5	0,5	0,9	0,25	\$59.984	398	294	\$60.304	395	398
5	0,5	0,9	0,25	\$60.217	441	225	\$60.378	402	403
5	0,5	0,9	0,25	\$60.134	436	198	\$60.385	398	398
5	0,5	0,9	0,25	\$60.122	394	231	\$60.292	390	391
5	0,5	0,9	0,25	\$59.919	490	233	\$60.267	378	385
5	0,5	0,9	0,25	\$60.390	434	219	\$60.495	409	409
5	0,5	0,9	0,25	\$60.189	406	194	\$60.495	400	400
5	0,5	0,9	0,25	\$60.003	523	218	\$60.456	383	385
5	0,5	0,9	0,25	\$60.396	401	224	\$60.564	408	408
5	1	0,7	0,05	\$60.730	311	61	\$60.718	70	386
5	1	0,7	0,05	\$60.707	313	79	\$60.737	66	388
5	1	0,7	0,05	\$60.761	339	62	\$60.679	72	405
5	1	0,7	0,05	\$60.765	312	54	\$60.743	62	388
5	1	0,7	0,05	\$60.749	315	55	\$60.683	62	397
5	1	0,7	0,05	\$60.707	315	68	\$60.658	70	405
5	1	0,7	0,05	\$60.790	311	62	\$60.745	72	386
5	1	0,7	0,05	\$60.819	312	60	\$60.814	62	379
5	1	0,7	0,05	\$60.734	315	60	\$60.757	62	378
5	1	0,7	0,05	\$60.847	315	52	\$60.777	67	384
5	1	0,7	0,1	\$60.667	316	63	\$60.726	75	388
5	1	0,7	0,1	\$60.647	334	69	\$60.677	69	387
5	1	0,7	0,1	\$60.661	333	87	\$60.716	71	396
5	1	0,7	0,1	\$60.655	338	72	\$60.676	68	359
5	1	0,7	0,1	\$60.683	314	75	\$60.666	72	395
5	1	0,7	0,1	\$60.509	309	121	\$60.622	71	387
5	1	0,7	0,1	\$60.715	334	85	\$60.775	69	388
5	1	0,7	0,1	\$60.672	312	73	\$60.747	69	385
5	1	0,7	0,1	\$60.637	313	105	\$60.677	69	366
5	1	0,7	0,1	\$60.744	332	74	\$60.772	71	388
5	1	0,7	0,25	\$60.624	327	147	\$60.633	100	391
5	1	0,7	0,25	\$60.445	337	134	\$60.485	97	415
5	1	0,7	0,25	\$60.437	351	135	\$60.535	102	417
5	1	0,7	0,25	\$60.419	358	160	\$60.524	93	406
5	1	0,7	0,25	\$60.425	342	129	\$60.489	93	366
5	1	0,7	0,25	\$60.348	336	145	\$60.362	93	417
5	1	0,7	0,25	\$60.718	351	139	\$60.743	104	421
5	1	0,7	0,25	\$60.603	351	146	\$60.745	93	415

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
5	1	0,7	0,25	\$60.535	313	138	\$60.553	100	420
5	1	0,7	0,25	\$60.675	342	132	\$60.681	105	426
5	1	0,8	0,05	\$60.685	298	69	\$60.645	75	400
5	1	0,8	0,05	\$60.665	292	76	\$60.645	75	400
5	1	0,8	0,05	\$60.715	304	66	\$60.639	75	422
5	1	0,8	0,05	\$60.725	298	63	\$60.676	64	351
5	1	0,8	0,05	\$60.690	289	70	\$60.610	75	419
5	1	0,8	0,05	\$60.663	298	78	\$60.615	73	418
5	1	0,8	0,05	\$60.739	296	73	\$60.642	84	403
5	1	0,8	0,05	\$60.768	308	70	\$60.715	72	368
5	1	0,8	0,05	\$60.687	277	64	\$60.663	72	376
5	1	0,8	0,05	\$60.780	308	66	\$60.685	75	423
5	1	0,8	0,1	\$60.606	323	86	\$60.657	78	398
5	1	0,8	0,1	\$60.609	297	88	\$60.564	85	426
5	1	0,8	0,1	\$60.618	308	83	\$60.638	80	402
5	1	0,8	0,1	\$60.585	289	84	\$60.603	78	371
5	1	0,8	0,1	\$60.606	338	91	\$60.578	80	382
5	1	0,8	0,1	\$60.451	302	76	\$60.504	111	380
5	1	0,8	0,1	\$60.678	302	114	\$60.673	80	398
5	1	0,8	0,1	\$60.612	301	85	\$60.625	86	401
5	1	0,8	0,1	\$60.532	325	93	\$60.608	82	400
5	1	0,8	0,1	\$60.688	298	87	\$60.682	79	400
5	1	0,8	0,25	\$60.356	418	196	\$60.596	99	374
5	1	0,8	0,25	\$60.185	446	183	\$60.399	114	384
5	1	0,8	0,25	\$60.267	427	158	\$60.427	134	439
5	1	0,8	0,25	\$60.215	453	195	\$60.444	118	404
5	1	0,8	0,25	\$60.308	360	157	\$60.407	125	417
5	1	0,8	0,25	\$60.120	435	193	\$60.312	124	417
5	1	0,8	0,25	\$60.512	434	168	\$60.625	118	428
5	1	0,8	0,25	\$60.441	403	171	\$60.651	101	351
5	1	0,8	0,25	\$60.273	444	183	\$60.498	131	395
5	1	0,8	0,25	\$60.410	442	165	\$60.605	113	413
5	1	0,9	0,05	\$60.648	313	92	\$60.608	368	369
5	1	0,9	0,05	\$60.643	302	108	\$60.594	369	369
5	1	0,9	0,05	\$60.658	302	99	\$60.604	369	369
5	1	0,9	0,05	\$60.645	304	90	\$60.599	368	369
5	1	0,9	0,05	\$60.603	313	92	\$60.567	148	367
5	1	0,9	0,05	\$60.626	302	80	\$60.578	106	369
5	1	0,9	0,05	\$60.667	303	134	\$60.655	369	369
5	1	0,9	0,05	\$60.700	313	90	\$60.643	368	368
5	1	0,9	0,05	\$60.643	302	77	\$60.618	366	368
5	1	0,9	0,05	\$60.690	313	91	\$60.653	364	369
5	1	0,9	0,1	\$60.489	357	100	\$60.603	148	374
5	1	0,9	0,1	\$60.524	306	110	\$60.504	377	377
5	1	0,9	0,1	\$60.534	335	123	\$60.568	378	379
5	1	0,9	0,1	\$60.517	309	107	\$60.539	374	375
5	1	0,9	0,1	\$60.503	321	105	\$60.531	371	371
5	1	0,9	0,1	\$60.401	313	101	\$60.468	372	372
5	1	0,9	0,1	\$60.548	312	103	\$60.578	377	384
5	1	0,9	0,1	\$60.566	314	106	\$60.564	128	371
5	1	0,9	0,1	\$60.486	314	102	\$60.562	370	371
5	1	0,9	0,1	\$60.612	321	100	\$60.626	376	376
5	1	0,9	0,25	\$59.910	530	269	\$60.519	404	411
5	1	0,9	0,25	\$59.966	451	144	\$60.304	395	398
5	1	0,9	0,25	\$59.810	572	229	\$60.378	402	403
5	1	0,9	0,25	\$59.891	412	126	\$60.385	398	398
5	1	0,9	0,25	\$59.884	471	214	\$60.292	390	391
5	1	0,9	0,25	\$59.604	572	378	\$60.267	378	385
5	1	0,9	0,25	\$60.069	571	235	\$60.495	409	409
5	1	0,9	0,25	\$59.944	466	147	\$60.495	400	400

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
5	1	0,9	0,25	\$59.829	532	213	\$60.456	383	385
5	1	0,9	0,25	\$60.165	491	226	\$60.564	408	408
10	0	0,7	0,05	\$59.561	230	22	\$59.567	24	241
10	0	0,7	0,05	\$59.515	230	24	\$59.549	21	233
10	0	0,7	0,05	\$59.548	229	21	\$59.562	23	245
10	0	0,7	0,05	\$59.571	230	21	\$59.548	23	247
10	0	0,7	0,05	\$59.571	229	20	\$59.567	20	244
10	0	0,7	0,05	\$59.514	230	23	\$59.557	20	239
10	0	0,7	0,05	\$59.556	230	20	\$59.571	22	243
10	0	0,7	0,05	\$59.556	234	21	\$59.595	22	243
10	0	0,7	0,05	\$59.579	226	20	\$59.590	21	233
10	0	0,7	0,05	\$59.543	230	25	\$59.569	21	239
10	0	0,7	0,1	\$59.732	241	40	\$59.813	29	250
10	0	0,7	0,1	\$59.712	237	38	\$59.779	28	250
10	0	0,7	0,1	\$59.743	230	32	\$59.788	28	246
10	0	0,7	0,1	\$59.694	227	32	\$59.765	26	232
10	0	0,7	0,1	\$59.665	266	40	\$59.765	28	249
10	0	0,7	0,1	\$59.666	230	37	\$59.729	29	249
10	0	0,7	0,1	\$59.776	229	34	\$59.832	29	249
10	0	0,7	0,1	\$59.828	228	31	\$59.866	29	246
10	0	0,7	0,1	\$59.787	228	33	\$59.822	27	249
10	0	0,7	0,1	\$59.805	226	34	\$59.852	29	250
10	0	0,7	0,25	\$59.690	217	42	\$59.753	37	242
10	0	0,7	0,25	\$59.614	235	43	\$59.664	39	242
10	0	0,7	0,25	\$59.730	236	42	\$59.789	37	250
10	0	0,7	0,25	\$59.658	236	44	\$59.685	39	250
10	0	0,7	0,25	\$59.523	236	47	\$59.607	37	245
10	0	0,7	0,25	\$59.536	204	50	\$59.626	35	233
10	0	0,7	0,25	\$59.776	246	52	\$59.868	37	240
10	0	0,7	0,25	\$59.821	237	43	\$59.838	39	244
10	0	0,7	0,25	\$59.692	237	48	\$59.778	35	241
10	0	0,7	0,25	\$59.697	246	45	\$59.774	35	250
10	0	0,8	0,05	\$59.523	233	26	\$59.549	27	248
10	0	0,8	0,05	\$59.474	233	29	\$59.511	26	242
10	0	0,8	0,05	\$59.510	230	23	\$59.545	27	249
10	0	0,8	0,05	\$59.532	231	24	\$59.498	29	239
10	0	0,8	0,05	\$59.521	251	27	\$59.540	26	249
10	0	0,8	0,05	\$59.473	228	28	\$59.524	25	243
10	0	0,8	0,05	\$59.520	232	26	\$59.548	26	247
10	0	0,8	0,05	\$59.519	231	30	\$59.570	26	243
10	0	0,8	0,05	\$59.538	232	22	\$59.559	26	247
10	0	0,8	0,05	\$59.508	229	27	\$59.542	26	243
10	0	0,8	0,1	\$59.704	230	40	\$59.763	30	242
10	0	0,8	0,1	\$59.657	245	43	\$59.737	31	248
10	0	0,8	0,1	\$59.692	243	42	\$59.754	31	250
10	0	0,8	0,1	\$59.643	232	41	\$59.718	31	249
10	0	0,8	0,1	\$59.640	232	38	\$59.727	31	249
10	0	0,8	0,1	\$59.602	230	48	\$59.701	31	247
10	0	0,8	0,1	\$59.740	230	37	\$59.798	31	245
10	0	0,8	0,1	\$59.785	232	38	\$59.839	30	250
10	0	0,8	0,1	\$59.740	233	37	\$59.791	31	247
10	0	0,8	0,1	\$59.775	233	38	\$59.818	32	247
10	0	0,8	0,25	\$59.653	214	53	\$59.684	42	238
10	0	0,8	0,25	\$59.550	233	50	\$59.587	47	240
10	0	0,8	0,25	\$59.674	233	52	\$59.696	43	238
10	0	0,8	0,25	\$59.599	242	58	\$59.623	44	243
10	0	0,8	0,25	\$59.449	232	62	\$59.548	40	243
10	0	0,8	0,25	\$59.436	207	59	\$59.602	42	250
10	0	0,8	0,25	\$59.709	252	56	\$59.812	40	231
10	0	0,8	0,25	\$59.758	221	54	\$59.788	41	239

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
10	0	0,8	0,25	\$59.639	232	50	\$59.702	43	245
10	0	0,8	0,25	\$59.654	217	53	\$59.713	40	247
10	0	0,9	0,05	\$59.481	235	32	\$59.512	27	240
10	0	0,9	0,05	\$59.435	235	34	\$59.496	27	239
10	0	0,9	0,05	\$59.470	234	30	\$59.520	28	235
10	0	0,9	0,05	\$59.480	235	32	\$59.511	27	240
10	0	0,9	0,05	\$59.499	231	31	\$59.518	27	234
10	0	0,9	0,05	\$59.453	226	39	\$59.502	27	235
10	0	0,9	0,05	\$59.476	230	36	\$59.531	27	238
10	0	0,9	0,05	\$59.462	244	33	\$59.555	27	239
10	0	0,9	0,05	\$59.503	235	28	\$59.515	31	237
10	0	0,9	0,05	\$59.467	234	32	\$59.493	29	245
10	0	0,9	0,1	\$59.668	225	45	\$59.714	34	232
10	0	0,9	0,1	\$59.611	218	43	\$59.687	37	244
10	0	0,9	0,1	\$59.658	231	46	\$59.712	35	241
10	0	0,9	0,1	\$59.591	262	52	\$59.669	36	246
10	0	0,9	0,1	\$59.595	219	53	\$59.674	36	242
10	0	0,9	0,1	\$59.581	220	47	\$59.633	38	248
10	0	0,9	0,1	\$59.708	235	45	\$59.768	35	243
10	0	0,9	0,1	\$59.726	233	47	\$59.793	34	241
10	0	0,9	0,1	\$59.692	215	45	\$59.742	36	246
10	0	0,9	0,1	\$59.716	235	50	\$59.769	38	250
10	0	0,9	0,25	\$59.592	234	61	\$59.629	51	247
10	0	0,9	0,25	\$59.496	234	67	\$59.511	53	242
10	0	0,9	0,25	\$59.621	240	65	\$59.668	49	239
10	0	0,9	0,25	\$59.483	252	71	\$59.552	48	237
10	0	0,9	0,25	\$59.408	238	64	\$59.464	53	244
10	0	0,9	0,25	\$59.391	215	55	\$59.507	50	241
10	0	0,9	0,25	\$59.647	235	60	\$59.736	48	246
10	0	0,9	0,25	\$59.690	221	63	\$59.732	48	229
10	0	0,9	0,25	\$59.576	224	69	\$59.636	50	241
10	0	0,9	0,25	\$59.594	233	64	\$59.620	48	240
10	0,5	0,7	0,05	\$59.473	256	34	\$59.562	23	244
10	0,5	0,7	0,05	\$59.420	229	32	\$59.528	22	245
10	0,5	0,7	0,05	\$59.460	228	32	\$59.567	23	235
10	0,5	0,7	0,05	\$59.483	256	30	\$59.548	23	247
10	0,5	0,7	0,05	\$59.476	232	30	\$59.567	20	244
10	0,5	0,7	0,05	\$59.437	231	39	\$59.557	20	239
10	0,5	0,7	0,05	\$59.471	232	31	\$59.571	22	243
10	0,5	0,7	0,05	\$59.468	258	29	\$59.588	22	245
10	0,5	0,7	0,05	\$59.480	245	32	\$59.582	21	245
10	0,5	0,7	0,05	\$59.462	256	36	\$59.562	20	244
10	0,5	0,7	0,1	\$59.647	238	47	\$59.783	27	237
10	0,5	0,7	0,1	\$59.604	257	45	\$59.744	29	245
10	0,5	0,7	0,1	\$59.632	261	45	\$59.776	26	236
10	0,5	0,7	0,1	\$59.589	239	43	\$59.740	30	239
10	0,5	0,7	0,1	\$59.565	251	49	\$59.768	27	244
10	0,5	0,7	0,1	\$59.584	234	44	\$59.729	29	249
10	0,5	0,7	0,1	\$59.694	257	44	\$59.832	29	249
10	0,5	0,7	0,1	\$59.721	249	46	\$59.866	29	246
10	0,5	0,7	0,1	\$59.676	229	47	\$59.820	29	246
10	0,5	0,7	0,1	\$59.697	256	47	\$59.830	28	229
10	0,5	0,7	0,25	\$59.606	231	53	\$59.756	43	246
10	0,5	0,7	0,25	\$59.483	236	62	\$59.636	38	237
10	0,5	0,7	0,25	\$59.621	240	59	\$59.754	38	243
10	0,5	0,7	0,25	\$59.497	258	62	\$59.681	43	248
10	0,5	0,7	0,25	\$59.427	242	60	\$59.604	43	246
10	0,5	0,7	0,25	\$59.381	238	66	\$59.596	42	240
10	0,5	0,7	0,25	\$59.687	253	61	\$59.851	42	247
10	0,5	0,7	0,25	\$59.651	254	65	\$59.829	41	249

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
10	0,5	0,7	0,25	\$59.573	240	65	\$59.736	46	249
10	0,5	0,7	0,25	\$59.611	245	52	\$59.745	42	250
10	0,5	0,8	0,05	\$59.421	259	50	\$59.549	27	248
10	0,5	0,8	0,05	\$59.375	258	81	\$59.514	26	249
10	0,5	0,8	0,05	\$59.407	258	54	\$59.552	26	248
10	0,5	0,8	0,05	\$59.414	261	40	\$59.540	26	249
10	0,5	0,8	0,05	\$59.427	266	36	\$59.543	24	247
10	0,5	0,8	0,05	\$59.410	261	48	\$59.520	26	248
10	0,5	0,8	0,05	\$59.404	262	38	\$59.548	26	247
10	0,5	0,8	0,05	\$59.449	260	83	\$59.570	26	243
10	0,5	0,8	0,05	\$59.436	261	43	\$59.559	26	247
10	0,5	0,8	0,05	\$59.385	281	42	\$59.537	26	247
10	0,5	0,8	0,1	\$59.569	276	57	\$59.763	30	248
10	0,5	0,8	0,1	\$59.479	295	68	\$59.727	33	250
10	0,5	0,8	0,1	\$59.532	290	58	\$59.754	31	250
10	0,5	0,8	0,1	\$59.518	288	70	\$59.706	33	248
10	0,5	0,8	0,1	\$59.488	268	74	\$59.728	30	248
10	0,5	0,8	0,1	\$59.480	282	61	\$59.709	29	245
10	0,5	0,8	0,1	\$59.593	286	55	\$59.798	31	245
10	0,5	0,8	0,1	\$59.648	282	60	\$59.842	32	244
10	0,5	0,8	0,1	\$59.499	300	63	\$59.781	33	241
10	0,5	0,8	0,1	\$59.593	292	65	\$59.812	31	250
10	0,5	0,8	0,25	\$59.457	266	88	\$59.687	45	247
10	0,5	0,8	0,25	\$59.408	268	73	\$59.576	48	243
10	0,5	0,8	0,25	\$59.497	292	77	\$59.704	46	245
10	0,5	0,8	0,25	\$59.396	252	73	\$59.615	46	240
10	0,5	0,8	0,25	\$59.289	288	84	\$59.537	45	244
10	0,5	0,8	0,25	\$59.230	265	60	\$59.552	46	238
10	0,5	0,8	0,25	\$59.523	312	68	\$59.802	44	238
10	0,5	0,8	0,25	\$59.545	277	93	\$59.759	50	244
10	0,5	0,8	0,25	\$59.450	285	75	\$59.683	45	234
10	0,5	0,8	0,25	\$59.418	291	85	\$59.692	48	244
10	0,5	0,9	0,05	\$58.200	501	81	\$59.506	28	241
10	0,5	0,9	0,05	\$58.177	501	78	\$59.494	27	233
10	0,5	0,9	0,05	\$58.196	501	115	\$59.527	26	238
10	0,5	0,9	0,05	\$58.199	501	116	\$59.513	26	239
10	0,5	0,9	0,05	\$58.203	503	82	\$59.518	27	234
10	0,5	0,9	0,05	\$58.194	501	79	\$59.502	27	235
10	0,5	0,9	0,05	\$58.216	507	116	\$59.527	28	240
10	0,5	0,9	0,05	\$58.216	507	116	\$59.555	27	239
10	0,5	0,9	0,05	\$58.212	502	103	\$59.515	31	237
10	0,5	0,9	0,05	\$58.195	501	173	\$59.502	27	240
10	0,5	0,9	0,1	\$58.267	519	115	\$59.712	35	240
10	0,5	0,9	0,1	\$58.208	507	136	\$59.625	43	250
10	0,5	0,9	0,1	\$58.243	514	122	\$59.664	44	250
10	0,5	0,9	0,1	\$58.225	514	169	\$59.669	36	246
10	0,5	0,9	0,1	\$58.216	510	85	\$59.674	36	242
10	0,5	0,9	0,1	\$58.221	510	130	\$59.628	46	250
10	0,5	0,9	0,1	\$58.243	522	103	\$59.737	37	245
10	0,5	0,9	0,1	\$58.278	523	167	\$59.793	35	242
10	0,5	0,9	0,1	\$58.245	509	112	\$59.742	36	246
10	0,5	0,9	0,1	\$58.219	512	86	\$59.769	38	250
10	0,5	0,9	0,25	\$58.332	365	514	\$59.573	57	245
10	0,5	0,9	0,25	\$58.045	487	372	\$59.461	58	250
10	0,5	0,9	0,25	\$58.116	514	370	\$59.592	57	250
10	0,5	0,9	0,25	\$58.183	487	136	\$59.467	63	249
10	0,5	0,9	0,25	\$58.083	494	150	\$59.441	56	237
10	0,5	0,9	0,25	\$58.048	502	192	\$59.483	55	246
10	0,5	0,9	0,25	\$58.192	492	418	\$59.672	60	249
10	0,5	0,9	0,25	\$58.369	483	112	\$59.696	56	240

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
10	0,5	0,9	0,25	\$58.221	467	413	\$59.555	61	250
10	0,5	0,9	0,25	\$58.009	386	600	\$59.550	58	250
10	1	0,7	0,05	\$59.337	301	46	\$59.566	22	243
10	1	0,7	0,05	\$59.282	300	47	\$59.527	24	245
10	1	0,7	0,05	\$59.308	300	49	\$59.562	23	245
10	1	0,7	0,05	\$59.289	316	42	\$59.548	22	245
10	1	0,7	0,05	\$59.339	302	40	\$59.567	20	244
10	1	0,7	0,05	\$59.313	298	58	\$59.557	20	239
10	1	0,7	0,05	\$59.314	301	44	\$59.571	22	243
10	1	0,7	0,05	\$59.347	299	71	\$59.588	22	245
10	1	0,7	0,05	\$59.342	301	46	\$59.584	21	234
10	1	0,7	0,05	\$59.312	297	58	\$59.559	21	245
10	1	0,7	0,1	\$59.400	327	63	\$59.759	30	245
10	1	0,7	0,1	\$59.289	348	57	\$59.733	32	250
10	1	0,7	0,1	\$59.309	354	61	\$59.766	31	250
10	1	0,7	0,1	\$59.339	336	76	\$59.721	30	240
10	1	0,7	0,1	\$59.276	337	46	\$59.764	29	246
10	1	0,7	0,1	\$59.296	312	89	\$59.729	29	249
10	1	0,7	0,1	\$59.499	311	58	\$59.832	29	249
10	1	0,7	0,1	\$59.559	304	63	\$59.863	30	247
10	1	0,7	0,1	\$59.319	351	74	\$59.820	29	246
10	1	0,7	0,1	\$59.403	341	71	\$59.830	31	250
10	1	0,7	0,25	\$59.373	313	74	\$59.717	46	248
10	1	0,7	0,25	\$58.995	377	87	\$59.618	45	246
10	1	0,7	0,25	\$59.273	345	91	\$59.712	45	245
10	1	0,7	0,25	\$59.266	313	83	\$59.634	45	246
10	1	0,7	0,25	\$59.214	322	88	\$59.573	45	250
10	1	0,7	0,25	\$59.118	319	98	\$59.574	50	247
10	1	0,7	0,25	\$59.471	314	81	\$59.823	45	242
10	1	0,7	0,25	\$59.339	348	85	\$59.823	48	250
10	1	0,7	0,25	\$59.311	327	90	\$59.705	46	239
10	1	0,7	0,25	\$59.211	348	81	\$59.713	50	250
10	1	0,8	0,05	\$58.623	444	62	\$59.548	26	249
10	1	0,8	0,05	\$58.585	441	102	\$59.514	26	249
10	1	0,8	0,05	\$58.617	442	80	\$59.552	26	248
10	1	0,8	0,05	\$58.613	441	80	\$59.532	27	250
10	1	0,8	0,05	\$58.623	443	99	\$59.543	24	247
10	1	0,8	0,05	\$58.607	443	113	\$59.524	25	243
10	1	0,8	0,05	\$58.628	443	86	\$59.548	26	247
10	1	0,8	0,05	\$58.649	444	95	\$59.570	26	243
10	1	0,8	0,05	\$58.630	443	74	\$59.559	26	247
10	1	0,8	0,05	\$58.617	442	111	\$59.542	26	243
10	1	0,8	0,1	\$58.747	453	82	\$59.763	30	248
10	1	0,8	0,1	\$58.649	445	92	\$59.727	33	250
10	1	0,8	0,1	\$58.699	449	303	\$59.754	31	250
10	1	0,8	0,1	\$58.694	451	165	\$59.703	34	250
10	1	0,8	0,1	\$58.692	450	114	\$59.727	31	249
10	1	0,8	0,1	\$58.654	446	78	\$59.696	33	250
10	1	0,8	0,1	\$58.734	456	82	\$59.798	31	245
10	1	0,8	0,1	\$58.793	455	91	\$59.836	32	250
10	1	0,8	0,1	\$58.682	446	194	\$59.791	31	247
10	1	0,8	0,1	\$58.644	444	217	\$59.812	31	250
10	1	0,8	0,25	\$58.529	457	106	\$59.623	51	249
10	1	0,8	0,25	\$58.448	441	114	\$59.514	54	245
10	1	0,8	0,25	\$58.500	450	309	\$59.633	54	250
10	1	0,8	0,25	\$58.465	429	136	\$59.519	60	250
10	1	0,8	0,25	\$58.189	490	371	\$59.451	55	247
10	1	0,8	0,25	\$58.377	436	198	\$59.485	54	250
10	1	0,8	0,25	\$58.595	468	237	\$59.771	48	250
10	1	0,8	0,25	\$58.499	483	148	\$59.715	53	246

n	alfa	rô	cv	Sequência flexível			Sequência fixa		
				Resultado	Q	R	Resultado	s	S
10	1	0,8	0,25	\$58.233	497	201	\$59.611	51	232
10	1	0,8	0,25	\$58.388	473	375	\$59.632	52	246
10	1	0,9	0,05	\$55.834	835	232	\$59.503	28	246
10	1	0,9	0,05	\$55.835	822	99	\$59.494	27	233
10	1	0,9	0,05	\$55.846	818	136	\$59.523	27	239
10	1	0,9	0,05	\$55.850	831	91	\$59.511	27	240
10	1	0,9	0,05	\$55.842	835	172	\$59.518	27	234
10	1	0,9	0,05	\$55.838	822	133	\$59.502	27	235
10	1	0,9	0,05	\$55.842	834	160	\$59.531	27	238
10	1	0,9	0,05	\$55.839	822	220	\$59.555	27	239
10	1	0,9	0,05	\$55.843	822	220	\$59.515	31	237
10	1	0,9	0,05	\$55.843	822	138	\$59.502	27	240
10	1	0,9	0,1	\$55.855	822	126	\$59.716	33	242
10	1	0,9	0,1	\$55.960	582	582	\$59.674	36	230
10	1	0,9	0,1	\$55.869	832	283	\$59.635	42	250
10	1	0,9	0,1	\$55.871	823	154	\$59.669	36	246
10	1	0,9	0,1	\$55.857	836	267	\$59.674	36	242
10	1	0,9	0,1	\$55.859	807	265	\$59.635	34	245
10	1	0,9	0,1	\$55.862	818	255	\$59.671	36	210
10	1	0,9	0,1	\$55.868	822	116	\$59.791	33	228
10	1	0,9	0,1	\$55.866	818	254	\$59.742	36	246
10	1	0,9	0,1	\$55.955	572	728	\$59.769	38	250
10	1	0,9	0,25	\$56.829	516	566	\$59.435	190	190
10	1	0,9	0,25	\$55.960	579	768	\$59.368	181	181
10	1	0,9	0,25	\$55.821	776	151	\$59.530	59	249
10	1	0,9	0,25	\$56.118	763	220	\$59.404	71	184
10	1	0,9	0,25	\$56.176	435	501	\$59.392	62	250
10	1	0,9	0,25	\$56.556	451	542	\$59.343	64	228
10	1	0,9	0,25	\$55.926	605	740	\$59.660	57	246
10	1	0,9	0,25	\$56.123	610	1021	\$59.551	61	212
10	1	0,9	0,25	\$55.826	801	348	\$59.466	181	181
10	1	0,9	0,25	\$56.562	537	715	\$59.497	61	237