

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NATHÁLIA CRISTINA ORTIZ DA SILVA

**APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DO MAKESPAN DEVIDO À
INSERÇÃO E/OU DESISTÊNCIA DE TAREFAS NO PROBLEMA DE
SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO EM UMA MÁQUINA**

CURITIBA

2016

NATHÁLIA CRISTINA ORTIZ DA SILVA

**APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DO MAKESPAN DEVIDO À
INSERÇÃO E/OU DESISTÊNCIA DE TAREFAS NO PROBLEMA DE
SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO EM UMA MÁQUINA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, área de concentração Programação Matemática, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin
Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Pécora Júnior

CURITIBA

2016

Silva, Nathália Cristina Ortiz da

Aplicação de simulação para análise do makespan devido à inserção e/ou desistência de tarefas no problema de sequenciamento de produção em uma máquina / Nathália Cristina Ortiz da Silva. – Curitiba, 2016.

108 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientador: Cassius Tadeu Scarpin

Coorientador: José Eduardo Pécora Júnior

Bibliografia: p. 75-77

1. Sequências (Matemática). 2. Simulação por computador.
3. Máquinas - Indústria. I. Scarpin, Cassius Tadeu. II. Pécora Júnior, José Eduardo. III. Título.

CDD 515

TERMO DE APROVAÇÃO

NATHÁLIA CRISTINA ORTIZ DA SILVA

APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DO MAKESPAN DEVIDO À
INSERÇÃO E/OU DESISTÊNCIA DE TAREFAS NO PROBLEMA DE
SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO EM UMA MÁQUINA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin
Orientador - Membro do PPGMNE/UFPR.



Prof. Dr. Leandro Magatão
Membro da UTFPR – Curitiba/PR



Prof. Dr. Thiago André Guimarães
Membro da FAEPR

por video conferencia 

Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch
Membro do PPGMNE/UFPR

Curitiba, 17 de fevereiro de 2016

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família: meu pai Airton, minha mãe Vera e meu irmão Juliano, que sempre estiveram ao meu lado para me dar todo o apoio necessário para seguir em frente. Agradeço por todo o esforço que eles fizeram para que eu chegasse até aqui e, principalmente, por tudo o que me ensinaram.

Agradeço aos meus tios e às minhas primas-irmãs, que me ajudaram com as dificuldades de morar fora e fizeram com que eu me sentisse em casa.

Ao meu professor orientador Cassius, que me incentivou a buscar uma área na qual eu me realizasse e que sempre acreditou no meu potencial. Agradeço por toda a força deste ano.

Ao meu coorientador Pécora, que me ajudou a manter a calma e encarar o mestrado como uma evolução pessoal.

A todos os funcionários e professores do PPGMNE, em especial àqueles com quem eu tive a oportunidade de conviver e receber um pouco dos seus ensinamentos.

Aos meus colegas de mestrado, em especial: Deidson, Dayane, Aline, Tamara, Carol, Ricardo e Maria Carolina. Obrigada por todos os momentos de descontração, pelo apoio, pela força e, principalmente, por ficarem no CESEC até altas horas comigo e não desistirem de programação computacional.

A família que eu ganhei de presente neste último ano. Agradeço a todos do GTA0 por contribuírem de alguma forma, com esse momento. Em especial gostaria de agradecer à Eliete, Matheus, Guilherme, Josias, Bruno e as minhas lindas, Kellen, Tamires e Talita. Graças a vocês, o mestrado se tornou mais leve.

Agradeço às amigas que, mesmo de longe, me ajudaram, e muito, a manter a disposição e a força de vontade. Fernanda, Juliana, Maria Claudia, Paula, Carol, Thaís e Ana, obrigada por tudo!

A CAPES, pelo apoio financeiro.

A Deus, por guiar minha vida.

RESUMO

A necessidade de aproximar modelos encontrados na literatura a sistemas dinâmicos tem motivado grande parte das pesquisas recentes. O presente trabalho aborda o problema de sequenciamento de produção em uma única máquina com o objetivo minimizar o instante de término de processamento de todas as tarefas neste sistema produtivo, ou seja, minimizar o *makespan*. Neste processo, a geração de novos eventos que ocorram durante o sequenciamento representa a aleatoriedade constatada em problemas reais de produção. Os eventos citados podem ser classificados em tarefas a serem reinseridas no processo de acordo com a ocorrência de novos pedidos ou desistência de pedidos por decisão dos clientes. Uma simulação é criada para tal procedimento. Nele, características como quais tarefas serão reavaliadas ao longo do sequenciamento e em que momento as mesmas ocorrem são consideradas dados estocásticos. A partir destas informações, a simulação é aplicada a um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP) e também a heurísticas, cujos resultados são comparados ao encontrado no modelo exato. Cinco cenários foram criados para tal avaliação: apenas inserções, mais inserções do que desistências, chegadas e saídas de pedidos em uma mesma proporção, mais desistências do que inserções e, por fim, apenas desistências. Os testes computacionais foram implementados em *Visual Basic Studio* e obtidos pelo *software* CPLEX. As respostas obtidas mostram que o conjunto de modelos exatos de cada teste gerado, fornece o melhor resultado dentre os métodos propostos para todos os testes realizados.

Palavras-Chave: Minimização do *makespan*. Re-sequenciamento em uma única máquina. Simulação. Inserção e/ou desistência de novos pedidos.

ABSTRACT

The need to approximate models found in literature to dynamic systems has motivated a large part of recent researches. This paper addresses the production-scheduling problem on a single machine in order to minimize the total processing time of all tasks in this production system, called makespan. In this process, the generation of events that occur during sequencing, represents the randomness observed in real production problems. The mentioned events can be classified into tasks to be reinserted in the process according to new orders, or withdrawal of requests by customer decision. A simulation is created for such procedure. In it, variables such as which tasks will be reassessed throughout the sequence and at what time they occur are considered stochastic data. From this information, the simulation is applied to a Mixed Integer Linear Programming model (MILP) and some heuristics, whose results are compared to that found in the exact model. Five scenarios were designed for this evaluation: Only inserts, more inserts than withdrawals, arrival and departure of requests in balance, more withdrawals than insertions and, finally, only withdrawals. The computational tests were implemented in *Visual Basic Studio* and optimized using the CPLEX software. The responses show that the set of the exact models of each generated test provides the best results among the proposed methods for all the tests.

Keywords: Makespan minimization. Rescheduling in a Single Machine. Simulation. Insertion and/or withdrawal of new orders.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - AMBIENTES DE PRODUÇÃO	23
FIGURA 2 - PROBLEMAS DE SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO E DE TRANSPORTE.....	39
FIGURA 3 - SEQUENCIAMENTO INICIAL.....	44
FIGURA 4 - APLICAÇÃO DO(S) EVENTO(S) GERADO(S) NA SIMULAÇÃO..	44
FIGURA 5 - ACRÉSCIMO DO(S) EVENTO(S) GERADO(S)	44
FIGURA 6 - ALOCAÇÃO DO(S) EVENTO(S) INSERIDO(S) NO SEQUENCIAMENTO	45
FIGURA 7 - RETIRADA DO(S) EVENTO(S) GERADO(S).....	45
FIGURA 8 - REALOCAÇÃO DAS TAREFAS RESTANTES NO SEQUENCIAMENTO	45
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO PROPOSTO	46
FIGURA 10 - EXEMPLO DO PROBLEMA DE PRODUÇÃO ABORDADO.....	47
FIGURA 11 - APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA 1.....	48
FIGURA 12 - APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA 2.....	49
FIGURA 13 - APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA 3.....	49
FIGURA 14 - APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA 4.....	50
FIGURA 15 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 1	53
FIGURA 16 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 1	54
FIGURA 17 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 2	57
FIGURA 18 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 2	58
FIGURA 19 - QUANTIDADE DE TAREFAS AO FIM DO SEQUENCIAMENTO – CENÁRIO 2	58
FIGURA 20 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 3.....	61
FIGURA 21 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 3.....	62
FIGURA 22 - QUANTIDADE DE TAREFAS AO FIM DO SEQUENCIAMENTO – CENÁRIO 3	62
FIGURA 23 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 4	65
FIGURA 24 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 4.....	65
FIGURA 25 - QUANTIDADE DE TAREFAS AO FIM DO SEQUENCIAMENTO – CENÁRIO 4	66
FIGURA 26 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO À HEURÍSTICA – CENÁRIO 5.....	68
FIGURA 27 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO À HEURÍSTICA – CENÁRIO 5.....	69
FIGURA 28 - QUANTIDADE DE TAREFAS AO FIM DO SEQUENCIAMENTO – CENÁRIO 5	69
FIGURA 29 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 8 TAREFAS - CENÁRIO 1	79

FIGURA 80 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 100 TAREFAS - CENÁRIO 4 ...	92
FIGURA 81 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 8 TAREFAS - CENÁRIO 5	92
FIGURA 82 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 10 TAREFAS - CENÁRIO 5	93
FIGURA 83 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 12 TAREFAS - CENÁRIO 5	93
FIGURA 84 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 15 TAREFAS - CENÁRIO 5	93
FIGURA 85 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 20 TAREFAS - CENÁRIO 5	93
FIGURA 86 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 30 TAREFAS - CENÁRIO 5	94
FIGURA 87 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 40 TAREFAS - CENÁRIO 5	94
FIGURA 88 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 50 TAREFAS - CENÁRIO 5	94
FIGURA 89 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 60 TAREFAS - CENÁRIO 5	94
FIGURA 90 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 70 TAREFAS - CENÁRIO 5	95
FIGURA 91 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 80 TAREFAS - CENÁRIO 5	95
FIGURA 92 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 90 TAREFAS - CENÁRIO 5	95
FIGURA 93 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> PARA 100 TAREFAS - CENÁRIO 5 ...	95
FIGURA 94 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1	97
FIGURA 95 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 20% A 25% DE INSERÇÕES – CENÁRIO 1	97
FIGURA 96 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 25% A 30% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1	98
FIGURA 97 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 30% A 35% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1	98
FIGURA 98 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 35% A 40% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1	98
FIGURA 99 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 40% A 45% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1	99
FIGURA 100 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 45% A 50% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1	99
FIGURA 101 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2.....	99
FIGURA 102 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 20% A 25% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2.....	100
FIGURA 103 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 25% A 30% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2.....	100
FIGURA 104 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 30% A 35% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2.....	100
FIGURA 105 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 35% A 40% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2.....	101

FIGURA 106 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 40% A 45% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2.....	101
FIGURA 107 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 45% A 50% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2.....	101
FIGURA 108 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3.....	102
FIGURA 109 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 20% A 25% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3.....	102
FIGURA 110 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 25% A 30% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3.....	102
FIGURA 111 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 30% A 35% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3.....	103
FIGURA 112 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 35% A 40% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3.....	103
FIGURA 113 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 40% A 45% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3.....	103
FIGURA 114 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 45% A 50% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3.....	104
FIGURA 115 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4.....	104
FIGURA 116 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 20% A 25% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4.....	104
FIGURA 117 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 25% A 30% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4.....	105
FIGURA 118 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 30% A 35% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4.....	105
FIGURA 119 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 35% A 40% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4.....	105
FIGURA 120 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 40% A 45% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4.....	106
FIGURA 121 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 45% A 50% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4.....	106

FIGURA 122 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5	106
FIGURA 123 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 20% A 25% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5	107
FIGURA 124 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 25% A 30 % DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5	107
FIGURA 125 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 30% A 35% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5	107
FIGURA 126 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 35% A 40% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5	108
FIGURA 127 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 40% A 45% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5	108
FIGURA 128 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 45% A 50% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5	108

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA O PROCEDIMENTO.....	52
TABELA 2 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 1	55
TABELA 3 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 1	56
TABELA 4 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 2	59
TABELA 5 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 2	60
TABELA 6 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 3	63
TABELA 7 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 3	64
TABELA 8 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 4	66
TABELA 9 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 4	67
TABELA 10 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 5	70
TABELA 11 - ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 5	71

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - REGRAS DE PRIORIDADE	25
QUADRO 2 - CONCEITOS DE PROBLEMAS DE SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO E DE TRANSPORTE	39
QUADRO 3 - QUANTIDADE DE TAREFAS INICIAIS E O NÚMERO DE EVENTOS CRIADOS.....	43
QUADRO 4 - DADOS DE ENTRADA PARA A GERAÇÃO DE EVENTOS.....	47
QUADRO 5 - EXEMPLO DE COMBINAÇÃO DOS EVENTOS GERADOS.....	51
QUADRO 6 - CENÁRIOS PROPOSTOS.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	18
1.4	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	21
2.1	PROBLEMAS DE SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO	22
2.1.1	Ambientes de Produção	22
2.1.2	Indicadores de Otimização de Produção	24
2.1.3	Regras de Prioridade	25
2.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	25
2.2.1	Classificação de Sistemas de Simulação	27
2.2.2	Construção de um Modelo de Simulação	28
2.2.3	Distribuição de Probabilidade para um Sistema de Simulação	29
3	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	31
3.1	TRABALHOS CORRELATOS	31
3.1.1	Problemas de sequenciamento com deterioração de trabalhos ou efeito de aprendizagem	32
3.1.2	Problemas de sequenciamento com multi-critérios	33
3.1.3	Outros Trabalhos Relevantes	34
4	METODOLOGIA PROPOSTA	37
4.1	MODELO MATEMÁTICO	37
4.1.1	Formulação Matemática: Minimização do <i>Makespan</i>	37
4.1.2	Reformulação Matemática: Minimização do <i>Makespan</i> usando Conceitos de Transporte	40
4.2	MODELO DE SIMULAÇÃO APLICADO	41
4.2.1	Geração dos Eventos	41
4.2.2	Criação de um Fluxograma para o Processo de Produção	43
4.2.3	Verificação e Validação da Simulação	47
4.3	HEURÍSTICAS PARA OS NOVOS PEDIDOS	48
4.3.1	Heurística 1 (H1): Heurística de Antecipação dos Novos Pedidos	48
4.3.2	Heurística 2 (H2): Heurística de Prorrogação dos Novos Pedidos	49
4.3.3	Heurística 3 (H3): Heurística de Melhor Posição para os Novos Pedidos	49
4.3.4	Heurística 4 (H4): Heurística de Desistência dos Novos Pedidos	49
5	RESULTADOS	51
5.1	RESULTADOS OBTIDOS	51
5.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
5.2.1	Cenário 1: Apenas Chegadas de Pedidos	53
5.2.2	Cenário 2: Mais Chegadas do que Saídas de Pedidos	57
5.2.3	Cenário 3: Chegadas e Saídas em equilíbrio	61
5.2.4	Cenário 4: Mais Saídas do que Chegadas de Pedidos	65
5.2.5	Cenário 5: Apenas Saídas de Pedidos	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
6.1	CONCLUSÃO	72
6.2	DISCUSSÃO SOBRE TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

APÊNDICE 1 – GRÁFICOS DO ACRÉSCIMO DE <i>SETUP</i> AO FINAL DO SEQUENCIAMENTO	78
APÊNDICE 2 – GRÁFICOS DO ACRÉSCIMO DO <i>SETUP</i> DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO <i>SETUP</i> DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS	96

1 INTRODUÇÃO

O Planejamento e Controle de Produção (PCP) consiste em um procedimento responsável por gerenciar um ambiente produtivo. A garantia de bons resultados está ligada a três funções do PCP: o planejamento, a programação e o controle do processo de produção como um todo (TUBINO, 2007).

Este processo possui extrema importância no mercado atual, visto que, cada vez mais, as empresas procuram estabelecer metas de produtividade e qualidade que garantam resultados favoráveis para o estabelecimento e para seus clientes.

Segundo Tubino (2007), define-se na programação da produção a quantidade e o período necessários para a compra, a fabricação e a montagem de cada item para a composição dos produtos propostos pelo planejamento.

As decisões de programação ajudam a reduzir os custos de produção sem deixar de atender às necessidades dos clientes (ALLAHVERDI *et al.*, 2014). O sequenciamento é uma das principais decisões responsáveis pela diminuição de gastos e geração de bons resultados para o procedimento.

O ambiente escolhido, no presente trabalho, para a realização de um sequenciamento de produção é dado por uma única máquina. Existem três pontos da literatura de PCP em uma única máquina que são de interesse para o problema abordado. Em primeiro lugar, o sequenciamento realizado avalia o tempo de preparação da máquina em relação a cada tarefa designada a uma posição, ou seja, o *setup* depende da sequência realizada pelos trabalhos. Em segundo lugar, a programação tem o objetivo de minimizar o *makespan* da produção. Em terceiro lugar, o processo realiza uma simulação a partir da geração de novos eventos (inserções e/ou retiradas de tarefas) ocorridos durante o sequenciamento.

Com a geração de novos eventos no decorrer do procedimento é preciso executar um novo sequenciamento a cada entrada/saída de tarefas, de acordo com o pedido modificado pelo cliente. Os tempos destes eventos ocorrem de maneira aleatória, bem como quais tarefas serão reavaliadas no processo de produção.

A aleatoriedade trazida pelas variáveis de entrada, juntamente com a quantidade de cenários que podem ser criados para o problema, tornam a simulação a melhor ferramenta para a análise de possíveis acontecimentos. Além disso, a simulação permite verificar a solução de um problema com que os operadores trabalhem diretamente (FREITAS Filho, 2008).

1.1 OBJETIVO GERAL

Durante a realização do sequenciamento em um sistema de produção, notam-se as diferenças existentes entre o planejamento desse sistema produtivo e o que acontece, de fato, no caso real.

Deste modo, o objetivo geral do trabalho é:

- Minimizar o *makespan* para o ambiente de uma única máquina em um sistema dinâmico, no qual o tempo de preparação do equipamento depende da sequência estabelecida pelas tarefas a serem processadas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Gerar novos eventos (inserção de novos pedidos ou desistências dos já existentes) informados pelos clientes durante o processo de sequenciamento de produção;
- Construir um modelo matemático que descreva o problema proposto, adaptando aquele a cada novo evento gerado, conforme os dados existentes;
- Implementar uma simulação que represente cenários o mais próximo possível da realidade encontrada nos estabelecimentos de produção;
- Analisar a reprogramação do sequenciamento de produção com base nos eventos inseridos e/ou retirados;
- Criar heurísticas que facilitem a transformação do sequenciamento a partir da geração de novos eventos;
- Comparar os resultados obtidos no conjunto de modelos matemáticos e os resultados encontrados nas heurísticas de re-sequenciamento.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Os problemas de produção são considerados de alto nível de complexidade por estarem relacionados, em sua maioria, a ambientes estocásticos. A variabilidade no processo de produção - relativa aos tempos de chegada dos pedidos dos

clientes, de preparação das máquinas, de produção do item, entre outros fatores - reforça a diversidade encontrada nestes meios.

Segundo Georgiadis e Michaloudis (2012), cancelamentos ou adições de novas encomendas, mudanças na prioridade dos pedidos, atrasos de processamento e falhas nas máquinas são exemplos de eventos que pedem por mecanismos eficazes de PCP em tempo real para identificar as mudanças nos planos de produção e para fornecer medidas corretivas.

Sendo assim, a pesquisa proposta neste trabalho se fundamenta pela necessidade e importância da aproximação dos modelos encontrados na literatura a sistemas reais, que recebam monitoramento contínuo, de modo que estes possam atuar de maneira significativa no processo de ajuste do estado do sistema tradicional de PCP para o estado de um sistema dinâmico desejado.

1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Em virtude da natureza combinatorial dos problemas de sequenciamento de produção, nota-se que os modelos clássicos de sequenciamento em uma única máquina, com o aumento do número de tarefas a serem processadas, consomem um excessivo tempo computacional ou até mesmo conduzem à falta de memória do computador, dificultando a obtenção de respostas satisfatórias. Sendo assim, o estudo limita-se à minimização do *makespan* em uma máquina.

Outra limitação do trabalho se refere ao fato de a simulação não ter sido aplicada a outros ambientes de produção, como o *flow shop* e o *job shop*, podendo ser analisados em estudos posteriores.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte forma:

- CAPÍTULO 2: apresenta a descrição integral do problema. Inicialmente, faz-se uma breve menção sobre o método de Planejamento e Controle de Produção (PCP), juntamente com os três níveis considerados em um sistema de produção: o longo, o médio e o curto prazo. Neste último nível, apresenta-se o sequenciamento de produção, objeto do presente estudo. Ao adentrar nesta decisão da programação de produção, cita-se os principais ambientes de produção nos quais as tarefas serão

processadas, bem como os critérios de otimização frequentemente encontrados em trabalhos da literatura. Além disso, as heurísticas determinadas pelas Regras de Prioridades são apresentadas. Para finalizar este capítulo, aponta-se noções de simulação, conceito fundamental para implementação deste trabalho;

- CAPÍTULO 3: aponta uma breve revisão de literatura ao longo do tempo. A princípio, apresentam-se trabalhos correlatos ao tema central de estudo: a minimização do *makespan*, ou tempo total de conclusão dos trabalhos, em uma única máquina. Em seguida, acrescentam-se trabalhos relacionados à inclusão e/ou desistência de tarefas ao longo do sequenciamento, assim como trabalhos sobre re-sequenciamento de produção;

- CAPÍTULO 4: retrata a metodologia do problema. Inicia-se com a descrição do problema clássico de minimização do *makespan* e, em seguida, sua reformulação é realizada. A esquematização da simulação, juntamente com cada um de seus passos, é descrita e exposta por meio de um fluxograma. Por fim, as heurísticas desenvolvidas para os casos de novos eventos aplicados em um sequenciamento são elencadas e executadas a cargo de comparação com a simulação descrita anteriormente;

- CAPÍTULO 5: implementa-se a metodologia desenvolvida mediante testes computacionais gerados aleatoriamente por meio de instâncias adaptadas da literatura. Os resultados obtidos são apresentados, comparados e discutidos neste capítulo;

- CAPÍTULO 6: descreve as conclusões e discute as sugestões para trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O procedimento utilizado para gerenciar as atividades realizadas em um processo de produção é conhecido como Planejamento e Controle de Produção (PCP). Este processo busca minimizar os custos de produção, reduzir atrasos e/ou adiantamentos no sistema produtivo, diminuir os estoques e conter ociosidades, satisfazendo as demandas exigidas pelos clientes, de acordo com a capacidade de recursos disponíveis para tal produção.

Segundo Tubino (2009), um sistema produtivo transforma entradas (matéria-prima) em saídas (produtos), de acordo com a necessidade dos clientes. Para que isto ocorra sem causar danos às empresas, o sistema é elaborado em termos de prazos, que devem ser viáveis tanto aos fornecedores quanto às demandas dos consumidores.

Um sistema produtivo se torna eficiente quando opera sistematicamente nos níveis hierárquicos de planejamento e controle das atividades, evitando desencontros entre os mesmos. De modo geral, pode-se dividir o horizonte de planejamento de um sistema produtivo em três níveis: o longo, o médio e o curto prazo. De acordo com Tubino (2009) e Arenales *et al.* (2015), os níveis de PCP são definidos a seguir:

- Longo Prazo (nível estratégico): neste nível, o sistema produtivo desenvolve um Plano de Produção responsável por elencar máquinas e outros equipamentos para que, de acordo com a capacidade destes, o sistema possa atender à demanda futura de seus clientes;
- Médio Prazo (nível tático): representa o planejamento das atividades para que o sistema estruturado por meio de um Plano de Produção opere de forma mais eficiente. Este nível é composto por dois subníveis: Planejamento Agregado da Produção e Planejamento de Quantidades de Produção. O primeiro trata de decisões como utilização de mão de obra, definição de horas extras e subcontratações. Já o segundo determina quando e quanto produzir de cada produto;
- Curto Prazo (nível operacional): realiza as atividades diárias de acordo com os pedidos de produção procedentes do nível tático. Alocação de tarefas a máquinas e programação da produção das tarefas em cada máquina são exemplos de decisões processadas neste nível.

2.1 PROBLEMAS DE SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO

Segundo Lustosa *et al.* (2008), os problemas de sequenciamento de produção representam uma das decisões mais importantes abordadas pela programação da produção .

De acordo com Bartosiewicz Netto (2014), os problemas de sequenciamento de produção determinam uma ordem (sequência) em que as tarefas (itens) - dentre as disponíveis para o processamento - devem ser executadas em uma determinada máquina, e em que momento este sequenciamento deve ser realizado.

2.1.1 Ambientes de Produção

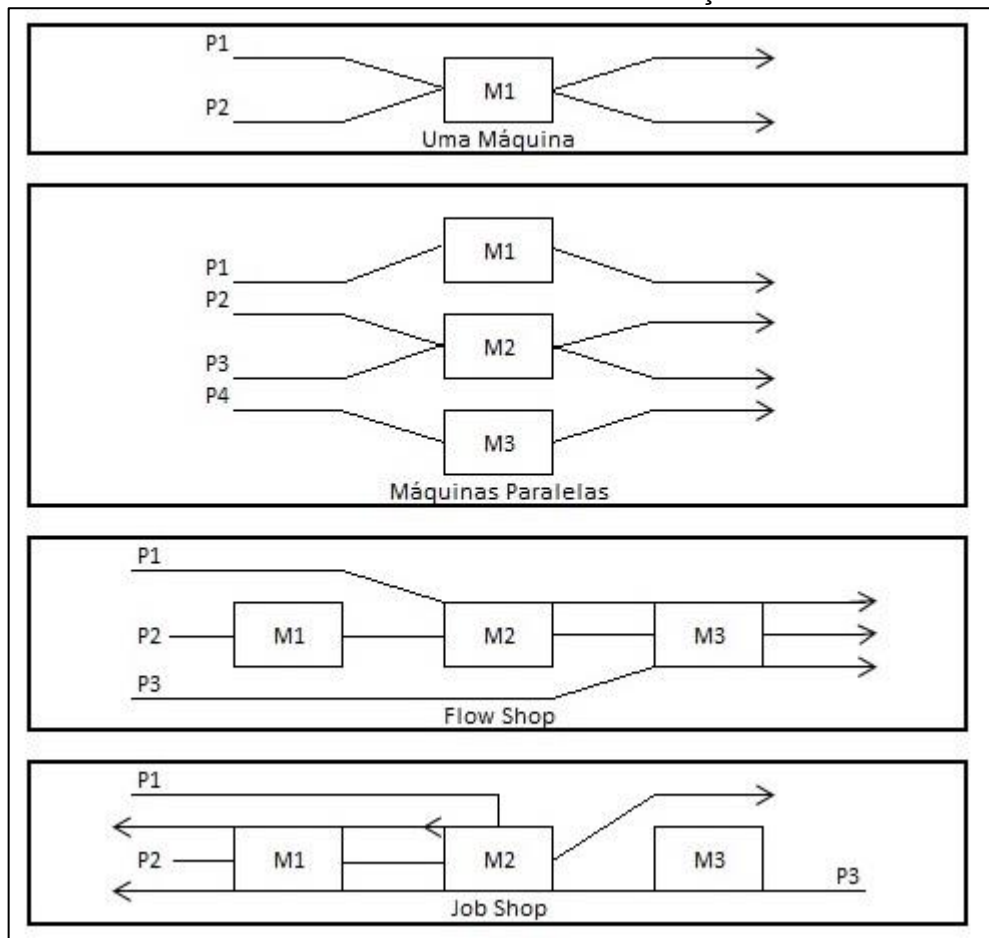
Para abordar problemas de sequenciamento de produção, segundo Pinedo (2012), existem cinco ambientes nos quais as tarefas poderão ser processadas:

- Uma única máquina (*Single Machine*): considera-se que todas as n tarefas são executadas em uma única máquina. Por mais que este seja o ambiente mais simples dentre os tipos de sequenciamentos relacionados, o procedimento realizado em uma única máquina possui caráter combinatorial, fazendo com que o aumento do número de tarefas a serem processadas aumente consideravelmente o número de sequenciamentos possíveis;
- Máquinas paralelas (*Parallel Machine*): trata-se de uma generalização do caso anterior. Nesta configuração, todas as n tarefas podem ser processadas em qualquer uma das m máquinas, as quais podem ser idênticas ou não;
- *Flow Shop*: assume-se que as n tarefas possuem a mesma ordem de processamento em todas as máquinas. Este ambiente de produção pode ainda ser dividido em duas outras categorias: *Flow Shop* Permutacional e *Flow Shop* Geral. Naquele todas as n tarefas devem ser efetuadas por todas as m máquinas, enquanto neste é possível que algumas tarefas não passem por certas máquinas ao longo da linha, mas o sentido do fluxo deve ser mantido;
- *Open Shop*: sistema intermediário entre o *Flow Shop* e o *Job Shop*. Caracteriza-se pela indefinição de fluxo de processamento das tarefas, ou seja, a sequência na qual as tarefas são executadas nas máquinas é arbitrária e geralmente representa pedidos feitos sob encomenda;

- *Job Shop*: representa o ambiente mais complexo do sequenciamento de produção. Neste caso, as n tarefas têm sua própria ordem de processamento nas m máquinas, ou seja, cada tarefa que será processada nas máquinas possui uma rota específica.

A seguir, a FIGURA 1 apresenta um exemplo das principais configurações dos ambientes de produção, onde P_i representa o pedido (tarefa) i e M_j denota a máquina j na qual será efetuado o sequenciamento.

FIGURA 1 - AMBIENTES DE PRODUÇÃO



FONTE: A autora (2016).

Os problemas de sequenciamento de produção supracitados são considerados do tipo *NP-hard* (Cheng e Ding, 1999), ou seja, são problemas cujo tempo computacional despendido é não polinomial. Dentre os tipos de ambientes relatados, o presente estudo trata de problemas de sequenciamento de produção em uma única máquina.

2.1.2 Indicadores de Otimização de Produção

Além de analisar as classificações dos ambientes produtivos é possível avaliar indicadores que otimizem a programação da produção. De acordo com Arenales *et al.* (2015) e Baker e Trietsch (2009), os principais critérios a serem analisados em um sequenciamento são definidos como segue:

- *Makespan*: é o instante de término de processamento de todas as tarefas em um sistema de produção;
- Atraso Máximo (*Tardiness* Máximo): representa a maior diferença entre o instante de término de uma tarefa e a previsão de sua data de entrega, caso este valor seja positivo. Caso contrário, assume valor nulo;
- Adiantamento Máximo (*Earliness* Máximo): representa a maior diferença entre data de entrega de uma tarefa e o instante em que a mesma é finalizada no processo produtivo, desde que este valor seja positivo. Caso contrário, assume valor nulo;
- *Lateness* Máximo: representa a maior diferença entre o instante de término de uma tarefa e sua data de entrega estabelecida;
- *Lateness* Total: refere-se à soma da diferença entre instante de término de cada tarefa e sua data de entrega;
- Número de Tarefas Atrasadas: é a quantidade de tarefas que não cumprem o prazo de entrega previsto.

Outro aspecto abordado nesta pesquisa e que pode ser considerado em um sequenciamento de produção é o tempo de preparação de uma máquina (*setup*) - dependente da sequência ou não.

- Tempo de preparação não dependente da sequência: é um tempo fixo (para cada tarefa) de que a máquina necessita (para limpeza, para reparação, etc.) antes do início de um sequenciamento;
- Tempo de preparação dependente da sequência: refere-se ao tempo de preparação de uma máquina, no qual a sequência em que as tarefas serão efetuadas na programação interfere na otimização decorrente.

2.1.3 Regras de Prioridade

Muitas vezes, a solução ótima dos problemas de sequenciamento de produção consome demasiado tempo computacional, principalmente quando a(s) máquina(s) deve(m) processar um grande número de tarefas. Nestes casos é comum fazer o uso de Regras de Prioridade, definidas por Tubino (2008) como heurísticas usadas para selecionar quais das tarefas ainda precisam ser processadas e terão prioridade no processamento.

As principais Regras de Prioridade encontradas na literatura estão definidas no QUADRO 1, a seguir:

QUADRO 1 - REGRAS DE PRIORIDADE

SIGLA	ESPECIFICAÇÃO	DEFINIÇÃO
PEPS (FIFO)	Primeira a Entrar, Primeira a Sair (<i>First In, First Out</i>)	O processamento ocorre de acordo com a ordem de chegada do seu pedido.
MTP (SPT)	Menor Tempo de Processamento (<i>Shortest Processing Time</i>)	O sequenciamento acontece de acordo com o menor tempo de processamento das tarefas.
MTP (LPT)	Maior Tempo de Processamento (<i>Longest Processing Time</i>)	As tarefas são programadas a partir do maior tempo de processamento.
MDE (EDD)	Menor Data de Entrega (<i>Earliest Due Date</i>)	A produção é realizada conforme a data de entrega mais próxima.
IP	Índice de Prioridade	O processamento é feito de acordo com o valor da prioridade atribuída ao cliente ou ao produto.
TFM (MST)	Tempo de Folga Mínimo (<i>Minimum Slack Time</i>)	As tarefas são sequenciadas pelo menor tempo de folga, ou seja, pela menor diferença entre a data de entrega e o tempo de processamento.
RC (CR)	Razão Crítica (<i>Critical Ratio</i>)	As tarefas são processadas segundo o menor tempo remanescente, isto é, a menor diferença entre a data de entrega e a data corrente.

FONTE: Adaptado de LUSTOSA *et al.* (2008).

2.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Segundo Kelton *et al.* (2001), uma simulação é definida por métodos e aplicações tendo como finalidade reconstituir o comportamento de um sistema.

Como a realização de experimentos e análises de sistemas pode se tornar muito difícil ou até mesmo impossível em uma situação real, opta-se por construir um modelo que represente o sistema e nele sejam realizados os testes necessários.

De acordo com Loch (2010), a representação do sistema é dada por um modelo físico ou matemático. Em um modelo físico cria-se uma cópia do sistema real em menores proporções (maquetes, por exemplo) e nela realizam-se os testes previstos. Por mais que este modelo seja útil para avaliar o comportamento do sistema, ele pode gerar muitos custos em algumas situações. No caso de um modelo matemático, as análises são efetivadas por meio de equações matemáticas e/ou por programação computacional.

Ainda segundo Loch (2010), o modelo matemático pode ser solucionado com base na formulação analítica, proporcionando a solução exata do problema. A resolução de um problema de programação linear é um exemplo de modelo matemático apresentado de forma analítica, já que permite atingir uma solução ótima para o modelo.

Caso o sistema não possa ser reproduzido por meio de equações matemáticas, aponta-se a simulação como alternativa. Ambientes de simulação, como o Simul8 e o ARENA, são cada vez mais aplicados a simulações computacionais, comprovando a eficácia desse método de resolução. Outra alternativa para a aplicação de uma simulação deve-se a programação da mesma, como ocorre nesta pesquisa.

Neste trabalho, o sistema é desenvolvido por um modelo matemático que utiliza tanto a forma analítica quanto a simulação para sua solução. O sistema necessita da simulação para gerar aleatoriamente alguns acontecimentos, como a quantidade de eventos e em que momento estes eventos serão inseridos no sequenciamento. A aleatoriedade dos dados garante uma diversidade de cenários que são o objeto do presente estudo.

Por outro lado, a cada acontecimento ocorrido no sistema, um novo modelo matemático é desenvolvido por meio de uma Programação Linear Inteira Mista (MILP) e, desta forma, resolvido analiticamente.

A principal característica encontrada no desenvolvimento de uma simulação computacional é a possibilidade da realização de testes, muitas vezes difíceis de serem implementados no próprio sistema, sem alterar o sistema real. Esta vantagem não só proporciona a iniciativa de que as mais variadas ideias sejam avaliadas,

como também permite que o operador do sistema opte pela melhor escolha após determinar qual decisão e suas consequências trazem maiores benefícios ao sistema quando comparadas aos outros cenários.

Outra vantagem obtida em uma simulação é o conhecimento prévio do comportamento de um sistema de acordo com o cenário aplicado. Este benefício pode, ainda, analisar o comportamento do sistema por um longo período em um curto tempo de execução e destacar os principais acontecimentos que envolvem o sistema a partir das mudanças realizadas.

Além disso, a simulação ajuda na tomada de decisões que determinam quando e quanto investir, já que o custo do desenvolvimento de uma simulação é pequeno se comparado ao valor do investimento planejado (LOCH, 2010).

Por outro lado, a simulação possui desvantagens e é importante identificá-las para evitar possíveis problemas futuros.

De acordo com Kelton *et al.* (2001), os modelos de simulação envolvem dados de entrada aleatórios, fazendo com que as saídas também sejam aleatórias. Esta aleatoriedade gerada pelos dados de entrada e de saída pode dificultar a interpretação dos resultados obtidos na simulação.

Embora as desvantagens existam, o operador pode amenizá-las ao preparar os dados de entrada, criar o modelo e moldá-lo conforme as necessidades da empresa e analisar os dados de saída (LOCH, 2010).

2.2.1 Classificação de Sistemas de Simulação

FREITAS Filho (2008) classifica o sistema de simulação como sendo composto por modelos estáticos e dinâmicos. No primeiro caso, o sistema é designado em um determinado instante de tempo, enquanto no segundo ocorre o desenvolvimento do sistema ao longo do tempo.

A simulação dinâmica, por sua vez, é classificada em determinística e estocástica. No modelo determinístico, as variáveis apresentadas no sistema são previamente conhecidas, ou seja, não apresentam aleatoriedade. Já em sua forma estocástica, pelo menos uma das variáveis utilizadas deve envolver aleatoriedade, possibilitando analisar o comportamento de um sistema sob diferentes cenários.

Os casos estocásticos podem ser divididos entre discretos e contínuos. Na simulação discreta, as variáveis alteram seus valores apenas em alguns pontos bem

definidos, ou seja, em intervalos de tempo. Já na simulação contínua as variáveis podem modificar seus valores no decorrer do tempo.

Ainda segundo FREITAS Filho (2008), um modelo não é necessariamente discreto ou contínuo. Existe a possibilidade da modelagem mista, com parte de suas variáveis com os valores sendo atualizados de forma discreta e parte de forma contínua.

Este trabalho utiliza um sistema de simulação dinâmico, com dados de entrada estocásticos. Além disso, considera-se que as mudanças realizadas no sequenciamento ocorrem a cada novo evento gerado, portanto, pode-se classificar o sistema como uma simulação discreta.

2.2.2 Construção de um Modelo de Simulação

A partir da análise dos passos do modelo de simulação criados por Banks (1998) e citados, posteriormente, por Loch (2010), apreende-se que a seguinte construção é necessária para a elaboração de um modelo de simulação:

- **Formulação do problema:** para iniciar uma simulação, deve-se analisar quais as necessidades do sistema no qual o modelo será aplicado, assim como suas limitações;
- **Definição dos objetivos e plano de projeto:** os objetivos representam qual é a meta que a simulação pretende alcançar, enquanto o plano de projeto é constituído por um cronograma de execução da proposta em conjunto com os recursos necessários em cada fase da simulação;
- **Elaboração do modelo conceitual:** desenvolve-se por meio de equações matemáticas e conceitos lógicos que representem a estrutura do problema e, conseqüentemente, do sistema;
- **Coleta de Dados:** os dados necessários para o modelo de simulação podem já existir ou não. No caso em que tais informações já são conhecidas, elas podem ser insuficientes. Nesta circunstância, assim como no caso não existente, uma nova coleta de dados no sistema se faz necessária;
- **Tradução do modelo:** nesta fase, o modelo descrito anteriormente é codificado e implementado em uma linguagem de programação ou em um dos *softwares* de simulação disponíveis;

- Verificação do modelo: analisa-se o funcionamento do modelo. Nesta etapa, recomenda-se averiguar sua execução do modelo ao longo de sua elaboração;
- Validação do modelo: após sua verificação, a validação do modelo investiga se os resultados encontrados representam adequadamente o esperado em um sistema real;
 - Projeto experimental: nesta etapa são estabelecidos os cenários que serão simulados e o número de replicações de cada um deles;
 - Replicações e análises: neste momento os testes são efetuados e as análises de desempenho de cada cenário são avaliadas estatisticamente;
 - Replicações adicionais: caso os dados de saída gerados anteriormente sejam insuficientes, novas replicações são realizadas e posteriormente analisadas.

2.2.3 Distribuição de Probabilidade para um Sistema de Simulação

Devido ao grande número de variáveis aleatórias estabelecidas em uma simulação, pode-se afirmar que esta depende essencialmente de conhecimentos estatísticos em sua aplicação. O uso de métodos estatísticos para a análise dos resultados encontrados em diferentes cenários é de grande importância para a validação dos mesmos.

Segundo Freitas Filho (2008), os resultados obtidos em um procedimento nem sempre são constantes, mas podem seguir um padrão determinado por uma distribuição de probabilidade. Dentre as principais distribuições de probabilidade, a distribuição uniforme, empregada no modelo de simulação aplicado neste trabalho, é descrita a seguir.

A distribuição uniforme é a distribuição de probabilidade mais simples de ser retratada. Os principais parâmetros da distribuição de probabilidade são os valores a (valor mínimo) e b (valor máximo) e o intervalo $[a, b]$ representa a região que determina os possíveis resultados encontrados nesta distribuição. Sua função densidade de probabilidade (f.d.p) é representada por:

$$f(x) = \frac{1}{b-a}; \quad x \in [a, b] \quad (2.1)$$

Segundo Loch (2010), os tempos de processamento ou o *setup* entre as tarefas não podem assumir valores negativos. Sendo assim, uma distribuição de

probabilidade que possui valores máximos e mínimos, como no caso distribuição uniforme, apresenta vantagens para a geração de eventos neste trabalho. Além disso, as linguagens de programação fornecem, em geral, valores aleatórios gerados uniformemente entre 0 e 1.

De modo geral, o presente trabalho realiza uma análise do *makespan* para problemas de sequenciamento em uma única máquina a partir da geração de novos eventos designados pelos clientes. Uma simulação é aplicada ao sistema para criar, de forma aleatória, a quantidade de eventos e o momento em que estes eventos serão inseridos no sequenciamento. Após este processo, desenvolve-se um novo modelo matemático a cada evento aplicado ao sequenciamento até que se encerrem os novos itens a serem avaliados.

3 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo serão apresentados trabalhos correlatos a problemas de sequenciamento de produção.

Primeiramente, uma breve revisão referente ao sequenciamento em uma única máquina, com o objetivo de minimizar o *makespan*, é realizada. Nela, os principais campos relacionados a este objetivo são definidos. Em seguida, outros trabalhos são descritos para a continuidade da pesquisa.

3.1 TRABALHOS CORRELATOS

O sequenciamento é um importante campo no âmbito da pesquisa operacional, no qual novas publicações aparecem a cada ano (POTTS e STRUSEVICH, 2009). No início década de 1990, os autores se preocupavam em provar a natureza combinatorial dos problemas de sequenciamento e iniciavam a busca pela melhor resolução destes problemas.

Os resultados obtidos no sequenciamento de produção podem ser determinados por soluções exatas ou por valores aproximados. No primeiro caso, as soluções ótimas podem ser encontradas por meio de algoritmos, como o método *Branch & Bound*, dentre outros casos.

Por outro lado, pesquisas envolvendo a busca de soluções mediante as meta-heurísticas têm crescido a cada ano.

O trabalho de Gorczyca *et al.* (2015) retrata um problema envolvendo indústrias siderúrgicas cujo objetivo consiste em obter uma sequência de tarefas que minimize o *makespan*. Este problema apresenta um modelo dinâmico, no qual uma tarefa é liberada para ser processada apenas quando seu pré-processamento já foi finalizado. Os autores adotaram as meta-heurísticas *Simulated Annealing* e Busca Tabu para a resolução do problema.

O trabalho de Lu *et al.* (2014) utiliza tempos de processamento incertos e tempos de *setup* dependentes¹ da sequência para o desenvolvimento do problema. Sua solução é determinada por uma busca local, juntamente com a meta-heurística *Simulated Annealing*.

¹ Uma revisão da literatura dos principais trabalhos com considerações de *setup* nos ambientes de produção pode ser obtida em Allahverdi (2008).

A aplicação de modelos híbridos também tem se tornado um campo em crescimento nesta área de pesquisa.

A hibridização entre a meta-heurística Busca Tabu e estratégias de busca local é aplicada no trabalho de Pacheco *et al.* (2013), para encontrar o sequenciamento em uma máquina. O modelo possui restrições de disponibilidade² das máquinas e o *setup* entre os itens depende da sequência estabelecida.

Com a evolução de recursos computacionais, os problemas começaram a se identificar, cada vez mais, com ambientes dinâmicos encontrados em situações reais. As pesquisas de Zhong *et al.* (2014), Zhang *et al.* (2015) e Xu *et al.* (2015) são exemplos de trabalhos que buscam essa proximidade com casos reais.

As próximas seções trazem os campos de pesquisa que têm recebido maior atenção nos últimos anos. Seus principais conceitos e algumas pesquisas relevantes sobre cada tema também são abordadas adiante.

3.1.1 Problemas de sequenciamento com deterioração de trabalhos ou efeito de aprendizagem

Em geral, os dados apresentados nos problemas de sequenciamento, como o tempo de processamento, são valores constantes. Entretanto, em casos reais, as condições encontradas em um processamento variam ao longo do tempo. Nestes casos, os indicadores processados são controlados atribuindo-lhes recursos por meio de uma deterioração ou efeito de aprendizagem.

De acordo com Dolgui *et al.* (2012), estes recursos indicam que o tempo de processamento do trabalho depende de sua localização no sequenciamento. Em relação ao modelo de deterioração, quanto mais tarde o trabalho é iniciado, mais tempo ele leva para ser processado. Já no modelo de aprendizagem, o tempo de processamento de uma tarefa é finalizado com antecedência, caso a mesma seja iniciada posteriormente.

Ainda segundo os autores supracitados, existem duas categorias de modelos que abordam problemas de sequenciamento com deterioração e efeitos de

² Modelos com restrições de disponibilidade quase não são encontrados na literatura. Isto se deve ao fato da maioria dos problemas considerarem que as máquinas estão sempre disponíveis para a sua utilização, o que nem sempre acontece em casos reais devido à possibilidade de imprevistos.

aprendizagem. Se o tempo de processamento de um trabalho depende da sua posição, o modelo de deterioração/aprendizagem é caracterizado como posicional, enquanto que se o tempo de processamento de um trabalho depende de seu horário de início, o mesmo se refere ao modelo de deterioração/aprendizagem temporal.

Já em Kellerer *et al.* (2013), os elementos que englobam características de processamento estão sujeitos à deterioração cumulativa, mas podem ser restaurados mediante a uma manutenção.

Outros trabalhos que envolvem critérios de processamento não constantes podem ser encontrados em Alidaee e Womer (1999).

3.1.2 Problemas de sequenciamento com multi-critérios

Alguns trabalhos utilizam o processo de multi-critérios para realizar combinações entre os objetivos almejados e estabelecer sua minimização.

Em muitas aplicações na vida real, os gestores tomam uma decisão em que diferentes agentes compartilham um recurso de processamento em comum e cada agente quer minimizar uma função dependente apenas dos trabalhos do processamento (CHENG, 2014).

Em Baker e Smith (2003), foram avaliados três critérios em um sequenciamento: minimização do *makespan*, minimização do *lateness* total e minimização do tempo total de conclusão. A cada dois objetivos distintos e, posteriormente, entre os três critérios, aplicaram-se as heurísticas de prioridade convenientes às funções objetivo correspondentes.

Na pesquisa realizada por Cheng (2014), o primeiro agente possui o objetivo de minimizar o tempo total de conclusão de todos os trabalhos, enquanto o segundo agente se concentra em minimizar funções como adiantamento/atraso máximo, adiantamento/atraso total ou ponderado.

Em Choi (2015), ambos os agentes preocupam-se em minimizar o tempo total de conclusão ponderado, sendo que o *makespan* para um dos agentes é restrito superiormente. Primeiramente, um algoritmo *Branch & Bound* é criado para encontrar a solução ótima e, em seguida, a meta-heurística *Simulated Annealing* é aplicada, utilizando três diferentes métodos para a busca da solução inicial.

Um problema de bi-critério é apresentado em Shabtay *et al.* (2012). No primeiro critério, tem-se os tempos de conclusão dos trabalhos aceitos, enquanto o

segundo avalia o custo total da rejeição de trabalhos por meio de uma penalidade.

Para mais detalhes, as principais pesquisas sobre o tema podem ser encontradas em Hoogeveen (2005).

3.1.3 Outros Trabalhos Relevantes

Após a análise da evolução nas pesquisas sobre *makespan* em uma única máquina, outros trabalhos importantes para o desenvolvimento da pesquisa são citados. Dentre eles, incluem-se trabalhos sobre inserção e/ou desistência de pedidos, simulação em um sequenciamento e pesquisas relacionadas a um re-sequenciamento de produção.

Pesquisas recentes buscam ambientes de produção que se aproximem de situações reais. Nos casos clássicos de sequenciamento, os valores de processamento são previamente conhecidos. Por outro lado, situações que apresentem aleatoriedade têm sido amplamente estudadas. Os casos de inserção e desistências de pedidos de clientes em um sequenciamento são exemplos de informações inesperadas que permitem a geração de uma diversidade de cenários.

No trabalho de Briskorn *et al.* (2013), foram consideradas adições e retiradas de trabalhos nas restrições referentes ao estoque. O seu objetivo é minimizar o tempo total de conclusão ponderado. Os autores designaram o algoritmo *Branch & Bound* e a Programação Dinâmica para resolução do modelo.

O problema de minimização do tempo total de conclusão ponderado sujeito a restrições de estoque também é o objeto de estudo de Morsy e Pesch (2015). Os itens são removidos de um estoque central ou inseridos no mesmo. Por conseguinte, as tarefas só podem ser retiradas do estoque caso ainda não tenham sido processadas. Todas as tarefas encontram-se disponíveis no início do processamento e a capacidade de estoque é ilimitada. A solução é dada por um algoritmo de aproximação.

Na pesquisa de Akkan (2015), uma nova operação é inserida em um sequenciamento já existente. A intenção do trabalho é manter o novo sequenciamento o mais estável possível para uma minimização do atraso máximo. Para isto, são efetuadas várias heurísticas de otimização e uma hibridização entre um algoritmo *Branch & Bound* e um algoritmo de busca local é realizada.

Hall e Potts (2004) inserem novos trabalhos em um sequenciamento já existente. Duas classes de modelos são consideradas: a primeira minimiza o custo e considera uma limitação para a perturbação causada ao sequenciamento original, enquanto na segunda o objetivo de minimizar o custo inclui o custo original e o custo da interrupção.

Em Lu *et al.* (2011), o modelo do sequenciamento é responsável por minimizar o *makespan* e a penalidade referente às tarefas rejeitadas do sequenciamento em uma máquina.

Em Allahverdi *et al.* (2014), um problema de sequenciamento em uma máquina com tempos de processamento incertos é designado. A minimização da média do tempo de conclusão ocorre por meio de uma nova heurística, utilizando os limites de tempo de processamento. A comparação entre a heurística proposta e as já existentes é computada mediante uma simulação e prova-se que o método indicado retorna, em geral, respostas mais eficientes do que as outras opções.

Outro ponto que tem despertado muita atenção nos últimos anos é determinado pelos problemas de re-sequenciamento de produção. A pesquisa de Liu e Ro (2014) trata de um problema cujo re-sequenciamento deve ser realizado devido a uma ruptura³ ocorrida na máquina. Entende-se por ruptura da máquina qualquer imprevisto (alterações de data, greves trabalhistas, quebra de máquinas, materiais em escassez, cancelamentos de pedidos) que possa acontecer durante um sequenciamento. Diante disso, o operador pretende reprogramar os trabalhos sem perturbar demasiadamente o cronograma inicial.

Ao elaborar o modelo, os autores consideram o *trade-off* entre o custo de reprogramação e a importância da perturbação. O tempo de interrupção do sequenciamento é inserido tanto na função objetivo (minimização do *makespan* e do *lateness* máximo são os objetivos almejados pela pesquisa) como também em uma de suas restrições. Assim, ao aderir a um novo sequenciamento, minimiza-se a perturbação ocorrida, sem abandonar o objetivo do processamento original. Um algoritmo obtém soluções aproximadas mediante implementação computacional.

Yuan e Mu (2007) e Yang (2007) são outros casos de re-sequenciamento devido à inserção de novas tarefas no processo.

³ A ruptura é medida pelo maior desvio de tempo entre o novo sequenciamento e a sequência original, para qualquer trabalho.

Um dos principais trabalhos que servem como base para esta pesquisa é apresentado por Herr & Goel (2016). Neste trabalho, analisa-se a minimização do atraso total das tarefas a serem processadas no sequenciamento. A quantidade de recursos utilizada para tal processo não deve exceder seu fornecimento. Outra característica do problema é dada pelo agrupamento de tarefas similares, formando uma família de tarefas, nas quais o *setup* é idêntico para este conjunto. Os resultados garantem que uma abordagem heurística supera o modelo matemático tanto na qualidade da solução quanto no seu tempo de execução.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática do modelo clássico para o problema de sequenciamento em uma única máquina de minimização de *makespan*, juntamente com as adaptações necessárias para melhorar o tempo computacional de sua solução.

Em seguida, desenvolve-se a construção da simulação com a finalidade de reproduzir um sistema de produção real, que permita a chegada de novos pedidos de clientes e também o cancelamento de tarefas no decorrer da programação.

Por fim, com o propósito comparativo, criam-se heurísticas de prioridades referentes à urgência requerida pelos eventos ocorridos.

4.1 MODELO MATEMÁTICO

A Programação Matemática é uma área que utiliza processos de otimização por meio de uma função objetivo, suas variáveis de decisão e restrições relacionadas a estas variáveis (MURTY, 1983).

O problema de produção abordado neste trabalho é desenvolvido por um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP) e tem como objetivo minimizar o *makespan* em uma única máquina. Antes da descrição do modelo, as seguintes hipóteses para o problema são consideradas:

- Existem n trabalhos a serem processados por uma única máquina;
- Não há preempção (*preemption*) durante o sequenciamento, ou seja, as tarefas não podem ser interrompidas durante sua execução;
- Todas as tarefas do sequenciamento inicial estão disponíveis no instante de tempo zero;
- Considera-se uma tarefa fictícia zero (0) que precede imediatamente a primeira tarefa e sucede imediatamente a última tarefa de um sequenciamento.

4.1.1 Formulação Matemática: Minimização do *Makespan*

Os parâmetros, inteiros e não negativos, analisados nesta dissertação são definidos a seguir:

p_i = tempo de processamento da tarefa i .

s_{ij} = tempo de preparação (*setup*) da máquina para processar a tarefa j imediatamente após a tarefa i .

Além disso, definem-se as seguintes variáveis:

C_i = instante de término de processamento da tarefa i .

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa } i \text{ precede imediatamente a tarefa } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

A pesquisa abordada neste trabalho se refere a um dos problemas de produção clássicos encontrados em Arenales *et al.* (2015). Este problema tem como objetivo a minimização do *makespan* (C_{\max}), ou seja, sua função é minimizar o instante de término de todas as tarefas processadas. As equações (4.1) – (4.7) indicam a função objetivo e suas restrições:

$$\min C_{\max} \quad (4.1)$$

Sujeito a

$$C_{\max} \geq C_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij} = 1, \quad j = 0, \dots, n \quad (4.3)$$

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij} = 1, \quad i = 0, \dots, n \quad (4.4)$$

$$C_j \geq C_i - M + (s_{ij} + p_j + M)x_{ij}, \quad i = 0, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

$$C_0 = 0 \quad (4.6)$$

$$\mathbf{C} \in \mathbb{R}_+^n, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{B}^{(n+1)(n+1)} \quad (4.7)$$

Como citado anteriormente, a função objetivo (4.1) minimiza o *makespan* de todas as tarefas do sequenciamento. As restrições (4.2) afirmam que o instante do término do sequenciamento seja maior ou igual ao instante de término de processamento de cada um dos itens processados. As restrições (4.3) e (4.4) implicam que cada tarefa tem apenas uma tarefa imediatamente predecessora e uma tarefa imediatamente sucessora, respectivamente. Em (4.5), as restrições garantem que o instante de término de processamento do item j não ocorra antes da soma entre o instante de término de processamento da tarefa i imediatamente

anterior a j , o setup entre as tarefas i e j e o tempo para a tarefa j ser processada. Além disso, M representa um valor suficientemente grande⁴. A restrição (4.6) afirma que o instante de término de processamento da tarefa 0 (tarefa fictícia) é nulo. As restrições (4.7) indicam o tipo das variáveis.

Os parâmetros supracitados e empregados na restrição (4.5) representam o custo relacionado ao tempo que as tarefas levam para ser processadas no sequenciamento. Por conseguinte, pode-se efetuar algumas adaptações no modelo acima, considerando um novo parâmetro custo, que represente a junção destes dois parâmetros anteriores, ou seja,

$$c_{ij} = s_{ij} + p_j; \quad i = 0, \dots, n \quad j = 0, \dots, n \quad (4.8)$$

Sendo assim, pode-se encarar o tempo total (tempo de processamento e *setup* entre as tarefas) de cada tarefa como sendo o custo da realização de uma tarefa para outra. Este conceito é muito semelhante à situação encontrada em Problemas de Transporte, nos quais existe um custo para transportar itens de uma localidade até outra. Pensando na relação existente entre os conceitos citados, consideram-se as seguintes analogias no problema:

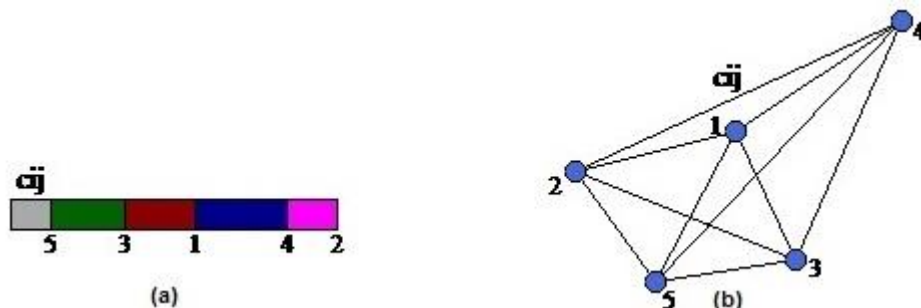
QUADRO 2 - CONCEITOS DE PROBLEMAS DE SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO E DE TRANSPORTE

PROBLEMAS DE SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO	PROBLEMAS DE TRANSPORTE
Tarefas 1, 2, ..., n	Vértices 1, 2, ..., n
Tempo de Processamento (c_{ij}) de uma tarefa i para uma tarefa j	Custo de transporte (c_{ij}) de uma localização i para uma localização j

FONTE: A autora (2016).

A FIGURA 2 ilustra as similaridades entre os problemas de sequenciamento (a) e transporte (b), mencionadas no QUADRO 2.

FIGURA 2 - PROBLEMAS DE SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO E DE TRANSPORTE



FONTE: A autora (2016).

⁴ O valor M é dado por $M = (\max\{p_i\} + \max\{s_{ij}\}) \cdot n$; onde n é a quantidade de tarefas a serem executadas.

Stern e Vitner (1990) realizam a associação do problema de sequenciamento de produção com o modelo de transporte. Em seu trabalho, um *Flow Shop* com duas máquinas é encarado como um Problema do Caixeiro Viajante (PCV) assimétrico. Nele, um agente de transporte é responsável por levar as tarefas da máquina A para a máquina B. Assim como proposto no presente trabalho, o custo total para a realização do sequenciamento deste modelo de *Flow Shop* é substituído pelo custo de transporte.

No trabalho de Ciro *et al.* (2015), um problema de sequenciamento *Open Shop* é tratado por meio de uma Programação Linear Inteira Mista (MILP) no qual as restrições estão relacionadas a designação. Além da resolução do modelo matemático, os autores determinaram uma adaptação da metaheurística Colônia de Formigas devido a complexidade do problema.

A próxima subseção apresenta a reformulação matemática do problema, considerando definições do Problema de Transporte.

4.1.2 Reformulação Matemática: Minimização do Makespan usando Conceitos de Transporte

A adaptação do modelo matemático tratado em 4.1.1 será apresentada em conjunto com a definição do parâmetro de custo citado na seção anterior:

c_{ij} = custo do tempo de atravessamento de uma tarefa j , ou seja, valor da soma do tempo de preparação da máquina entre uma tarefa i e j com o tempo de processamento da tarefa j .

Assim, a modelagem matemática da função objetivo do problema e suas restrições é dada por

$$\min \sum_{j=0, j \neq i}^n \sum_{i=0, j \neq i}^n c_{ij} x_{ij} \quad (4.9)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij} = 1, \quad j = 0, \dots, n \quad (4.10)$$

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij} = 1, \quad i = 0, \dots, n \quad (4.11)$$

$$C_j \geq C_i - M + (c_{ij} + M)x_{ij}, \quad i = 0, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad (4.12)$$

$$C_0 = 0 \quad (4.13)$$

$$\mathbf{C} \in \mathbb{R}_+^n, \quad \mathbf{x} \in B^{(n+1)(n+1)} \quad (4.14)$$

Para a reformulação do problema, a função objetivo (4.9) passa a minimizar o somatório do custo de processamento de uma tarefa j , caso esta seja produzida imediatamente após a tarefa i . As restrições (4.10) e (4.11) induzem que cada tarefa tem apenas uma tarefa imediatamente predecessora e sucessora, assim como descrito nas restrições (4.3) e (4.4), respectivamente. Analogamente, as restrições (4.13) e (4.14) correspondem às restrições (4.6) e (4.7) do problema original. Enquanto as restrições (4.12) garantem que, caso j seja processada imediatamente após a tarefa i , o instante de término de processamento da tarefa j não ocorra antes da soma entre o instante de término de processamento da tarefa i e o custo entre as tarefas i e j , onde M representa um valor muito grande. Caso i não preceda j imediatamente, esta restrição é desativada.

4.2 MODELO DE SIMULAÇÃO APLICADO

A partir da descrição do modelo matemático, inicia-se a construção de um sistema de simulação com a finalidade de reproduzir um processo de produção equivalente aos casos reais.

Nesta seção será apresentada tal composição, de acordo com a seguinte estrutura:

- Geração dos eventos da simulação;
- Criação de um fluxograma para o processo produtivo;
- Verificação e validação da simulação efetuada.

4.2.1 Geração dos Eventos

Uma das principais considerações necessárias em uma simulação é a geração de variáveis aleatórias (dados de entrada), para obtenção e análise dos resultados (dados de saída).

A necessidade de encomendas de novos pedidos pelos clientes ou a desistência dos já ordenados garante uma grande variedade de mudanças possíveis durante um sequenciamento. Quais tarefas e em que momentos elas são inseridas/retiradas do sequenciamento atual são os elementos centrais da aleatoriedade do início problema.

Neste trabalho, três variações de criação dos eventos foram efetuadas para o problema:

1. Gerar, exclusivamente, inserções de tarefas;
2. Gerar tanto inserções quanto desistências de tarefas;
3. Gerar, exclusivamente, desistências de tarefas.

Para iniciar a criação dos eventos, considera-se, em todos os casos, que o sequenciamento inicial foi efetuado previamente e, portanto, o valor do *makespan* original é conhecido. Deste modo, o primeiro evento gerado é obtido uniformemente entre o instante de tempo inicial do sequenciamento até o valor do *makespan* recém-obtido, ou seja,

$$t(E_1) \in (0, C_{\max(0)}); \quad (4.15)$$

onde E_1 representa o primeiro evento criado e $C_{\max(0)}$ o *makespan* original.

A partir deste momento, cada uma das opções supracitadas se desenvolve particularmente, sempre por meio de uma distribuição uniforme.

No primeiro caso, cada novo evento é estabelecido a partir do tempo de chegada do evento anterior até a soma do valor do limite superior do intervalo anterior e o tempo de processamento da tarefa precedente, como descrito abaixo:

$$\begin{aligned} t(E_2) &\in (t(E_1), Vmax_2) \\ t(E_3) &\in (t(E_2), Vmax_3) \\ &\vdots \\ t(E_q) &\in (t(E_{q-1}), Vmax_q); \end{aligned} \quad (4.16)$$

onde q determina a quantidade de eventos gerados e o valor do limite superior de um intervalo é dado por $Vmax_1 = C_{\max(0)}$ e $Vmax_i = Vmax_{(i-1)} + p_{E_{i-1}}$; $i = 2, \dots, q$.

As condições 2 e 3 procedem analogamente. Ambas geram eventos aleatórios em tempos uniformemente distribuídos entre o tempo de chegada do evento anterior e o makespan do sequenciamento inicial. Assim,

$$t(E_i) \in (t(E_{i-1}), C_{\max(0)}); \quad (4.17)$$

para $i = 2, \dots, q$.

A classificação de qual tarefa deve ser reinserida ou retirada do sequenciamento também é fornecida de maneira estocástica. Caso um item já tenha sido sorteado como uma desistência, e seja novamente sorteado para ser retirado, um novo sorteio é realizado até que a tarefa elegida ainda não seja classificada como uma saída. Enquanto a seleção para chegadas de tarefas permite que uma tarefa seja escolhida mais do que uma vez para ser inserida no re-sequenciamento.

4.2.2 Criação de um Fluxograma para o Processo de Produção

Outras características pré-determinadas no sistema são a quantidade de tarefas existentes no sequenciamento e o número de inserções e/ou desistências de tarefas envolvidas no novo sequenciamento.

A quantidade de eventos inseridos no sequenciamento após o começo da programação é gerada aleatoriamente entre 20 a 50 por cento da totalidade dos trabalhos do sequenciamento inicial.

O número de tarefas do sequenciamento e de eventos gerados para cada uma delas está ilustrado no QUADRO 3.

QUADRO 3 - QUANTIDADE DE TAREFAS INICIAIS E O NÚMERO DE EVENTOS CRIADOS

NÚMERO DE TAREFAS	NÚMERO DE EVENTOS
8	1 a 4
10	2 a 5
12	2 a 6
15	3 a 7
20	4 a 10
30	6 a 15
40	8 a 20
50	10 a 25
60	12 a 30
70	14 a 35
80	16 a 40
90	18 a 45
100	20 a 50

FONTE: A autora (2016).

A partir dos parâmetros iniciais e das informações definidas acima, inicia-se o processamento das n tarefas e um sequenciamento original é estabelecido. Cada tarefa é alocada a uma determinada posição, denominada item k , como mostrado na FIGURA 3.

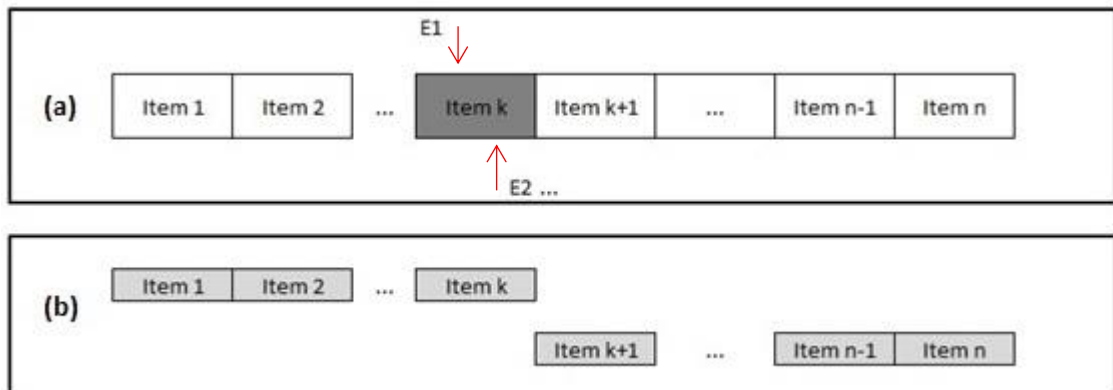
FIGURA 3 - SEQUENCIAMENTO INICIAL



FONTE: A autora (2016).

Com o sequenciamento inicial, obtém-se o tempo de término de processamento de cada tarefa. Neste momento, verifica-se o instante de término de cada tarefa do sequenciamento anterior e identifica(m)-se o(s) primeiro(s) evento(s) gerados antes de alguma tarefa presente no sequenciamento, conforme ilustrado na FIGURA 4 (a). Com base nesta observação, separa-se a parte do sequenciamento que já foi processada, daquela que será novamente sequenciada com a aplicação do(s) evento(s), de acordo com a FIGURA 4 (b).

FIGURA 4 - APLICAÇÃO DO(S) EVENTO(S) GERADO(S) NA SIMULAÇÃO



FONTE: A autora (2016).

Uma vez que o processamento é iniciado, não se interrompe o trabalho que está sendo executado até que o mesmo seja concluído. Deste modo, o re-sequenciamento ocorre a partir do momento em que esta tarefa é finalizada.

O restante dos elementos que ainda não foram processados se junta ao(s) novo(s) evento(s) já inserido(s) ao sequenciamento, como exposto na FIGURA 5.

FIGURA 5 - ACRÉSCIMO DO(S) EVENTO(S) GERADO(S)



FONTE: A autora (2016).

Se os eventos selecionados são inserções de novos pedidos de clientes, basta modelar um problema matemático com os dados atuais para minimizar o *makespan* e, deste modo, a solução exata deste novo problema permite que os eventos sejam designados em uma posição ótima⁵ (FIGURA 6).

FIGURA 6 - ALOCAÇÃO DO(S) EVENTO(S) INSERIDO(S) NO SEQUENCIAMENTO



FONTE: A autora (2016).

Por outro lado, caso os eventos estejam relacionados à desistência de pedidos pelos clientes, duas possibilidades são consideradas:

- (i) a tarefa aguarda pelo sequenciamento;
- (ii) a tarefa foi efetuada anteriormente.

Na FIGURA 7, o Item m representa a tarefa que será retirada do sequenciamento (primeiro caso) ou demonstra que a tarefa já foi processada em outro momento (segundo caso).

FIGURA 7 - RETIRADA DO(S) EVENTO(S) GERADO(S)



FONTE: A autora (2016).

Sendo assim, na FIGURA 8 (i), tem-se as tarefas restantes, juntamente com suas novas posições. Enquanto em (ii), as posições das tarefas restantes são preservadas, já que nenhuma delas é retirada do sequenciamento.

FIGURA 8 - REALOCAÇÃO DAS TAREFAS RESTANTES NO SEQUENCIAMENTO



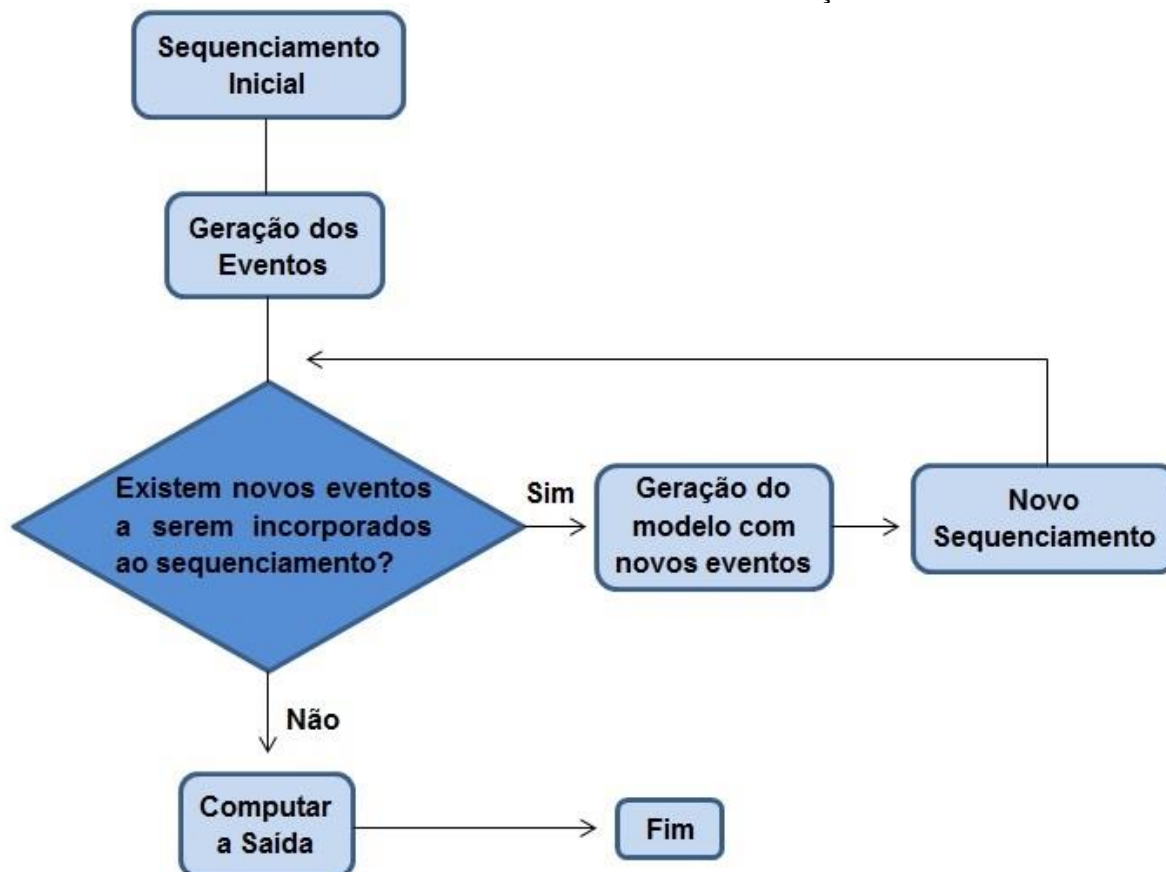
FONTE: A autora (2016).

⁵ As tarefas que ainda precisam ser processadas reorganizam suas posições, buscando uma solução ótima para o sequenciamento parcial. Quando esta troca de posições ocorre, denota-se a nova localização da tarefa por Item \bar{i} .

Portanto, o sequenciamento final, com todos os eventos aplicados, é determinado por sequenciamentos parciais, onde cada parte é fornecida por uma adaptação do modelo exato.

O fluxograma apresentado na FIGURA 9 representa o procedimento de um sistema de simulação com a geração de novos eventos durante o sequenciamento, conforme descrito anteriormente.

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO PROPOSTO



FONTE: A autora (2016).

O sistema é originado a partir do sequenciamento inicial. Neste momento, as variáveis de entrada são geradas aleatoriamente e, enquanto existirem novos eventos, o ciclo do fluxograma é efetuado.

Se existem novos eventos para serem testados no modelo de simulação, estes geram um novo modelo (com novos dados) e, conseqüentemente, uma nova solução exata.

Caso contrário, os dados de saída são extraídos do modelo para serem analisados e a simulação é finalizada.

4.2.3 Verificação e Validação da Simulação

Um exemplo da simulação proposta é apresentado, brevemente, para a verificação e validação do sistema de simulação proposto. As seguintes informações são consideradas:

- Número de tarefas: 10
- Número de eventos aplicados: 2 a 5
- Número de replicações da simulação: 30

Os dados acima serão utilizados para demonstrar o procedimento realizado na simulação proposta. Além das informações supracitadas, o exemplo considera que a geração de eventos será representada por: uma chegada de um novo pedido e duas desistências de pedidos por parte dos clientes.

O quadro abaixo representa os eventos gerados durante o sequenciamento, as tarefas que serão inseridas/retiradas do processo e o momento em que as mesmas são criadas.

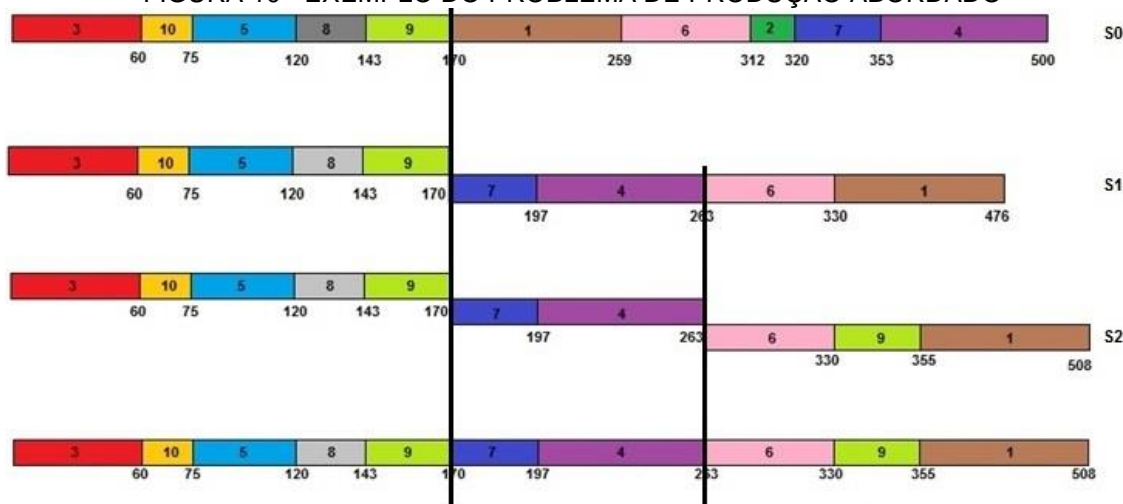
QUADRO 4 - DADOS DE ENTRADA PARA A GERAÇÃO DE EVENTOS

EVENTO	TAREFA	INSTANTE DE TEMPO
Saída	2	151
Chegada	9	203
Saída	5	215

FONTE: A autora (2016).

A FIGURA 10 representa o processo de produção com a inclusão dos eventos que são criados durante o sequenciamento.

FIGURA 10 - EXEMPLO DO PROBLEMA DE PRODUÇÃO ABORDADO



FONTE: A autora (2016).

Primeiramente, o sequenciamento original é efetuado. Após esta sequência ser definida, o evento ocorre no momento em que a Tarefa 9 está sendo processada. As tarefas posteriores à Tarefa 9 são analisadas e, como o próximo evento (Saída - Tarefa 2) ainda não foi sequenciado, retira-se a Tarefa 2 do sequenciamento original (S0).

Neste momento, um novo modelo matemático é formulado e solucionado com os itens restantes (tarefas 1, 4, 6 e 7). Forma-se, assim, o sequenciamento 1 (S1).

Os próximos eventos acontecem quando a Tarefa 4 está sendo avaliada. As tarefas posteriores à Tarefa 4 são averiguadas e, se possível, os eventos são aplicados. O evento Chegada (Tarefa 9) é inserido ao processo, porém o evento Saída (Tarefa 5) não pode ser retirado, uma vez que seu processamento já foi realizado. O sequenciamento 2 (S2) é obtido por uma nova modelagem matemática e sua solução.

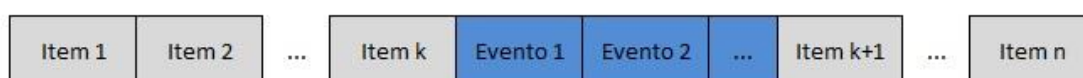
4.3 HEURÍSTICAS PARA OS NOVOS PEDIDOS

As heurísticas são procedimentos usados para simplificar a busca por uma solução viável ou próxima do ótimo. Métodos heurísticos podem ser encontrados nos trabalhos de Allahverdi *et al.* (2014), Akkan (2015) e Herr e Goel (2016), por exemplo. Neste trabalho, as heurísticas são criadas com a finalidade de comparar suas respostas com o modelo matemático solucionado por meio de um sistema de simulação. Três heurísticas referentes à inserção de tarefas são estabelecidas nas próximas seções, assim como a única heurística responsável pela desistência de pedidos, respectivamente.

4.3.1 Heurística 1 (H1): Heurística de Antecipação dos Novos Pedidos

Esta heurística assume que todas as tarefas criadas em determinado instante são alocadas à próxima posição disponível, após a sua chegada.

FIGURA 11 - APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA 1

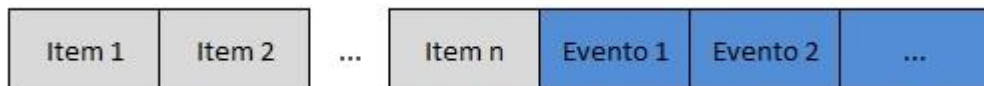


FONTE: A autora (2016).

4.3.2 Heurística 2 (H2): Heurística de Prorrogação dos Novos Pedidos

A segunda heurística relacionada às inserções é caracterizada por processar todos os eventos no fim do sequenciamento.

FIGURA 12 - APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA 2

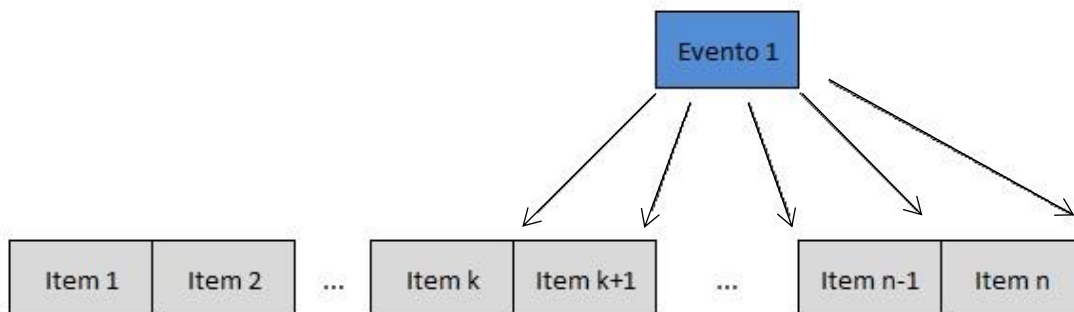


FONTE: A autora (2016).

4.3.3 Heurística 3 (H3): Heurística de Melhor Posição para os Novos Pedidos

No último caso das heurísticas de entrada de novos pedidos, o evento gerado é testado em todas as posições possíveis, ou seja, aloca-se o novo evento nas posições das tarefas que ainda não foram processadas e a melhor posição (menor valor) é selecionada para o evento.

FIGURA 13 - APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA 3

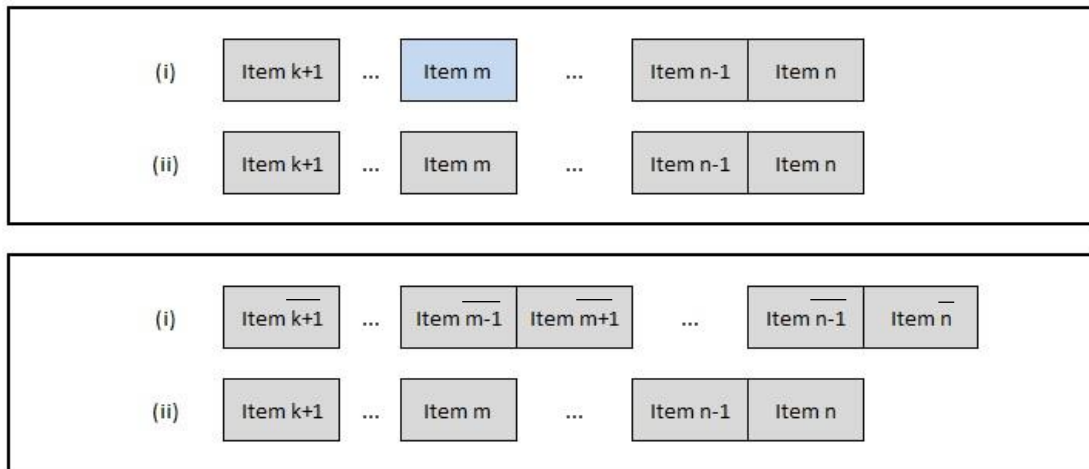


FONTE: A autora (2016).

4.3.4 Heurística 4 (H4): Heurística de Desistência dos Novos Pedidos

No caso da geração de eventos de saída, o sistema só opera caso aquele evento ainda esteja na fila do processamento. Neste caso, a heurística 4 retira a tarefa de sua posição e continua o sequenciamento existente. Caso contrário, o sequenciamento se mantém idêntico ao anterior. A FIGURA 14 representa as duas possibilidades já citadas. No item (i) a tarefa pode ser retirada, enquanto em (ii) o processamento é exatamente o mesmo do anterior.

FIGURA 14 - APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA 4



FONTE: A autora (2016).

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os resultados da simulação aplicada a um problema de minimização de *makespan* em uma única máquina.

A primeira seção identifica o ambiente de programação no qual a simulação, em conjunto com os métodos propostos, foi implementada. Além disso, dados sobre o sequenciamento inicial são expostos neste segmento.

No segundo tópico, a análise de cinco diferentes cenários é realizada e discutida posteriormente.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS

O problema desenvolvido nesta pesquisa foi codificado na linguagem de programação *Visual Basic Studio 2013* e seu modelo matemático implementado no *software* de otimização CPLEX© 12.6.2. Os testes computacionais foram realizados em um computador com processador Intel® Core™ i5 2400 U 1.9 GHz, 8 GB de RAM.

Como os dados de entrada e, conseqüentemente, os de saída são fornecidos aleatoriamente, deve-se estabelecer uma margem de segurança nos testes realizados. Segundo Loch (2010), para maior segurança dos resultados, deve-se realizar várias replicações em cada um dos cenários abordados. Deste modo, cada quantidade de eventos gerados, dentro de sua variação combinatorial, realiza 100 replicações dos testes computacionais.

Entende-se como variação combinatorial, neste caso, todas as possíveis combinações que podem ser tomadas pelos eventos gerados. O QUADRO 5 exemplifica as possibilidades de testes em um problema com 8 tarefas e 3 eventos gerados.

QUADRO 5 - EXEMPLO DE COMBINAÇÃO DOS EVENTOS GERADOS

NÚMERO DE TAREFAS	NÚMERO DE EVENTOS	EVENTOS DE INSERÇÃO	EVENTOS DE DESISTÊNCIA
8	3	3	0
8	3	2	1
8	3	1	2
8	3	0	3

FONTE: A autora (2016).

Ao identificar as possíveis combinações aplicadas nos casos de inserções e/ou desistências de novos pedidos, conclui-se que 4479 testes são realizados nesta dissertação, com 100 replicações para cada teste efetuado.

Conforme citado no QUADRO 3 da seção 4.2.2, são aplicadas 13 variações nas quantidades de tarefas do sequenciamento inicial. Até 50 tarefas, os tempos de processamento p_i são extraídos de instâncias encontradas no trabalho de Herr e Goel (2016). Os tempos de processamento das quantidades superiores a 50 tarefas (60, 70, 80, 90 e 100 tarefas) são obtidos por meio de distribuição uniforme no intervalo [2000, 3000]⁶. Além disso, o tempo de *setup* entre as tarefas é uniformemente determinado no intervalo [1, 20].

Antes do sistema de simulação ser iniciado, o sequenciamento original pode ser determinado a partir do modelo matemático apresentado em (4.9) a (4.14) e seus parâmetros iniciais. A TABELA 1 representa o *makespan* e o *setup* original de cada quantidade de tarefas considerada, em conjunto com os tempos computacionais apreendidos em cada aplicação do sistema.

TABELA 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA O PROCEDIMENTO

Número de Tarefas	<i>Makespan</i> Inicial	<i>Setup</i> Inicial	Tempo Computacional (s)
8	21183	31	512
10	26310	21	535
12	32633	35	609
15	41453	34	696
20	53171	30	598
30	78301	39	694
40	109016	52	776
50	131300	59	657
60	151052	65	938
70	176238	72	1135
80	204193	93	2379
90	225162	89	2060
100	247331	101	4258

FONTE: A autora (2016).

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, cinco cenários são construídos e, em seguida, analisados. O quadro a seguir define as características apresentadas em cada um dos cenários abordados pelo problema tratado na dissertação.

⁶ Este intervalo é estipulado pelo fato das instâncias de Herr e Goel (2016) conterem todos os seus tempos de processamento em um intervalo semelhante.

QUADRO 6 - CENÁRIOS PROPOSTOS

CENÁRIO	CARACTERÍSTICA APRESENTADA
1	Apenas chegadas de pedidos
2	Mais chegadas do que saídas de pedidos
3	Chegadas e saídas em equilíbrio
4	Mais saídas do que chegadas de pedidos
5	Apenas saídas de pedidos

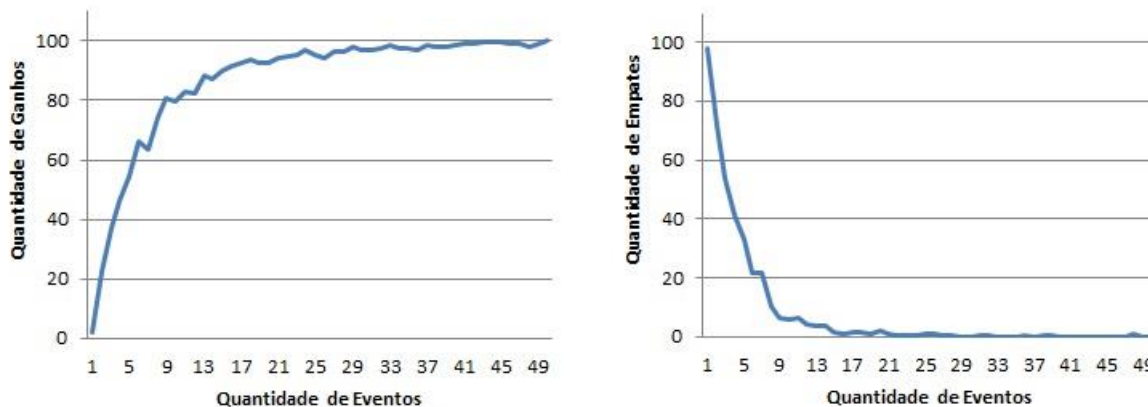
FONTE: A autora (2016).

5.2.1 Cenário 1: Apenas Chegadas de Pedidos

O primeiro cenário avaliado é caracterizado pela geração de eventos que representam apenas inserções de novos pedidos pelos clientes. Nele, foram efetuados o modelo exato e as três heurísticas criadas para as chegadas de novos pedidos.

A análise inicial, para este cenário, verifica quantas vezes a aplicação do conjunto de modelos matemáticos adquire um valor menor ou igual aos apresentados nas heurísticas adotadas. A análise citada é revelada na FIGURA 15.

FIGURA 15 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 1



FONTE: A autora (2016).

A FIGURA 15 (a) representa quantas vezes a modelagem matemática obteve melhores resultados se comparados às três heurísticas aplicadas. A FIGURA 15 (b) revela o número de empates do modelo exato com pelo menos uma das heurísticas desenvolvidas.

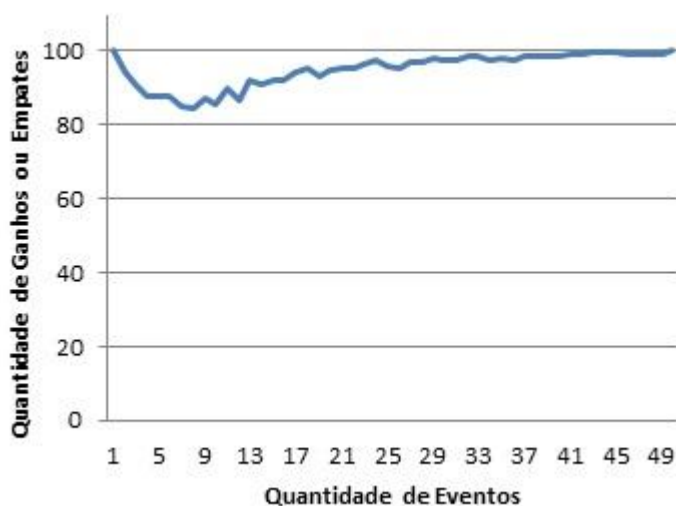
Nota-se que, com poucas inserções no sequenciamento, a modelagem exata empata em quase sua totalidade com as heurísticas de inserção. Isto ocorre pelo fato de o pequeno número de tarefas a serem inseridas no sequenciamento não o alterar por completo. Muitas vezes a tarefa recém-chegada pode adquirir uma

posição que nem mesmo gere *setup* entre ela e a tarefa anterior, ou seja, pode ser alocada a uma posição na qual a mesma tarefa já está sendo processada. Nestes casos, apenas o tempo de processamento é acrescido ao sequenciamento.

Em contrapartida, este número aumenta à medida que as inserções são conduzidas ao sequenciamento. A partir da adição de 10 tarefas, a vantagem em efetuar o modelo exato se mostra maior do que 80%, sendo que acima de 40 inserções, este número totaliza praticamente 100% dos casos.

A FIGURA 16 representa as situações em que o *makespan* do sequenciamento final pelo modelo exato é mais vantajoso ou possui o mesmo efeito dos métodos heurísticos criados. Nele, pode-se observar que os acréscimos de tarefas obtém este benefício em mais do que 80% das vezes.

FIGURA 16 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 1



FONTE: A autora (2016).

A próxima análise deste cenário está relacionada ao acréscimo do *setup* obtido no sequenciamento final da produção. De acordo com Pacheco *et al.* (2013), o aumento de pesquisas recentes que envolvem custos de *setup* se deve à redução destes custos às decisões de programação em ambientes reais.

Na TABELA 2 são apresentados os acréscimos médios de *setup* para cada quantidade de tarefas em relação ao *setup* gerado pelo sequenciamento inicial. Nela, pode-se observar a porcentagem de aumento de *setup* para cada um dos procedimentos utilizados.

TABELA 2 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 1

Tarefas	Aumento de Setup (%)			
	ME	H1	H2	H3
8	53,45%	107,61%	86,65%	70,08%
10	115,50%	234,54%	177,07%	155,49%
12	72,23%	145,38%	119,65%	92,98%
15	100,39%	191,51%	149,41%	133,57%
20	147,60%	282,25%	224,28%	196,80%
30	192,76%	333,19%	273,03%	246,88%
40	198,80%	334,49%	278,41%	251,74%
50	219,60%	360,19%	303,57%	279,54%
60	248,82%	386,24%	332,74%	307,19%
70	266,49%	410,06%	358,29%	328,74%
80	227,48%	350,77%	311,72%	286,22%
90	268,58%	402,43%	355,24%	329,42%
100	269,12%	399,75%	360,95%	329,92%

FONTE: A autora (2016).

A aplicação de uma simulação computacional no presente problema de produção proporciona a chance de avaliar o impacto dos eventos ocorridos durante o procedimento. Em todas as instâncias consideradas, nota-se que o conjunto de modelos exatos (ME) obtém a solução com o menor acréscimo de *setup* para o problema do *makespan*. Além disso, a Heurística 3 é aquela cujos resultados são os mais adequados, se comparada às outras heurísticas.

A Heurística 1 (heurística de antecipação das tarefas) é aquela que possui pior avaliação quando comparada às demais. Isto se deve ao fato de que as tarefas incorporadas ao sequenciamento não são testadas em posições estratégicas, como ocorre no caso da Heurística 3.

Após verificar que o método exato é eficaz nos casos de chegadas de novas ordens, é viável analisar o quanto compensa efetuá-lo. Sendo assim, a TABELA 3 aponta o quanto as heurísticas desenvolvidas possuem desempenho inferior ao encontrado pela série de aplicações do modelo matemático. Esta análise é desenvolvida em intervalos contínuos de inserção (até 20% de inserção, por exemplo) e é averiguada para todas as quantidades de tarefas iniciais do problema.

TABELA 3 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 1

Tarefas	Quantidade de Eventos Gerados																				
	até 20%			20% a 25%			25% a 30%			30% a 35%			35% a 40%			40% a 45%			45% a 50%		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3
8	1,92	1,16	0,37	1,21	0,74	0,36													0,82	0,49	0,32
10	1,45	0,73	0,38				1,03	0,53	0,38										0,91	0,48	0,33
12	1,91	1,11	0,37	1,31	0,85	0,32				1,14	0,68	0,30							0,84	0,59	0,29
15	1,24	0,56	0,37				1,07	0,54	0,37	0,94	0,49	0,35							0,80	0,46	0,30
20	1,32	0,67	0,36	1,22	0,62	0,37	0,89	0,53	0,28	0,98	0,57	0,33							0,80	0,49	0,37
30	1,13	0,57	0,30	1,07	0,55	0,32	0,84	0,45	0,31	0,78	0,44	0,31							0,63	0,39	0,30
40	1,17	0,54	0,35	0,91	0,47	0,30	0,80	0,45	0,31	0,68	0,40	0,27							0,60	0,38	0,25
50	1,02	0,55	0,31	0,87	0,46	0,28	0,72	0,40	0,29	0,67	0,40	0,28							0,56	0,36	0,26
60	0,85	0,43	0,28	0,72	0,39	0,26	0,66	0,38	0,26	0,58	0,34	0,24							0,48	0,32	0,22
70	0,73	0,41	0,27	0,70	0,39	0,25	0,62	0,37	0,23	0,56	0,35	0,23							0,50	0,33	0,24
80	0,75	0,45	0,28	0,71	0,44	0,29	0,63	0,40	0,27	0,56	0,37	0,25							0,48	0,35	0,25
90	0,71	0,40	0,26	0,64	0,37	0,24	0,57	0,33	0,22	0,51	0,33	0,24							0,45	0,30	0,22
100	0,71	0,42	0,25	0,62	0,39	0,25	0,54	0,35	0,23	0,49	0,34	0,22							0,44	0,33	0,22

FONTE: A autora (2016).

Com o decorrer da implantação de novos pedidos, a diferença entre o *setup* final obtido pelas aplicações do modelo exato e pelas heurísticas expostas diminui. Quando os itens são inseridos em até 20% das tarefas do sequenciamento inicial, este acréscimo pode chegar a aproximadamente 200% do valor do *setup* obtido em aplicações da modelagem matemática. Enquanto que, a partir de 35% de inserções (em todas as instâncias) o aumento do *setup* não passa de 100%. Além disso, a Heurística 3 mantém o acréscimo de *setup* em um intervalo de 20 a 50 por cento, quando comparado ao modelo exato.

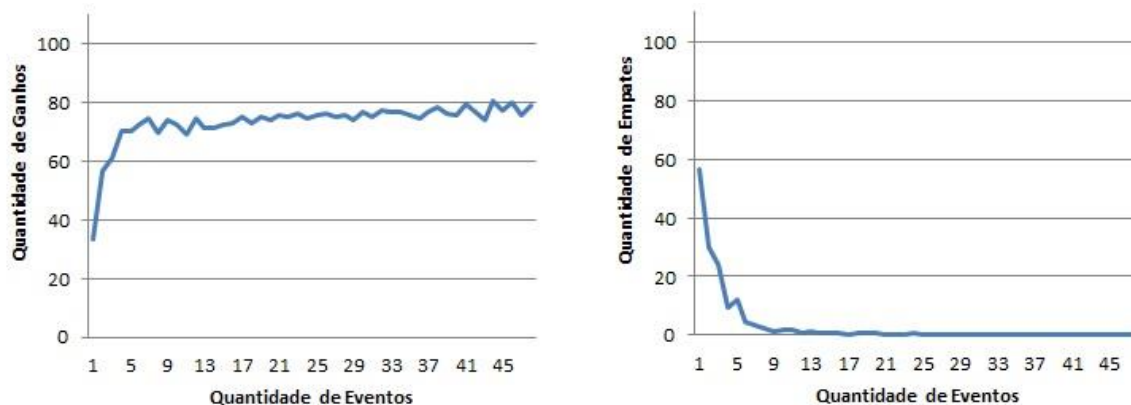
5.2.2 Cenário 2: Mais Chegadas do que Saídas de Pedidos

O segundo cenário produz eventos considerados mistos, ou seja, tanto chegadas quanto saídas são criadas para o procedimento. Entretanto, uma quantidade de cada tipo de evento é pré-determinada. Neste caso, mais itens são acrescentados do que retirados do processo.

Quando os cenários são designados por eventos mistos (entradas e saídas), considera-se que a Heurística 4 (heurística de retirada de pedidos) é incorporada às heurísticas de chegada (H1, H2 e H3) para o emprego do sistema de simulação.

Inicialmente, a utilização do método exato é avaliada de acordo com a quantidade vezes que este modelo obteve “sucesso” em relação aos métodos heurísticos. Na FIGURA 17 (a), tem-se a quantidade de vezes que o conjunto de soluções exatas possui melhores resultados do que as heurísticas, enquanto na FIGURA 17 (b) são verificados quantos empates ocorrem entre as metodologias abordadas.

FIGURA 17 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 2

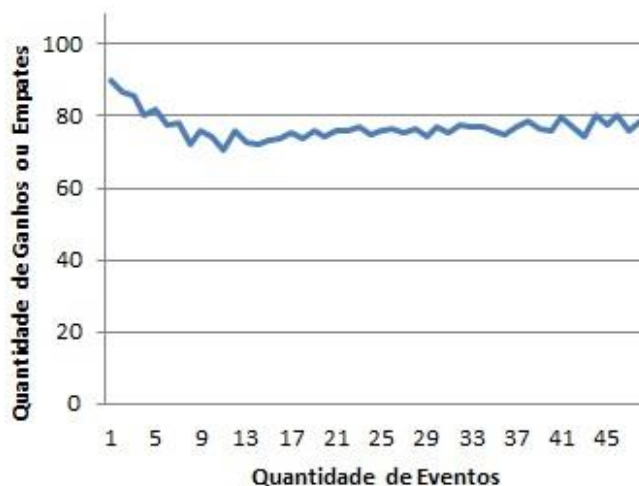


FONTE: A autora (2016).

Pode-se observar que, no início do procedimento, o modelo exato possui uma trajetória crescente quanto a obtenção de melhores resultados se comparado às heurísticas. Em seguida, esta vantagem torna-se constante em um intervalo entre 60 e 80 por cento dos casos. Por outro lado, a quantidade de empates se torna praticamente nula, ao aumentar o número de aplicações dos eventos.

Pode-se verificar na FIGURA 18 que o conjunto de modelos exatos é mais conveniente ou possui o mesmo efeito do que os outros métodos propostos. Neste cenário, observa-se que a série de sequenciamentos realizados pelo método exato possui resultados superiores aos das heurísticas em aproximadamente 80% das replicações.

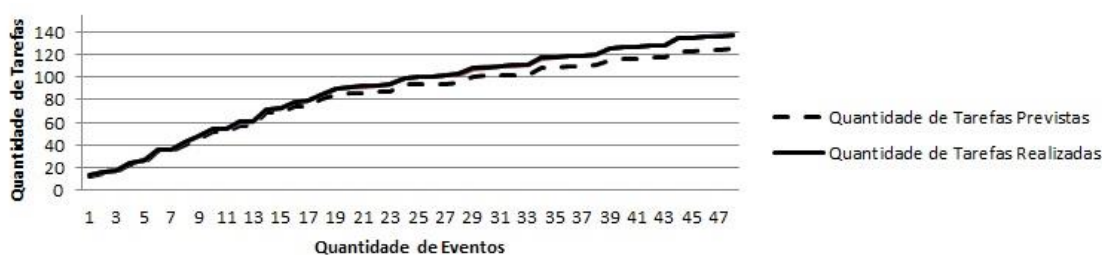
FIGURA 18 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 2



FONTE: A autora (2016).

Como os eventos gerados possuem tempos aleatórios, muitas vezes, as tarefas escolhidas para o cancelamento já foram processadas. Deste modo, nem sempre o re-sequenciamento consegue obter a quantidade de tarefas desejada ao final do procedimento. Sendo assim, a FIGURA 19 verifica esta diferença entre o número de tarefas desejadas ao final do sequenciamento e a quantidade que, de fato, é processada.

FIGURA 19 - QUANTIDADE DE TAREFAS AO FIM DO SEQUENCIAMENTO – CENÁRIO 2



FONTE: A autora (2016).

Pode-se observar pelo gráfico acima que a diferença entre o número de tarefas desejadas e obtidas é pequena ao fim do sequenciamento. Este acontecimento se deve ao fato de que, neste cenário, ocorrem mais chegadas do que saídas de eventos.

A TABELA 4 descreve o acréscimo de tempo de *setup* para cada instância, no segundo cenário. Esta análise se realiza ao longo da quantidade estimada de tarefas no fim do sequenciamento.

TABELA 4 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 2

Tarefas	Aumento de Setup (%)			
	ME	H1	H2	H3
8	52,71%	103,19%	101,02%	73,00%
10	96,40%	190,48%	188,06%	128,39%
12	63,00%	130,96%	134,51%	84,98%
15	71,36%	149,07%	167,46%	93,46%
20	102,60%	230,32%	262,35%	138,06%
30	110,07%	272,76%	297,44%	154,11%
40	95,00%	266,15%	292,16%	135,06%
50	97,88%	316,96%	336,00%	138,79%
60	95,57%	311,55%	344,40%	140,89%
70	91,14%	327,83%	362,14%	136,87%
80	69,41%	283,20%	305,11%	116,22%
90	80,23%	325,32%	351,76%	126,11%
100	73,14%	319,33%	342,75%	117,07%

FONTE: A autora (2016).

Assim como no primeiro cenário, a modelagem matemática produz os melhores resultados referentes ao acréscimo do *setup* inicial, porém uma diferença em relação às heurísticas 1 e 2 ocorre neste cenário.

No cenário 1, a heurística de antecipação dos eventos perde para os outros métodos em todas as avaliações realizadas. Enquanto que, nos primeiros testes (8, 10 e 12 tarefas) do cenário 2, esta heurística possui resultados ruins, porém muito próximos aos da heurística de prorrogação dos eventos e, a partir de 15 tarefas, a heurística de prorrogação de pedidos assume os piores resultados encontrados para o re-sequenciamento de produção, neste cenário.

A TABELA 5, analisa o quanto o *setup* das heurísticas ultrapassa o valor encontrado no conjunto exato após o re-sequenciamento.

TABELA 5 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 2

Tarefas	Quantidade de Eventos Gerados																										
	até 20%			20% a 25%			25% a 30%			30% a 35%			35% a 40%			40% a 45%			45% a 50%								
	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3						
8																											
10																											
12				1,48	1,24	0,53				0,99	0,65	0,31				1,17	1,18	0,47									
15	1,23	1,17	0,42				1,10	1,22	0,35				1,15	1,32	0,36	1,01	1,29	0,27									
20	1,07	1,33	0,32	1,19	1,43	0,46	1,03	1,40	0,37	1,04	1,46	0,30	1,24	1,59	0,35	1,24	1,59	0,35	1,33	1,62	0,43						
30	1,04	1,32	0,33	1,24	1,54	0,40	1,21	1,46	0,33	1,36	1,58	0,43	1,40	1,60	0,38	1,40	1,60	0,38	1,54	1,77	0,40	1,54	1,77	0,40			
40	1,16	1,41	0,32	1,26	1,46	0,32	1,39	1,66	0,35	1,57	1,80	0,36	1,74	2,06	0,43	1,74	2,06	0,43	2,05	2,28	0,46	2,05	2,28	0,46			
50	1,70	1,42	0,23	1,51	1,67	0,27	2,02	1,87	0,38	1,75	1,94	0,36	2,15	2,43	0,44	2,15	2,43	0,44	2,48	2,86	0,46	2,48	2,86	0,46			
60	1,16	1,52	0,27	1,44	1,77	0,32	1,70	2,01	0,41	2,01	2,38	0,47	2,32	2,65	0,51	2,32	2,65	0,51	2,50	2,84	0,53	2,50	2,84	0,53			
70	1,32	1,73	0,27	1,60	1,99	0,38	1,88	2,26	0,39	2,22	2,59	0,45	2,64	3,02	0,52	2,64	3,02	0,52	2,90	3,27	0,54	2,90	3,27	0,54			
80	1,81	2,20	0,49	1,85	2,21	0,47	2,35	2,69	0,61	2,67	3,00	0,64	3,08	3,38	0,70	3,08	3,38	0,70	3,44	3,71	0,72	3,44	3,71	0,72			
90	1,57	1,99	0,30	1,85	2,23	0,40	2,27	2,62	0,46	2,62	2,96	0,51	2,96	3,29	0,56	2,96	3,29	0,56	3,47	3,75	0,65	3,47	3,75	0,65			
100	1,82	2,10	0,29	2,14	2,47	0,45	2,58	2,90	0,50	3,29	3,69	0,71	3,56	3,90	0,71	3,56	3,90	0,71	3,75	4,04	0,69	3,75	4,04	0,69			

FONTE: A autora (2016).

Assim como citado anteriormente, a heurística de antecipação adquire valores inferiores aos da heurística de prorrogação dos pedidos, em sua maioria das vezes. Porém, nenhum dos dois casos obtém acréscimo de tempo de *setup* melhores aos encontrados pela Heurística 3.

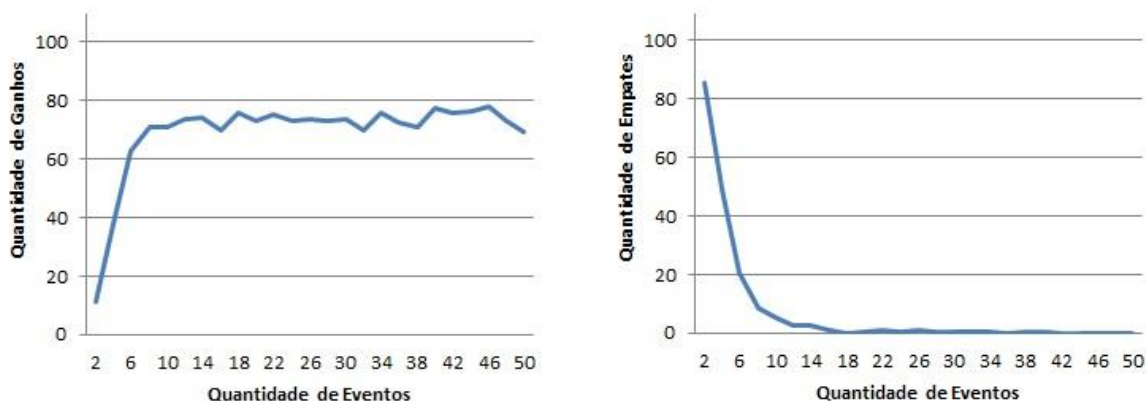
Por outro lado, mesmo a Heurística 3 sendo considerada a melhor entre as três aplicadas (neste caso, todas aplicadas em conjunto com a Heurística 4), ela ainda apresenta resultados bem distantes dos encontrados no modelo exato, já que garantem acréscimos de *setup* em geral 50% maiores do que os *setup* obtidos pelo modelo matemático.

5.2.3 Cenário 3: Chegadas e Saídas em equilíbrio

Dentre os possíveis casos de eventos mistos, o Cenário 3 é responsável por aquele que mantém o sistema em equilíbrio, ou seja, o número de chegadas e saídas do sequenciamento é o mesmo.

Primeiramente, este cenário realiza uma avaliação na eficácia do modelo exato, ou seja, analisa quantas vezes o conjunto fornecido por este método obtém melhores soluções do que às das heurísticas propostas ou soluções compatíveis as das mesmas. Na FIGURA 20 apresentam-se estes resultados.

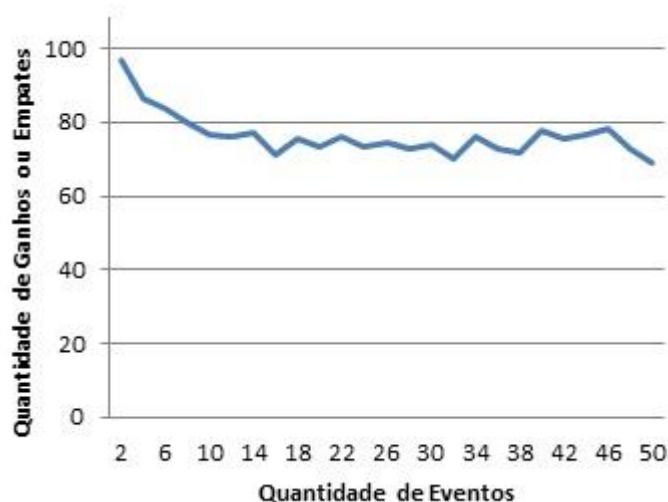
FIGURA 20 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 3



FONTE: A autora (2016).

Na FIGURA 21 tem-se a junção dos dois resultados supracitados, ou seja, analisa-se a quantidade de ganhos ou empates do método exato quando comparado aos métodos heurísticos.

FIGURA 21 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 3



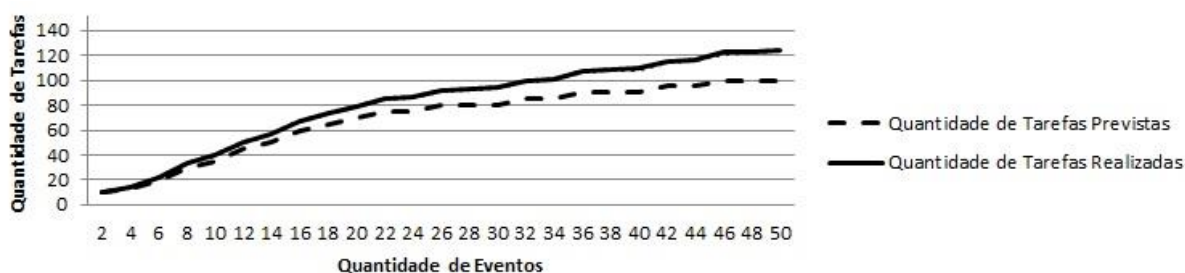
FONTE: A autora (2016).

Como observado graficamente, a quantidade de vezes que o conjunto de modelos matemáticos responde soluções mais adequadas às das heurísticas cresce conforme o número de eventos gerados também aumenta. Com aproximadamente 10 eventos gerados, a quantidade de ganhos do modelo exato envolve de 60 a 80 por cento dos casos, como no cenário 2. Por outro lado, o número de empates decresce na mesma proporção.

Quando avaliados simultaneamente, pode-se afirmar que o modelo exato possui efeito positivo em mais do que 60% dos casos.

Nem sempre os casos mistos conseguem alcançar o máximo do efeito desejado. Muitas vezes, uma tarefa que está para ser reaplicada ao sistema, na forma de retirada de pedidos, não pode ser efetuada por já ter sido processada. Nestes casos, ocorre uma diferença entre a quantidade de tarefas pretendidas no final do re-sequenciamento e àquelas que realmente terão sido efetuadas. Para avaliar a margem dessa diferença, tem-se a FIGURA 22 abaixo.

FIGURA 22 - QUANTIDADE DE TAREFAS AO FIM DO SEQUENCIAMENTO – CENÁRIO 3



FONTE: A autora (2016).

Pode-se observar que a quantidade de tarefas esperada ao fim do processo é inferior à obtida pelos métodos desenvolvidos. Isto se deve à questão supracitada, que considera que nem todas as tarefas que deveriam ser retiradas cumprem o seu objetivo.

A TABELA 6 representa o aumento de *setup* para as tarefas em um sistema em equilíbrio.

TABELA 6 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 3

Tarefas	Aumento de Setup (%)			
	ME	H1	H2	H3
8	36,50%	61,48%	59,82%	47,94%
10	57,19%	102,21%	96,38%	71,48%
12	47,40%	83,09%	79,84%	62,33%
15	56,06%	106,61%	114,60%	80,39%
20	76,99%	152,59%	168,93%	111,67%
30	81,49%	172,37%	184,01%	120,68%
40	73,55%	173,27%	186,60%	110,30%
50	76,57%	195,04%	211,53%	110,07%
60	75,25%	205,66%	224,46%	117,62%
70	72,94%	211,61%	233,99%	113,23%
80	52,97%	183,12%	196,74%	96,15%
90	63,20%	208,95%	225,33%	104,92%
100	56,94%	209,10%	224,39%	99,50%

FONTE: A autora (2016).

Constata-se que o *setup* final do modelo exato representa o acréscimo mínimo em um re-sequenciamento no qual a quantidade de entradas e saídas de pedidos é idêntica. Este aumento concentra-se entre 30 e 80 por cento do valor do *setup* original, enquanto as algumas heurísticas chegam a ultrapassar 200% do valor inicial.

Na TABELA 7, o acréscimo de *setup* das heurísticas em relação ao *setup* da modelagem exata ao final do re-sequenciamento é analisado nos intervalos de geração de eventos, para todas as tarefas consideradas nesta pesquisa.

Assim como ocorre nos demais cenários, nota-se que a Heurística 3, responsável por alocar a nova tarefa na melhor posição possível em determinada fase do sequenciamento, é aquela que detém da melhor aproximação ao valor encontrado na modelagem exata.

TABELA 7 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 3

Tarefas	Quantidade de Eventos Gerados																					
	até 20%			20% a 25%			25% a 30%			30% a 35%			35% a 40%			40% a 45%			45% a 50%			
	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	
8				0,79	0,55	0,24													0,63	0,69	0,35	
10	1,01	0,64	0,21																			
12	1,51	0,93	0,42																			
15																						
20	0,96	1,15	0,51																			
30	0,82	1,02	0,41																			
40	0,86	1,14	0,42	1,17	1,25	0,51																
50	0,93	1,14	0,25	1,42	1,71	0,32	1,28	1,61	0,53	1,22	1,43	0,32	1,79	1,84	0,47	1,82	2,17	0,60	1,96	2,20	0,52	
60	1,09	1,35	0,39	1,22	1,39	0,36	1,34	1,59	0,47	1,90	2,25	0,67	1,77	2,03	0,56	2,14	2,38	0,73	2,25	2,50	0,68	
70	1,16	1,39	0,36	1,24	1,58	0,39	1,62	1,92	0,46	1,69	1,95	0,47	2,17	2,49	0,68	2,29	2,69	0,59	2,50	2,80	0,73	
80	1,40	1,68	0,49	1,80	2,14	0,64	1,93	2,25	0,70	2,34	2,60	0,84	2,57	2,83	0,73	2,89	3,08	0,94	3,52	3,72	1,16	
90	1,37	1,71	0,43	1,57	1,85	0,46	1,81	2,06	0,52	2,23	2,47	0,63	2,48	2,72	0,66	2,96	3,16	0,88	3,01	3,31	0,89	
100	1,58	1,79	0,41	1,74	2,01	0,52	2,20	2,43	0,60	2,48	2,75	0,68	2,89	3,17	0,78	3,15	3,38	0,97	3,58	3,91	0,99	

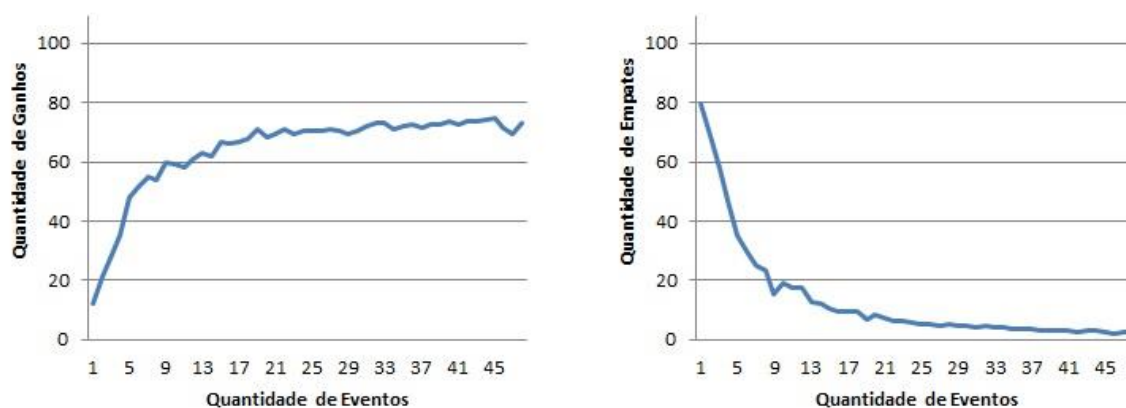
FONTE: A autora (2016).

5.2.4 Cenário 4: Mais Saídas do que Chegadas de Pedidos

O quarto cenário é responsável por retirar mais tarefas do que inseri-las ao longo do sequenciamento.

A FIGURA 23 avalia a proporção de ganhos e empates, respectivamente, de um modelo matemático sobre as heurísticas comparativas, ao longo da quantidade de aplicações dos eventos.

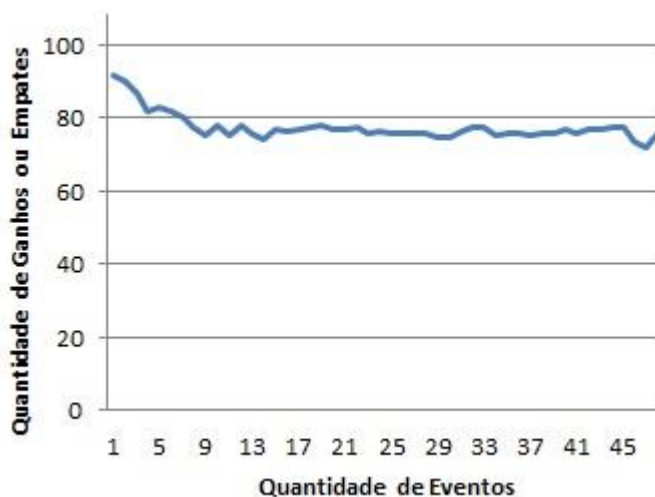
FIGURA 23 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 4



FONTE: A autora (2016).

A união destas duas análises anteriores resulta no gráfico encontrado na figura abaixo.

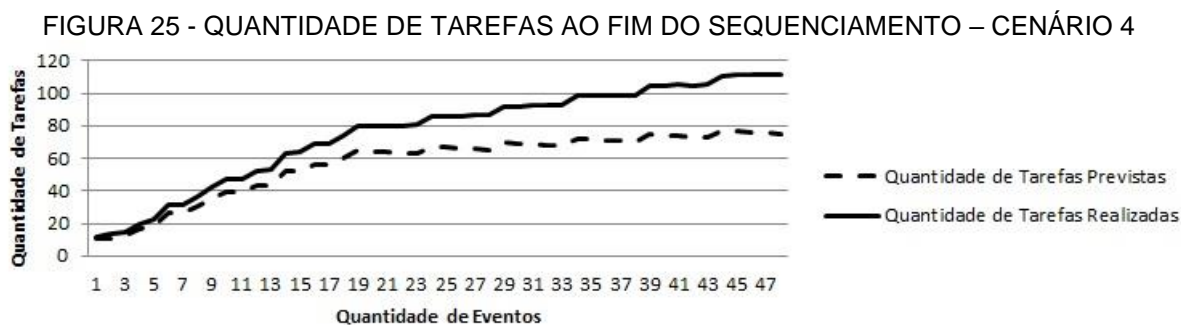
FIGURA 24 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO ÀS HEURÍSTICAS – CENÁRIO 4



FONTE: A autora (2016).

Os gráficos acima são análogos aos outros casos de eventos mistos, como visto anteriormente. Contudo, ao analisar a diferença da quantidade de tarefas previstas e aquelas que realmente pertencem ao sequenciamento final, nota-se que

o quarto cenário apresenta a maior disparidade entre esses valores. Este fato já era esperado, visto que esta opção, dentre aquelas com cenários mistos, é a que apresenta maior número de desistência de pedidos do que entrada dos mesmos. A diferença entre a quantidade de tarefas previstas e realizadas ao fim do sequenciamento pode ser observada na FIGURA 25.



FONTE: A autora (2016).

O conjunto que analisa qual o aumento do tempo de *setup* no decorrer do processo é exposto a seguir, na TABELA 8. O acréscimo do *setup*, para cada teste, possui as mesmas características averiguadas nos cenários anteriores. Em todos os casos, o conjunto de modelos exatos possui o melhor desempenho quanto à minimização do *setup* e, conseqüentemente, do *makespan*.

TABELA 8 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO SEQUENCIAMENTO INICIAL - CENÁRIO 4

Tarefas	Aumento de Setup (%)			
	ME	H1	H2	H3
8	36,50%	61,48%	59,82%	47,94%
10	57,19%	102,21%	96,38%	71,48%
12	47,40%	83,09%	79,84%	62,33%
15	56,06%	106,61%	114,60%	80,39%
20	76,99%	152,59%	168,93%	111,67%
30	81,49%	172,37%	184,01%	120,68%
40	73,55%	173,27%	186,60%	110,30%
50	76,57%	195,04%	211,53%	110,07%
60	75,25%	205,66%	224,46%	117,62%
70	72,94%	211,61%	233,99%	113,23%
80	52,97%	183,12%	196,74%	96,15%
90	63,20%	208,95%	225,33%	104,92%
100	56,94%	209,10%	224,39%	99,50%

FONTE: A autora (2016).

Os testes a seguir, representam a avaliação do acréscimo do tempo de *setup* em todas as heurísticas aplicadas no problema, comparando-as ao valor obtido pela modelagem matemática. Novamente, a Heurística 3 responde os

melhores valores quando comparados aos obtidos no modelo exato. Para maiores detalhes, a TABELA 9 enquadra as soluções encontradas.

TABELA 9 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 4

Tarefas	Quantidade de Eventos Gerados																				
	até 20%			20% a 25%			25% a 30%			30% a 35%			35% a 40%			40% a 45%			45% a 50%		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3
8																					
10																					
12				1,25	1,19	0,34															
15	0,99	1,18	0,27																		
20	0,69	1,02	0,43	0,70	1,02	0,40	0,58	0,89	0,36	0,76	0,90	0,45	0,72	0,88	0,45	0,75	0,92	0,46	0,66	0,88	0,39
30	0,72	1,09	0,36	0,68	0,95	0,35	0,69	0,86	0,36	0,69	0,90	0,40	0,69	0,81	0,36	0,74	0,87	0,40	0,80	0,87	0,42
40	0,71	0,92	0,46	0,78	0,94	0,41	0,81	1,00	0,44	0,76	0,89	0,39	0,87	1,04	0,44	0,99	1,11	0,50	1,12	1,23	0,57
50	0,67	0,90	0,41	1,03	1,02	0,43	0,93	1,00	0,43	0,95	1,06	0,47	1,01	1,14	0,48	1,08	1,23	0,53	1,28	1,34	0,54
60	0,79	1,07	0,49	0,79	0,98	0,42	0,89	1,09	0,51	1,03	1,24	0,54	1,14	1,33	0,59	1,28	1,44	0,64	1,34	1,50	0,68
70	0,92	1,08	0,48	0,90	1,11	0,46	1,07	1,26	0,54	1,13	1,30	0,54	1,34	1,52	0,65	1,43	1,64	0,68	1,64	1,84	0,78
80	1,21	1,41	0,75	1,36	1,60	0,81	1,43	1,67	0,83	1,70	1,91	0,98	1,83	2,05	0,97	1,93	2,13	0,99	2,20	2,41	1,20
90	0,98	1,21	0,49	1,06	1,26	0,50	1,20	1,40	0,57	1,38	1,57	0,66	1,55	1,72	0,71	1,79	1,95	0,86	2,14	2,39	1,01
100	1,05	1,15	0,53	1,18	1,33	0,59	1,38	1,52	0,69	1,54	1,72	0,70	1,77	1,94	0,85	1,98	2,15	0,89	2,18	2,38	0,94

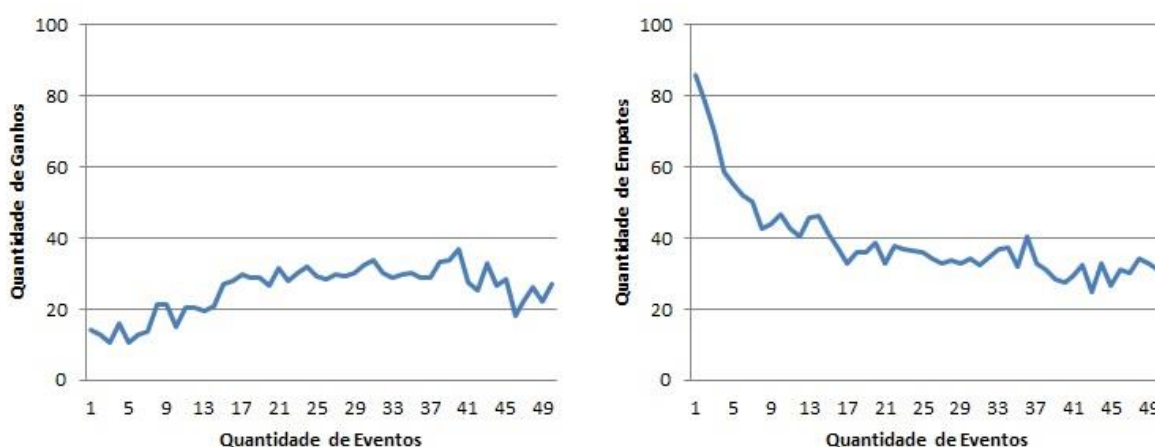
FONTE: A autora (2016).

5.2.5 Cenário 5: Apenas Saídas de Pedidos

O quinto cenário apresenta um sequenciamento em que todos os eventos são caracterizados como retirada de tarefas. Isto, em um sistema real, pode ser representado por cancelamento de produtos via clientes, retirada de itens do processo de produção pela falta de matéria-prima, entre outros fatores que modificam o processamento pré-estabelecido.

A primeira análise verificada para este cenário é exposta pelo gráfico abaixo.

FIGURA 26 - QUANTIDADE DE GANHOS E EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO À HEURÍSTICA – CENÁRIO 5



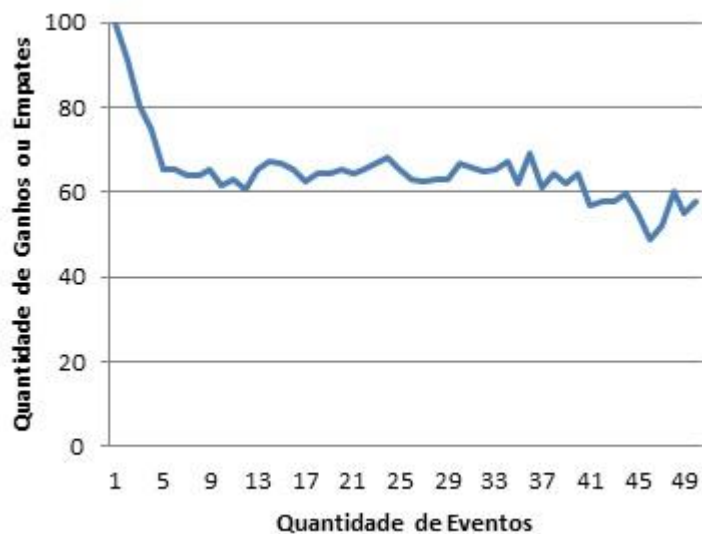
FONTE: A autora (2016).

A FIGURA 26 mostra quantas vezes o conjunto de modelos exatos obtém um valor inferior (FIGURA 26 (a)) ou igual (FIGURA 26 (b)) aos encontrados pela heurística de saídas de tarefas.

Ao aumentar os cancelamentos de tarefas, pode-se observar no item (a) que a simulação não obtém valor inferior do que os da heurística em mais do que 40% dos casos. Nota-se também que no segundo caso, inicialmente, o *makespan* do sequenciamento final pelo método exato empata com os valores heurísticos em quase 90% dos casos. Entretanto, ao aumentar o número de cancelamentos de tarefas, a quantidade de empates decresce e obtém valores entre 20 e 40 por cento.

Ao analisar os casos de ganho e empate em conjunto, tem-se que o modelo exato é compensatório em aproximadamente 60% dos testes, como mostrado na FIGURA 27.

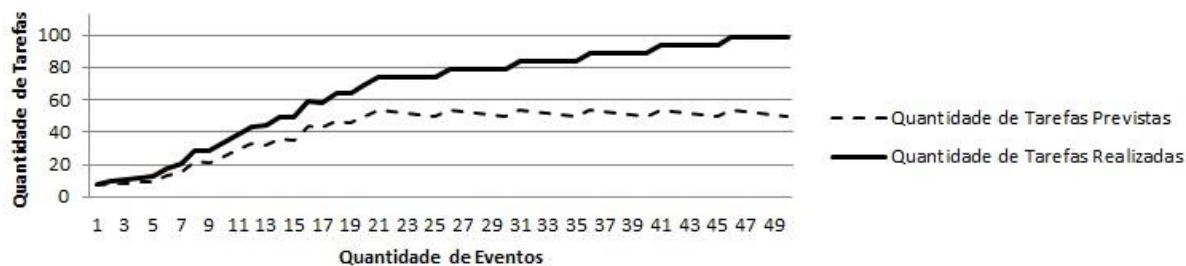
FIGURA 27 - QUANTIDADE DE GANHOS OU EMPATES DO MODELO EXATO EM RELAÇÃO À HEURÍSTICA – CENÁRIO 5



FONTE: A autora (2016).

A verificação do número de tarefas ao final do sequenciamento pode ser encontrada na FIGURA 28 a seguir.

FIGURA 28 - QUANTIDADE DE TAREFAS AO FIM DO SEQUENCIAMENTO – CENÁRIO 5



FONTE: A autora (2016).

Na figura acima, pode-se perceber que a quantidade de tarefas realizadas ao final do sequenciamento está muito acima do esperado pelo sequenciamento.

Em seguida, realiza-se uma análise do acréscimo do *setup* para as instâncias consideradas. Por meio da TABELA 10 avalia-se o aumento do *setup*, tanto do modelo exato quanto da heurística, para cada evento criado.

TABELA 10 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO SEQUENCIAMENTO INICIAL
- CENÁRIO 5

Tarefas	Aumento de Setup (%)	
	ME	H4
8	5,19%	14,45%
10	40,43%	60,62%
12	4,17%	36,97%
15	23,47%	88,35%
20	35,77%	178,00%
30	38,31%	193,10%
40	15,56%	169,62%
50	49,17%	238,95%
60	50,69%	325,65%
70	31,47%	320,44%
80	102,00%	284,35%
90	18,25%	353,98%
100	30,15%	365,06%

FONTE: A autora (2016).

Constata-se que, em todas as instâncias abordadas pela pesquisa, a aplicação do conjunto de modelos exatos resulta em melhores soluções se comparada às soluções encontradas pela heurística de retirada de eventos. Nos casos de 8 e 10 tarefas está diferença entre os métodos citados não é tão relevante, entretanto quando aumenta-se o número de tarefas das instâncias, esta diferença é considerável.

A última análise realizada neste cenário avalia o aumento do *setup* da Heurística 4, se comparado aos valores do modelo matemático, em intervalos de geração de eventos, para todas as instâncias consideradas. A TABELA 11 proporciona esta avaliação.

Como esperado, as últimas instâncias (90 e 100 tarefas) são aquelas que geram maior acréscimo quando aplicada uma heurística simples, já que representam as maiores mudanças de posições em um sequenciamento.

TABELA 11 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* FINAL DO MODELO EXATO - CENÁRIO 5

Tarefas	Quantidade de Eventos Gerados									
	até 20%	20% a 25%	25% a 30%	30% a 35%	35% a 40%	40% a 45%	45% a 50%	H4	H4	H4
8	2,09	2,24			0,73			2,30		
10	0,15		0,63		0,66			0,56		
12	22,10	3,36		14,26				11,95	5,58	
15	2,78		4,32	2,86	1,87			2,95		
20	3,56	5,17	4,44	2,67	3,19			5,82	4,18	
30	4,37	5,41	7,46	3,41	10,46			5,94	4,46	
40	26,84	27,86	26,42	19,90	16,96			13,40	23,97	
50	4,24	9,12	9,92	7,70	14,04			10,23	8,54	
60	5,58	16,35	18,40	16,52	15,67			17,09	17,06	
70	8,12	26,95	47,28	25,34	58,29			33,08	26,01	
80	1,94	7,26	7,42	7,50	7,41			6,73	6,78	
90	11,30	108,89	348,60	150,01	75,54			147,34	47,84	
100	10,27	71,87	64,98	50,85	58,41			58,09	83,17	

FONTE: A autora (2016).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, ressaltam-se as principais considerações sobre a pesquisa e sobre os resultados encontrados na mesma. A primeira seção descreve os cinco cenários abordados na pesquisa, juntamente com suas principais observações. Já na segunda seção, mencionam-se quais as possibilidades futuras que envolvem esta área de trabalho.

6.1 CONCLUSÃO

Para descrever problemas de sequenciamento de produção que se aproximem, cada vez mais, de situações reais, uma simulação foi aplicada a um problema de uma única máquina, com o objetivo de minimizar o *makespan*. A finalidade desta simulação é criar, aleatoriamente, novos eventos a serem aplicados em um processo, uma vez que o sequenciamento já foi iniciado.

Estes novos eventos são caracterizados como entrada de novos pedidos adquiridos pelos clientes ou saída de pedidos cancelados pelos mesmos. Na simulação aplicada para esta dissertação, foram propostos dois formatos de resolução para os problemas: a primeira desenvolvida por um modelo matemático e a segunda por regras (heurísticas) que facilitem a obtenção da solução. Em ambos os casos, cinco variações do sistema foram efetuadas: apenas inserções de novos pedidos, mais inserções do que desistências, chegada e saída em equilíbrio, mais desistências do que inserções e, por fim, apenas desistências de pedidos.

Em todos os casos abordados na dissertação, observou-se que o conjunto de modelos exatos encontra uma solução melhor ou igual às encontradas pelas heurísticas propostas em mais de 60% dos casos, sendo que para o cenário onde apenas ocorrem inserções, o ganho obtido por ele, chega a sua quase totalidade para um número grande de chegadas de tarefas.

Nos cenários em que ocorrem desistências de pedidos, analisou-se que quanto mais tarefas precisam ser retiradas do sequenciamento, maior a distância entre a quantidade de tarefas desejadas e obtidas, ao fim do sequenciamento. Isto se deve ao fato de que, muitas vezes, o evento programado para ser retirado do sequenciamento já foi efetuado anteriormente.

Os resultados encontrados em cada um dos cenários desenvolvidos fornecem informações que auxiliam na tomada de decisões. Em todos os casos abordados, mostrou-se que as aplicações do modelo matemático são o método com menor acréscimo de *setup* dentre todos aplicados.

Além disso, em todos os cenários, a Heurística 3 pode ser considerada a melhor dentre as executadas, já que a mesma busca a melhor posição possível para alocar uma próxima tarefa.

6.2 DISCUSSÃO SOBRE TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo realizado, no qual se aplica uma simulação para avaliar a novos eventos em um sequenciamento, surgem alguns apontamentos interessantes para trabalhos futuros.

Um sistema produtivo é desenvolvido para atender as demandas dos clientes. Para tornar este atendimento o mais próximo possível da realidade, sem prejudicar os prazos de entrega, sugere-se que uma simulação semelhante à realizada neste trabalho, possa ser implementada para outros modelos de sequenciamento de produção, tais como: minimização de atrasos, adiantamentos, entre outros. Nestes casos, uma função objetivo com multi critérios pode auxiliar na busca pela melhor solução para o problema abordado.

Outra possibilidade é realizar este procedimento em ambientes mais amplos de produção. *Flow Shop* e *Job Shop*, por exemplo, são ambientes frequentemente encontrados em sistemas reais e que necessitam de um tratamento mais próximo desta realidade. Deste modo, pesquisas envolvendo critérios estocásticos, são uma ótima opção para este tipo de problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKKAN, C. Improving schedule stability in single-machine rescheduling for new operation insertion. **Computers & Operations Research**, v. 64, p. 198–209, 2015.
- ALIDAEI, B.; WOMER, N.K. Scheduling with time depend processing time: Review and Extensions. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, n.7, p. 711-720, 1999.
- ALLAHVERDI, A.; NG, C. T.; CHENG, T.C.E.; KOVALYOV, M. Y. A survey of scheduling problems with setup times or costs. **European Journal of Operational Research**, v. 187, p. 985–1032, 2008.
- ALLAHVERDI, A.; AYDILEK, H.; AYDILEK, A. Single machine scheduling problem with interval processing times to minimize mean weighted completion time. **Computers & Operations Research**, v. 51, p. 200–207, 2014.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- BAKER, K. R.; SMITH, J. C. A multiple-criterion model for machine scheduling. **Journal of Scheduling**, v. 6, p. 7–16, 2003.
- BAKER, K. R.; TRIETSCH, D. **Principles of Sequencing and Scheduling**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- BANKS, J. **Principles of Simulation**. In: Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. p. 3-30.
- BARTOSIEVICZ NETTO, F. **Otimização do tempo total de trabalho na programação da produção em oficina de máquinas com tempo de preparação dependente da sequência**. 2014. 66 f. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BRISKORN, D.; JAEHN, F.; PESCH, E. Exact algorithms for inventory constrained scheduling on a single machine. **Journal of Scheduling**, v. 16, p. 105–115, 2013.
- CHENG, S. R. Some new problems on two-agent scheduling to minimize the earliness costs. **Int . J . Production Economics**, v. 156, p. 24–30, 2014.
- CHENG, T.C.E.; DING, Q. The time dependent machine makespan problem is strongly NP-complete. **Computers & Operations Research**, v. 26, p. 749-754, 1999.
- CHOI, J. Y. Minimizing total weighted completion time under makespan constraint for two-agent scheduling with job-dependent aging effects. **Computers & Industrial Engineering**, v. 83, p. 237–243, 2015.
- DOLGUI, A.; GORDON, V.; STRUSEVICH, V. Single machine scheduling with precedence constraints and positionally dependent processing times. **Computers and Operation Research**, v. 39, n. 6, p. 1218–1224, 2012.
- FREITAS Filho, P.J. de. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com aplicações em ARENA**. 2 ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.
- GEORGIADIS, P.; MICHALOUDIS, C. Real-time production planning and control

system for job-shop manufacturing : A system dynamics analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n. 1, p. 94–104, 2012.

GORCZYCA, M.; JANIĄK, A.; JANIĄK, W.; DYMANSKI, M. Makespan optimization in a single-machine scheduling problem with dynamic job ready times — Complexity and algorithms. **Discrete Applied Mathematics**, v. 182, p. 162–168, 2015.

HALL, N. G.; POTTS, C. N. Rescheduling for new orders. **Operations Research**, v. 52, p. 440-453, 2004.

HERR, O.; GOEL, A. Minimising total tardiness for a single machine scheduling problem with family setups and resource constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 248, n. 1, p. 123–135, 2016.

HOOGEVEEN, H. Multicriteria scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 167, p. 592–623, 2005.

MURTY, K. G. **Linear Programming**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1983.

KELLERER, H.; RUSTOGI, K.; STRUSEVICH, V. A. Approximation schemes for scheduling on a single machine subject to cumulative deterioration and maintenance. **Journal of Scheduling**, v. 16, p. 675–683, 2013.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation with ARENA**. 2 ed. Boston: McGraw-Hill, 2001.

LIU, Z.; RO, Y. K. Rescheduling for machine disruption to minimize makespan and maximum lateness. **Journal of Scheduling**, v. 17, p. 339–352, 2014.

LOCH, G. V. **Mensuração e Previsão do Custo da Falha Interna via Modelo de Simulação**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharias) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

LU, C. C.; LIN, S. W.; YING, K. C. Minimizing worst-case regret of makespan on a single machine with uncertain processing and setup times. **Applied Soft Computing**, v. 23, p. 144–151, 2014.

LU, L.; NG, C. T.; ZHANG, L. Optimal algorithms for single-machine scheduling with rejection to minimize the makespan. **Int . J . Production Economics**, v. 130, p. 153–158, 2011.

LUSTOSA L.; MESQUITA, M. A.; QUELHAS, O.; OLIVEIRA, R. **Planejamento e Controle da Produção**. Editora Elsevier, 2008.

MORSY, E.; PESCH, E. Approximation algorithms for inventory constrained scheduling on a single machine. **Journal of Scheduling**, v. 18, n. 6, p. 645–653, 2015.

PACHECO, J.; ÁNGEL-BELLO, F.; ÁLVAREZ, A. A multi-start tabu search method for a single-machine scheduling problem with periodic maintenance and sequence-dependent set-up times. **Journal of Scheduling**, v. 16, p. 661–673, 2013.

PINEDO, M. L. **Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems**. New York: Springer, 2012.

POTTS, C. N.; STRUSEVICH, V. A. Fifty years of scheduling: a survey of milestones. **Journal of the Operation Research Society**, v. 60, p. 41-68, 2009.

SHABTAY, D.; GASPAR, N.; YEDIDSON, L. A bicriteria approach to scheduling a single machine with job rejection and positional penalties. **J. Comb. Optim.**, v. 23, p.

395–424, 2012.

STERN, H. I.; VITNER, G. Scheduling parts in a combined production-transportation work cell. **Journal of the Operation Research Society**, v. 41 n. 7, p. 625-632, 1990.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática**. São Paulo: Atlas, 2007.

XU, D.; WAN, L.; LIU, A.; YANG, D.L. Single machine total completion time scheduling problem with workload-dependent maintenance duration. **Omega**, v. 52, p. 101–106, 2015.

YANG, B. Single machine rescheduling with new jobs arrivals and processing time compression. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 34, p. 378–384, 2007.

YUAN, J.; MU, Y. Rescheduling with release dates to minimize makespan under a limit on the maximum sequence disruption. **European Journal of Operational Research**, v. 182, p. 936-944, 2007.

ZHANG, X.; WANG, H.; WANG, X. Patients scheduling problems with deferred deteriorated functions. **Journal of Combinatorial Optimization**, v. 30, p. 1027–1041, 2015.

ZHONG, X.; OU, J.; WANG, G. Order acceptance and scheduling with machine availability constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 232, n. 3, p. 435–441, 2014.

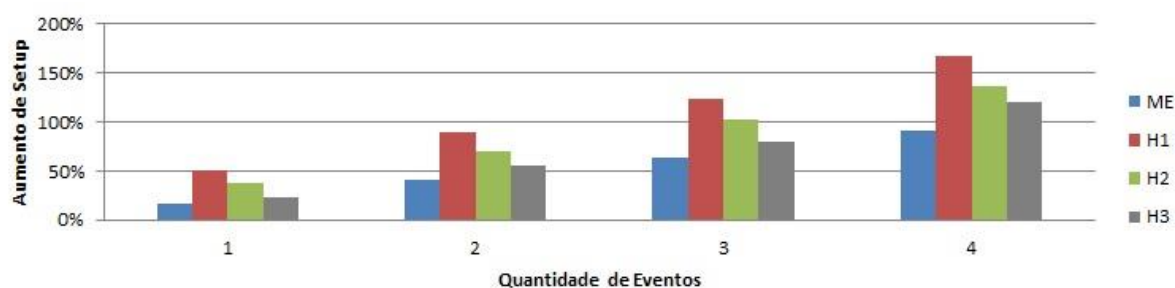
APÊNDICE 1 – GRÁFICOS DO ACRÉSCIMO DE *SETUP* AO FINAL DO
SEQUENCIAMENTO

Os gráficos apresentados abaixo representam o aumento do *setup* de cada um dos procedimentos efetuados (modelo exato e as heurísticas aplicadas) em relação ao *setup* do sequenciamento inicial para cada inserção concernente às tarefas do sistema.

Deste modo, cada um dos gráficos analisa a porcentagem acrescida de *setup* para cada quantidade de tarefas iniciais, em cada cenário proposto na pesquisa.

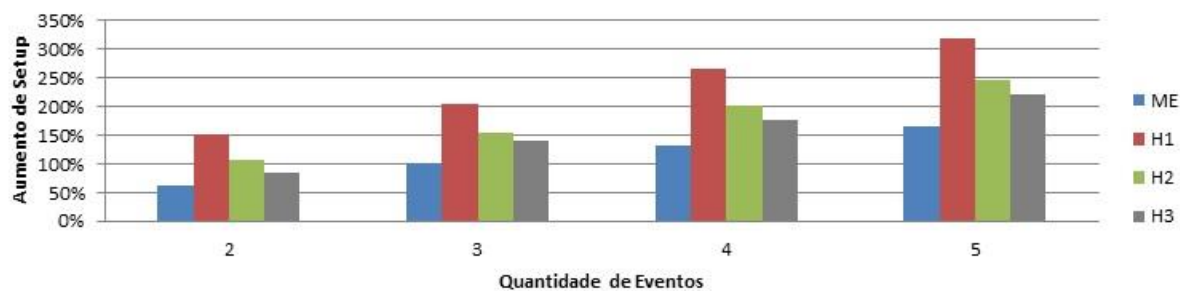
- Cenário 1: Apenas chegadas de Pedidos

FIGURA 29 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 8 TAREFAS - CENÁRIO 1



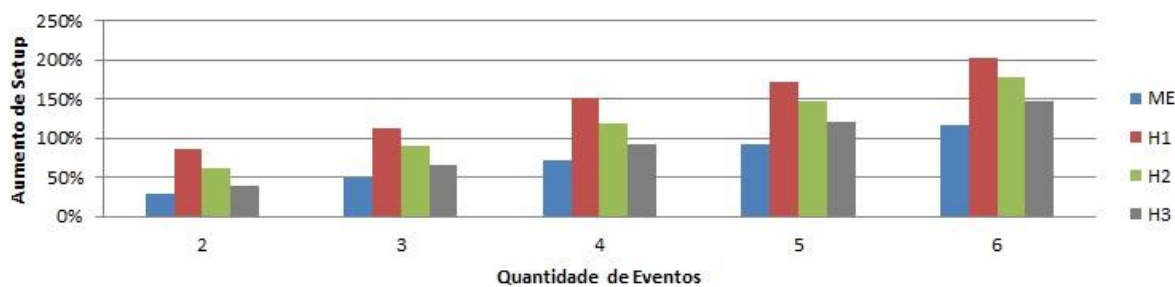
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 30 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 10 TAREFAS - CENÁRIO 1

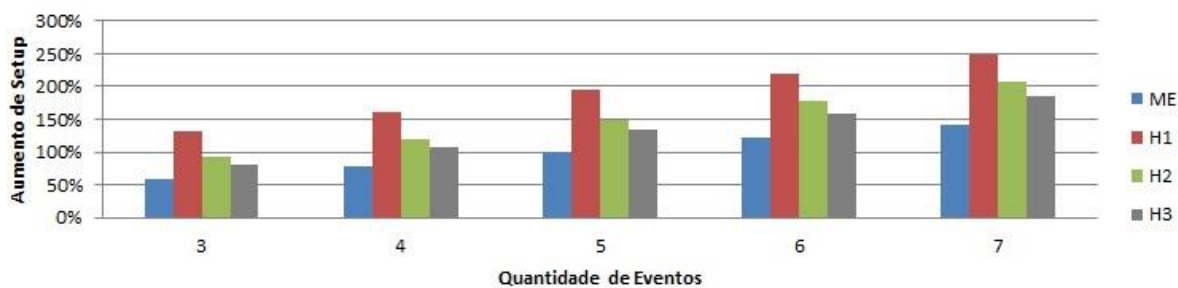


FONTE: A autora (2016).

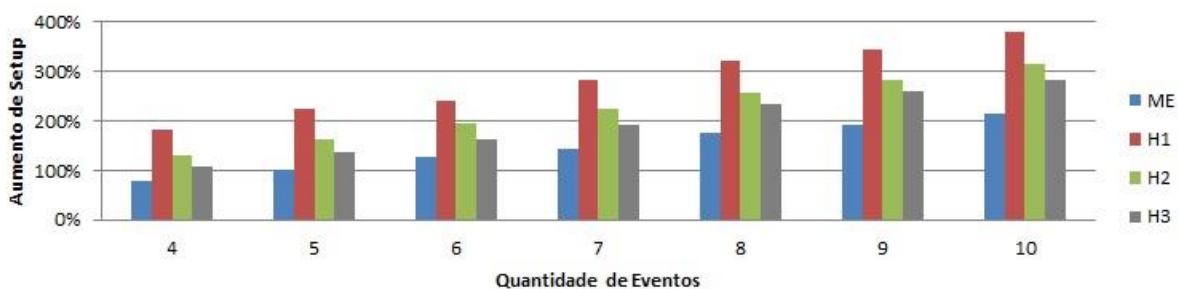
FIGURA 31 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 12 TAREFAS - CENÁRIO 1



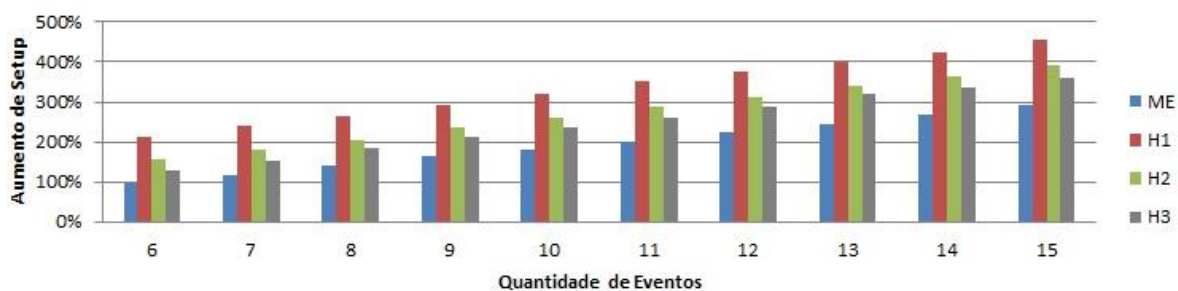
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 32 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 15 TAREFAS - CENÁRIO 1

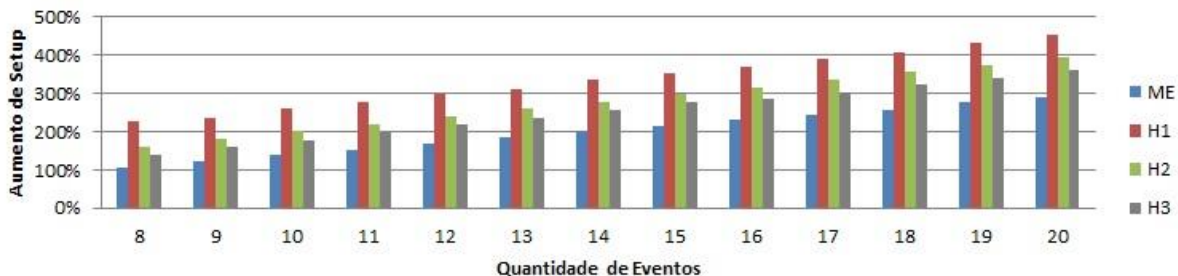
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 33 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 20 TAREFAS - CENÁRIO 1

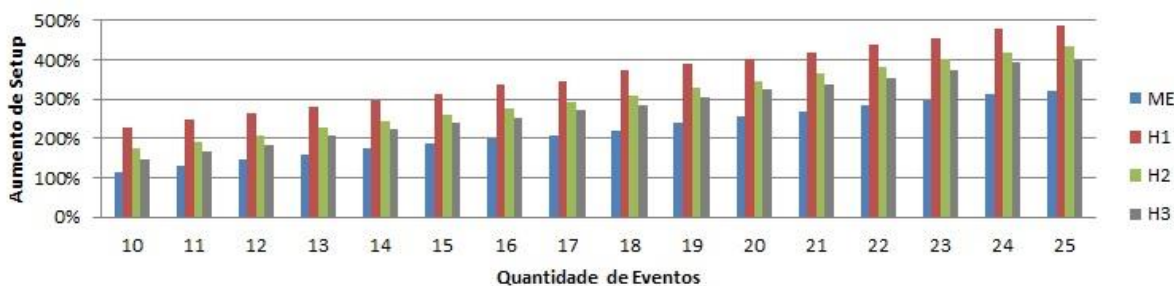
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 34 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 30 TAREFAS - CENÁRIO 1

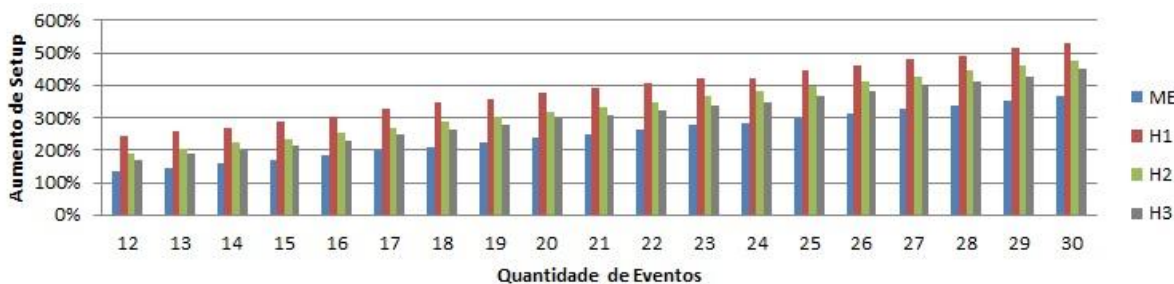
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 35 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 40 TAREFAS - CENÁRIO 1

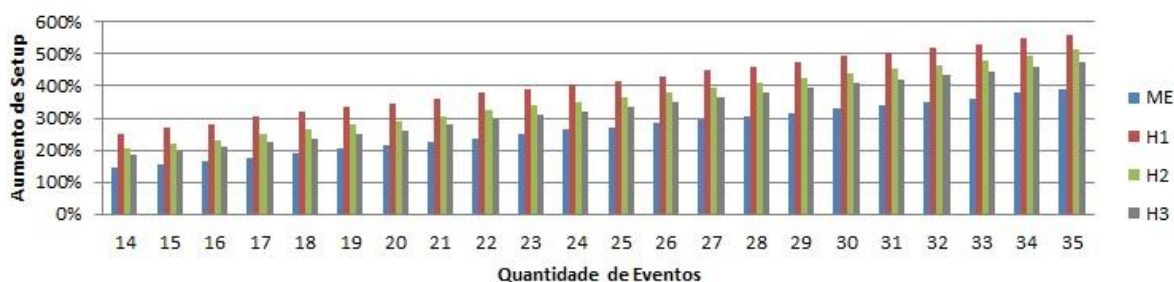
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 36 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 50 TAREFAS - CENÁRIO 1

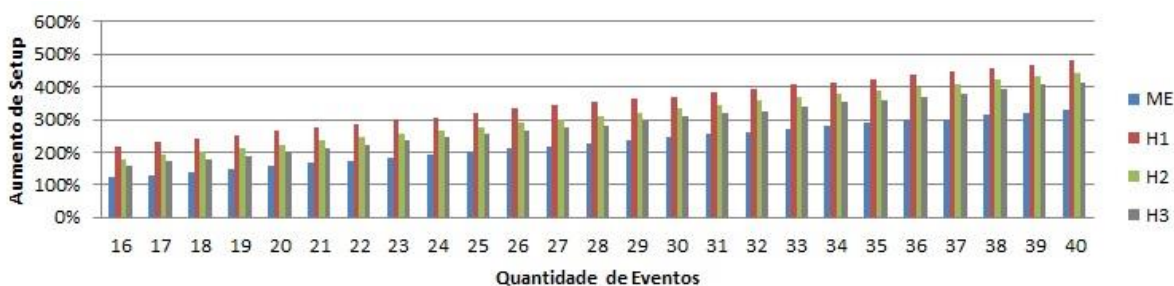
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 37 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 60 TAREFAS - CENÁRIO 1

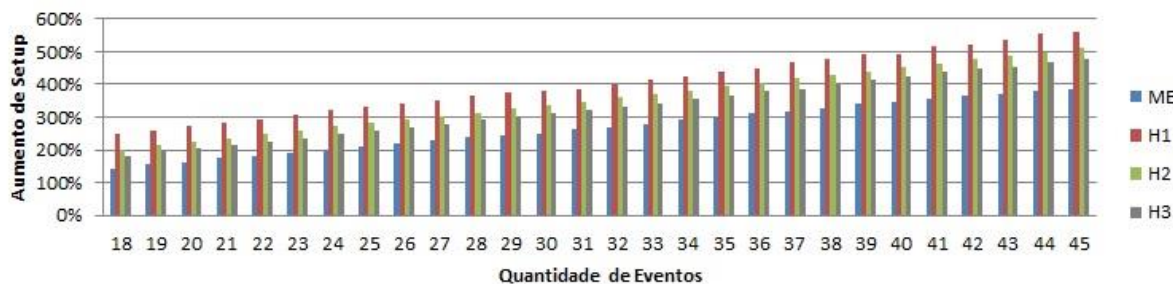
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 38 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 70 TAREFAS - CENÁRIO 1

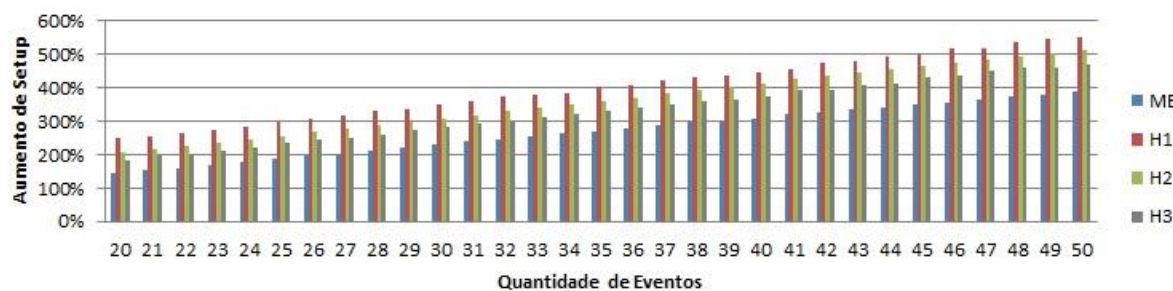
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 39 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 80 TAREFAS - CENÁRIO 1

FONTE: A autora (2016).

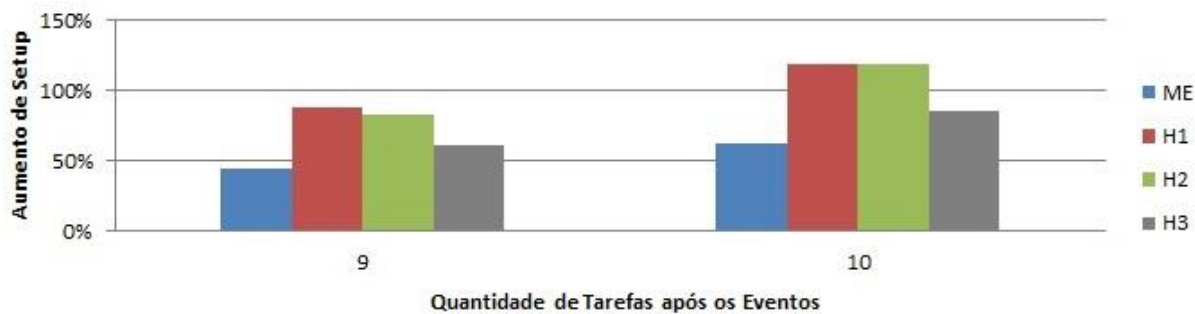
FIGURA 40 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 90 TAREFAS - CENÁRIO 1

FONTE: A autora (2016).

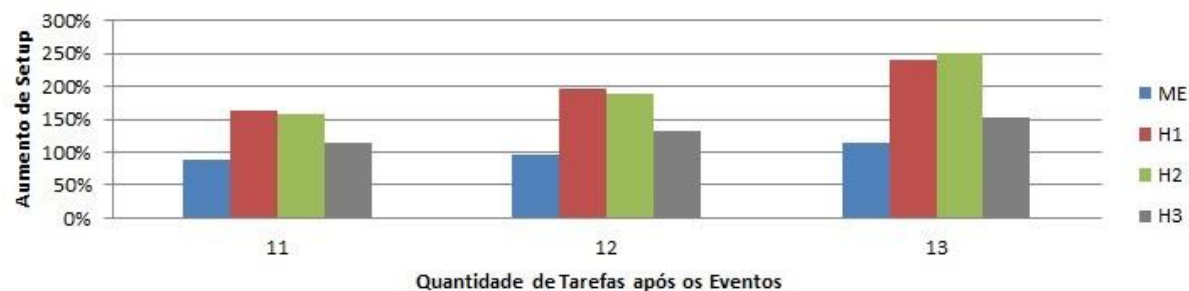
FIGURA 41 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 100 TAREFAS - CENÁRIO 1

FONTE: A autora (2016).

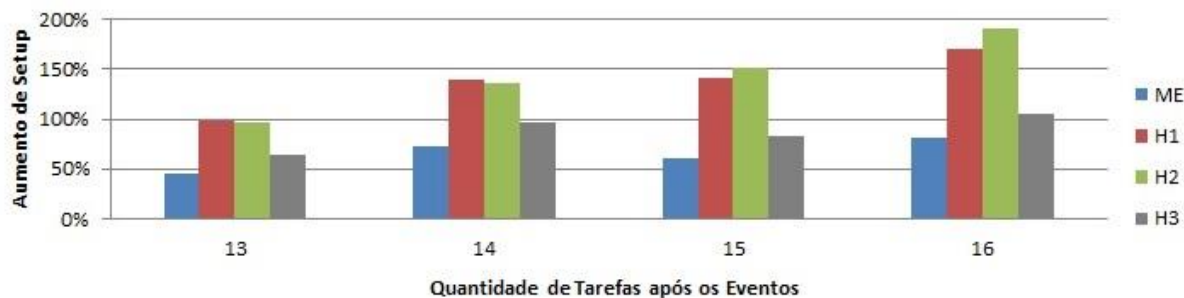
- Cenário 2: Mais chegadas do que saídas de pedidos

FIGURA 42 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 8 TAREFAS - CENÁRIO 2

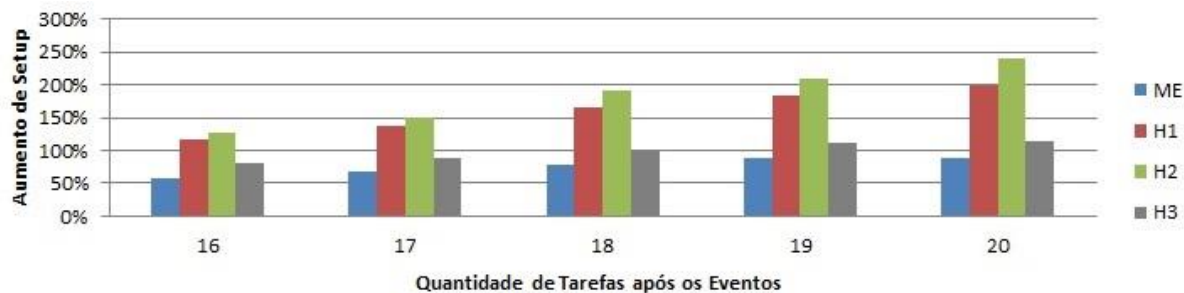
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 43 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 10 TAREFAS - CENÁRIO 2

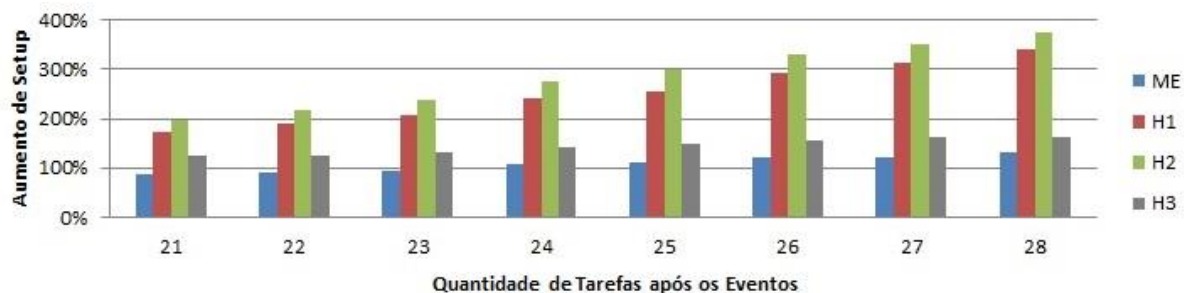
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 44 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 12 TAREFAS - CENÁRIO 2

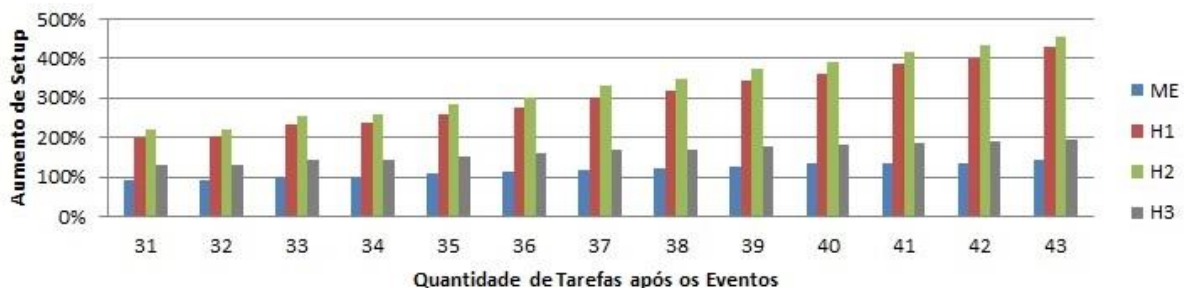
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 45 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 15 TAREFAS - CENÁRIO 2

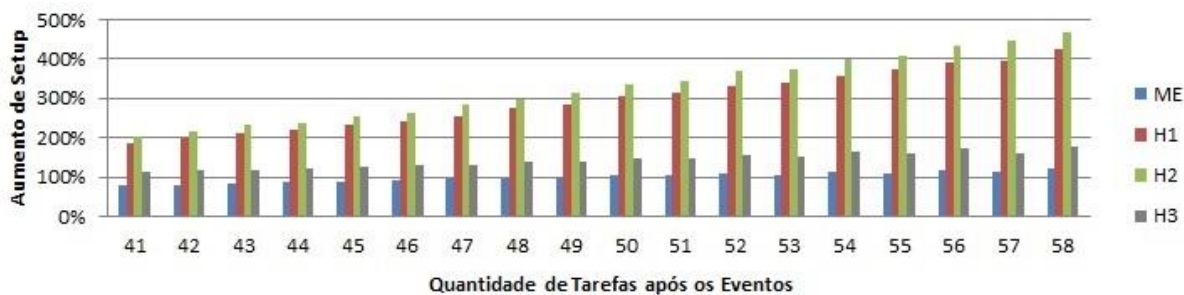
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 46 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 20 TAREFAS - CENÁRIO 2

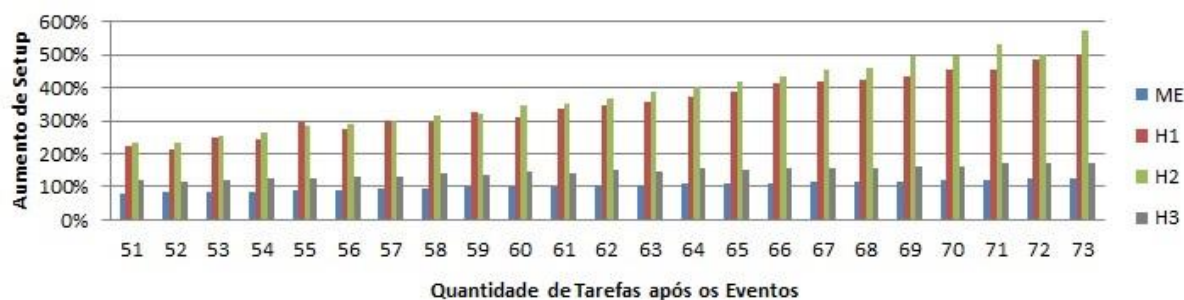
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 47 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 30 TAREFAS - CENÁRIO 2

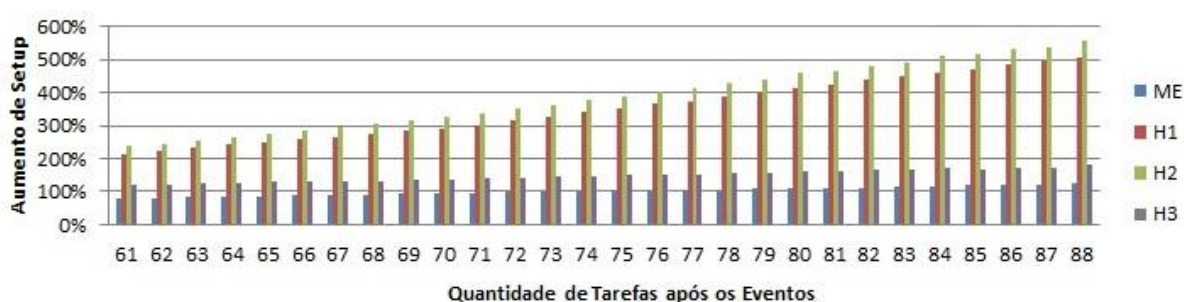
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 48 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 40 TAREFAS - CENÁRIO 2

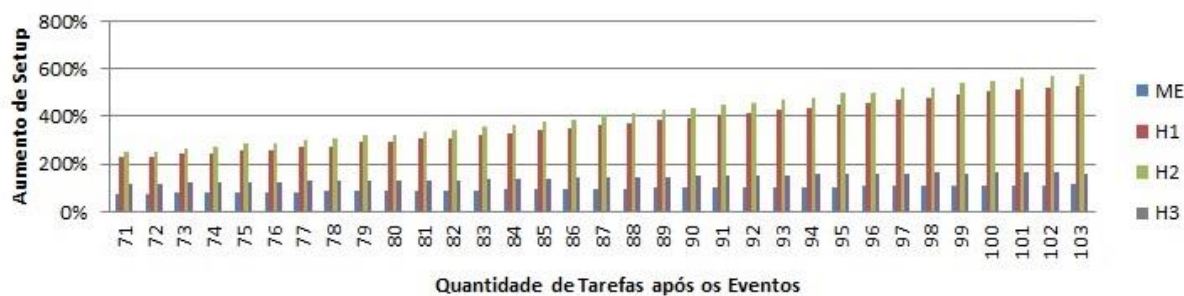
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 49 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 50 TAREFAS - CENÁRIO 2

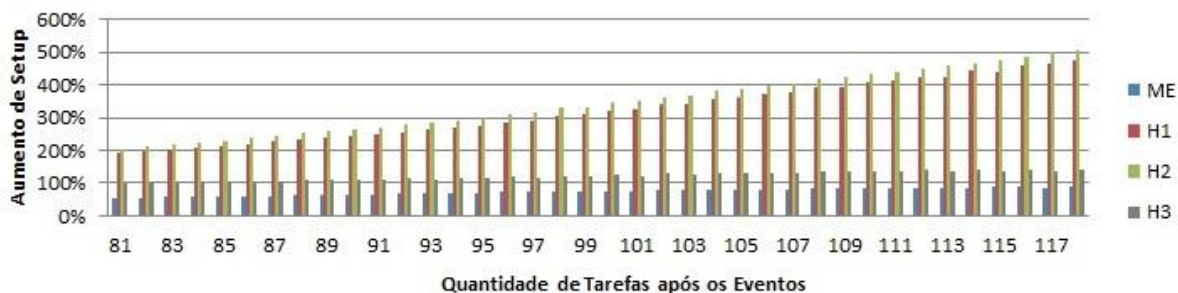
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 50 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 60 TAREFAS - CENÁRIO 2

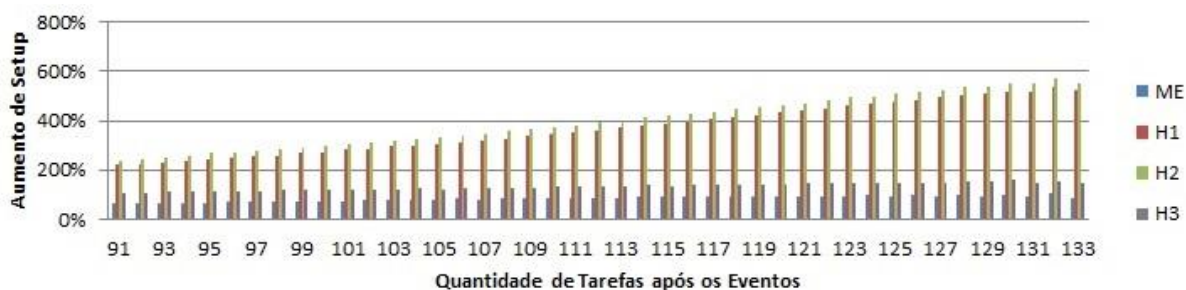
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 51 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 70 TAREFAS - CENÁRIO 2

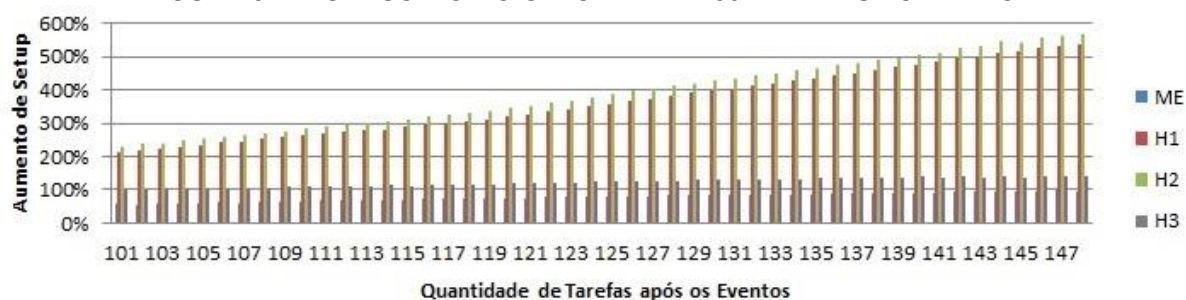
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 52 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 80 TAREFAS - CENÁRIO 2

FONTE: A autora (2016).

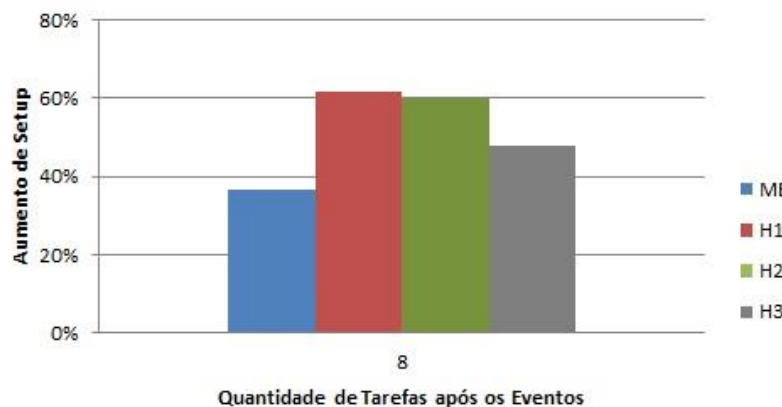
FIGURA 53 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 90 TAREFAS - CENÁRIO 2

FONTE: A autora (2016).

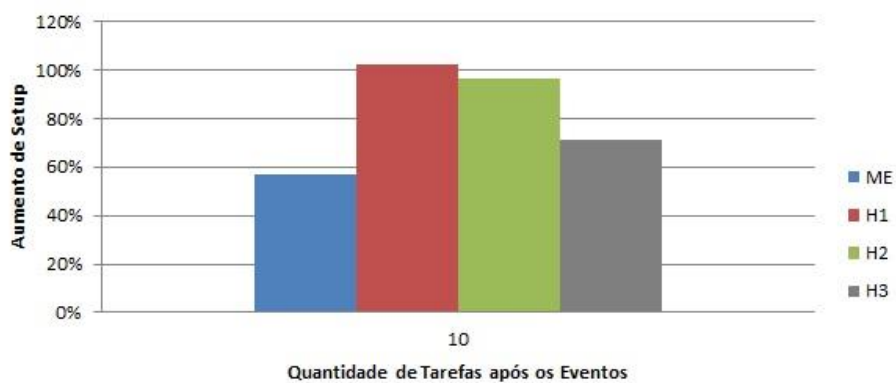
FIGURA 54 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 100 TAREFAS - CENÁRIO 2

FONTE: A autora (2016).

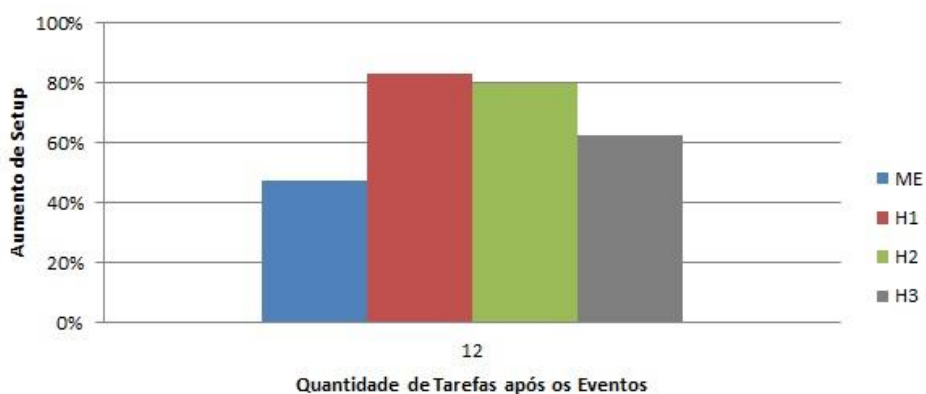
- Cenário 3: Chegadas e saídas em equilíbrio

FIGURA 55 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 8 TAREFAS - CENÁRIO 3

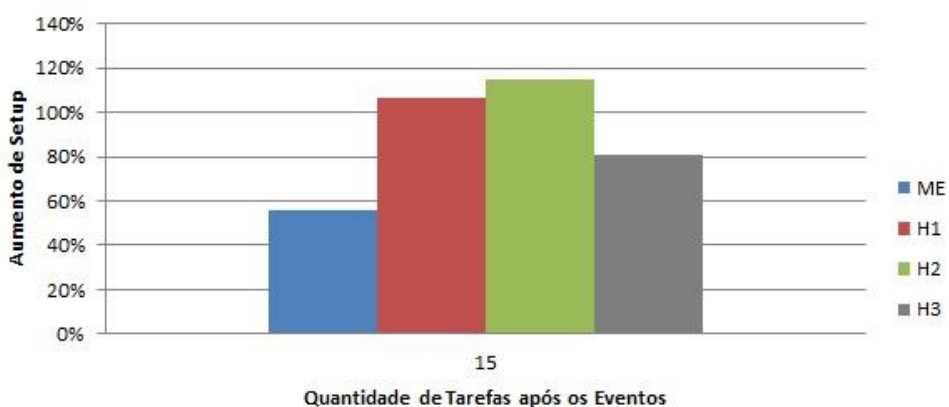
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 56 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 10 TAREFAS - CENÁRIO 3

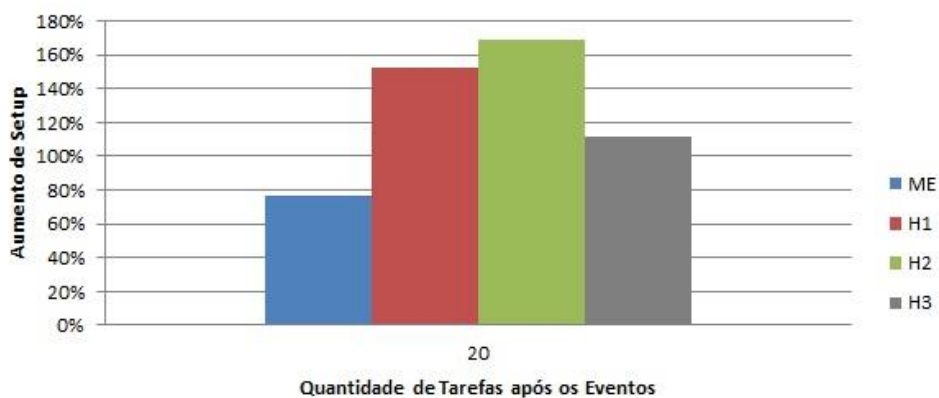
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 57 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 12 TAREFAS - CENÁRIO 3

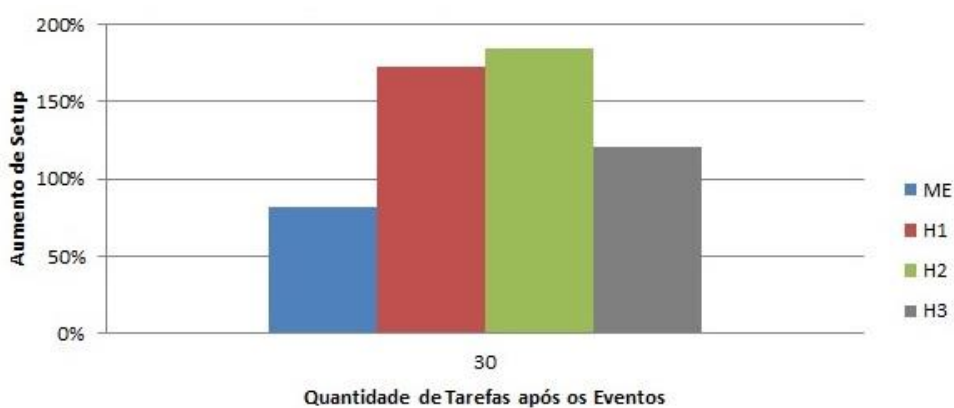
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 58 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 15 TAREFAS - CENÁRIO 3

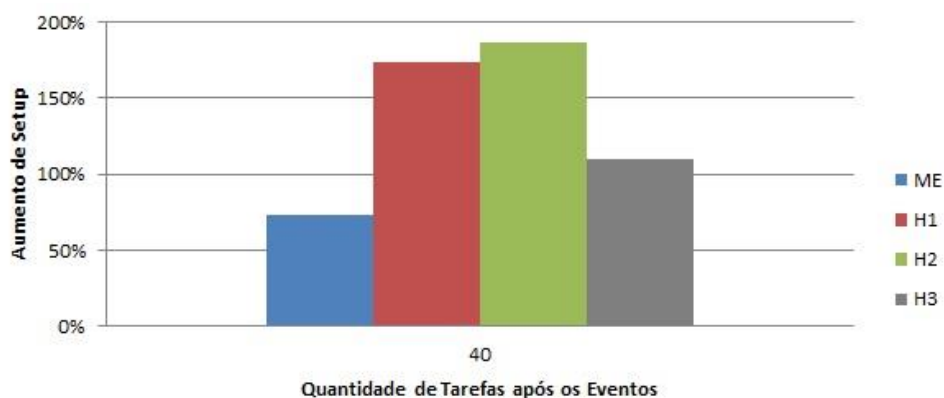
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 59 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 20 TAREFAS – CENÁRIO 3

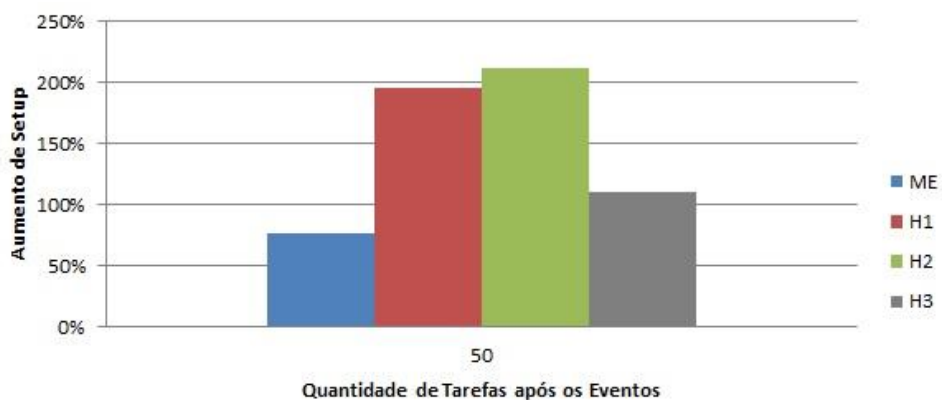
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 60 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 30 TAREFAS – CENÁRIO 3

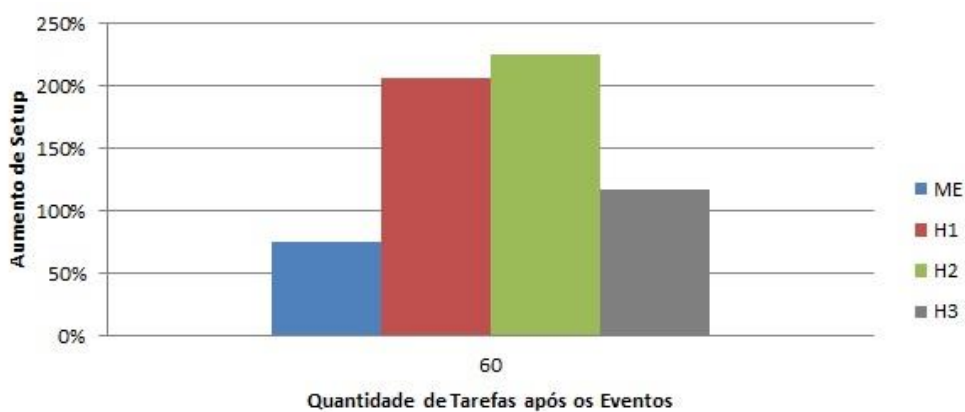
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 61 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 40 TAREFAS – CENÁRIO 3

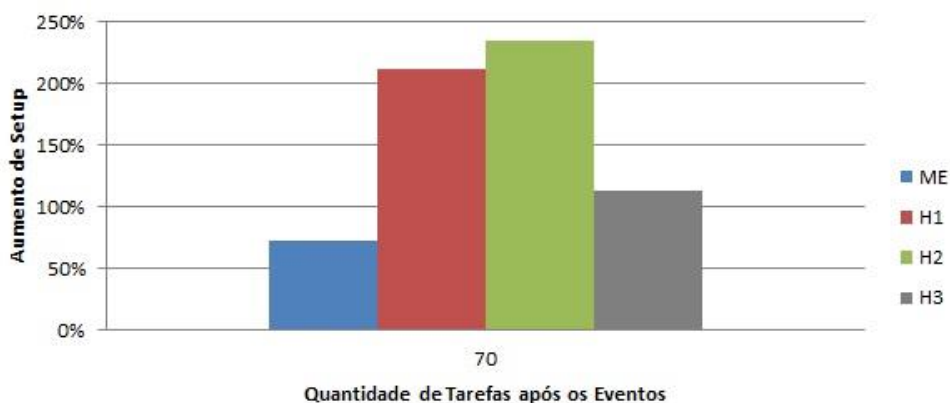
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 62 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 50 TAREFAS – CENÁRIO 3

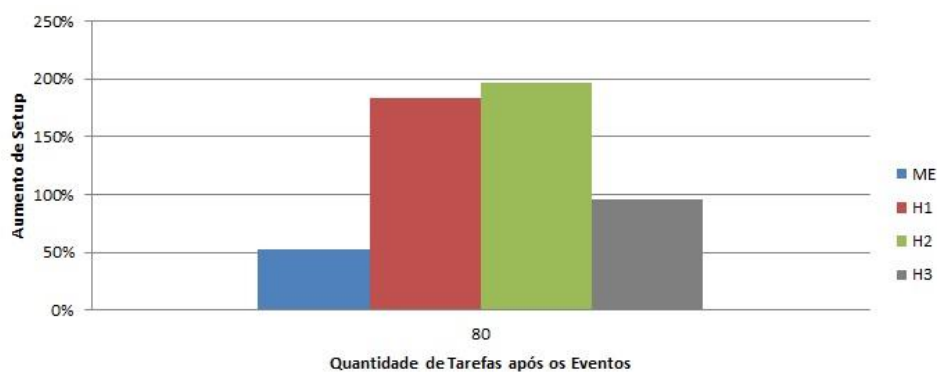
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 63 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 60 TAREFAS – CENÁRIO 3

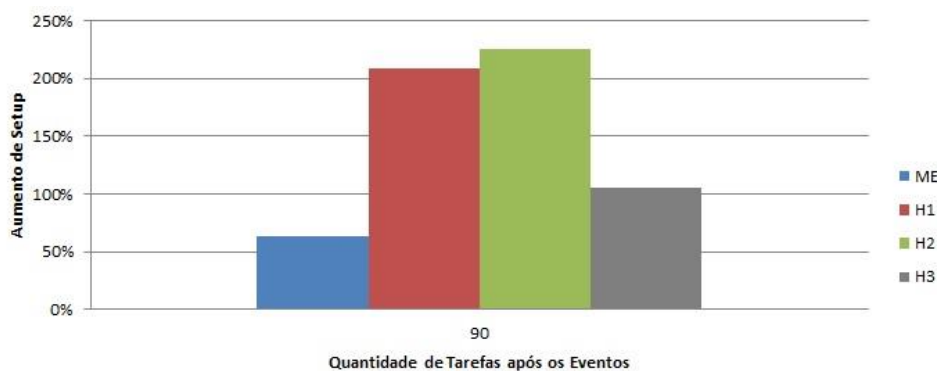
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 64 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 70 TAREFAS – CENÁRIO 3

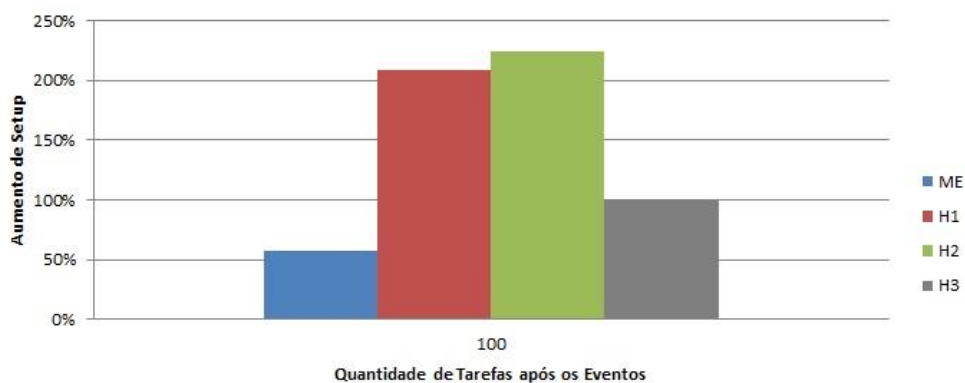
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 65 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 80 TAREFAS – CENÁRIO 3

FONTE: A autora (2016).

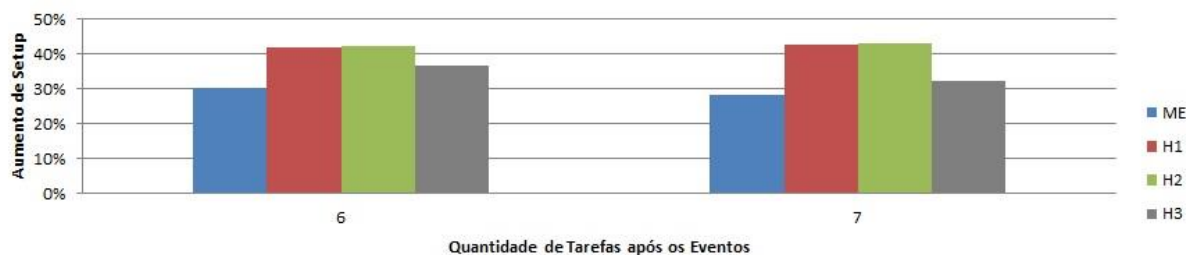
FIGURA 66 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 90 TAREFAS – CENÁRIO 3

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 67 – ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 100 TAREFAS – CENÁRIO 3

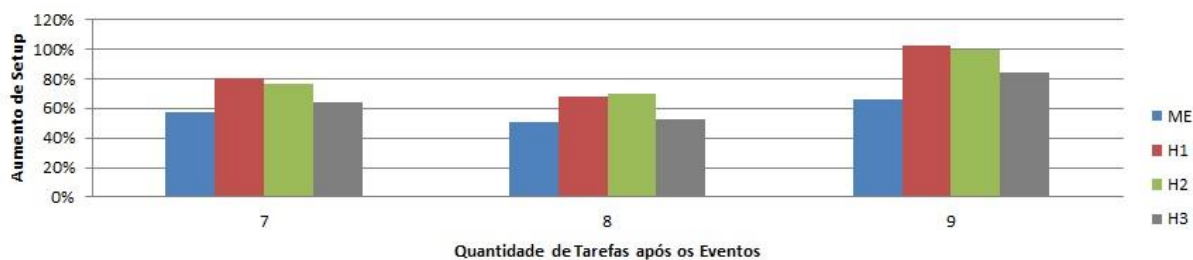
FONTE: A autora (2016).

- Cenário 4: Mais saídas do que chegadas de pedidos

FIGURA 68 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 8 TAREFAS - CENÁRIO 4

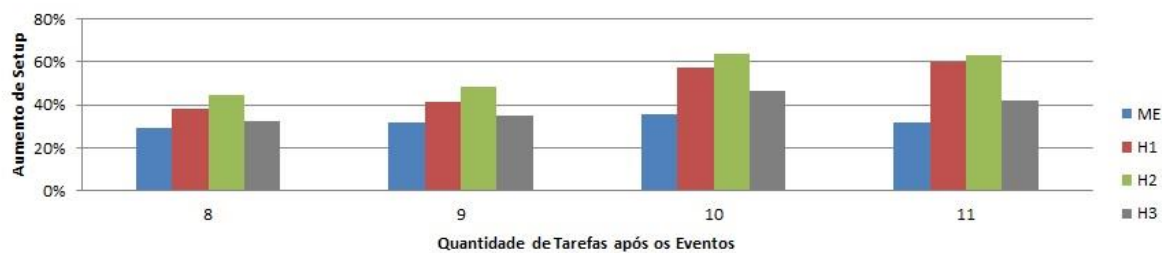
Quantidade de Tarefas após os Eventos

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 69 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 10 TAREFAS - CENÁRIO 4

Quantidade de Tarefas após os Eventos

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 70 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 12 TAREFAS - CENÁRIO 4

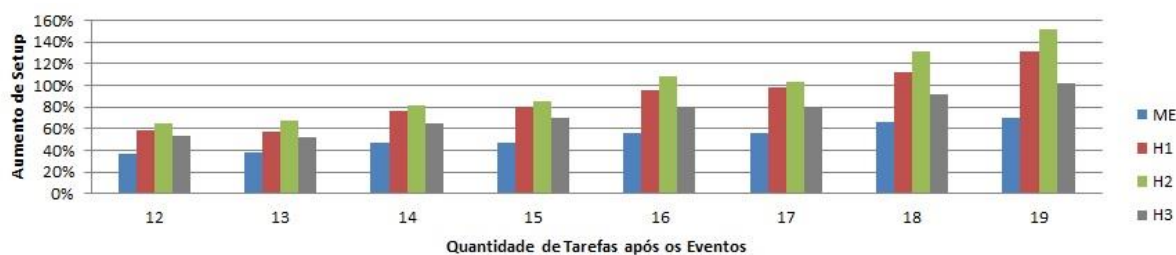
Quantidade de Tarefas após os Eventos

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 71 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 15 TAREFAS - CENÁRIO 4

Quantidade de Tarefas após os Eventos

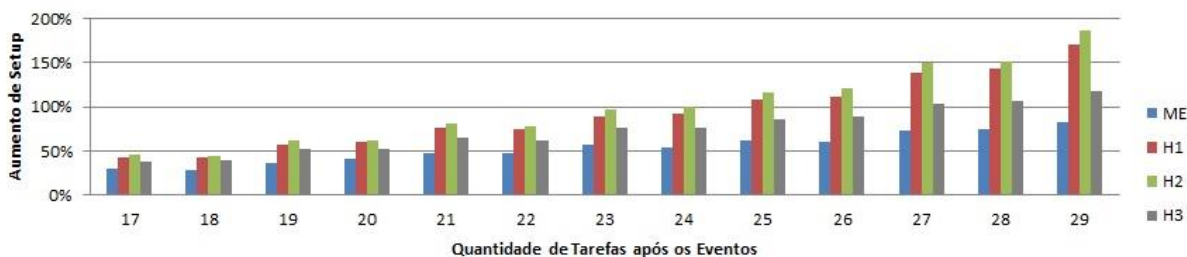
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 72 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 20 TAREFAS - CENÁRIO 4

Quantidade de Tarefas após os Eventos

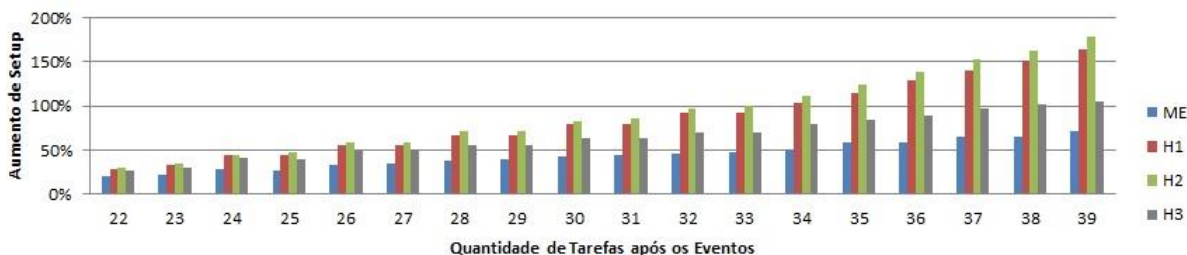
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 73 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 30 TAREFAS - CENÁRIO 4



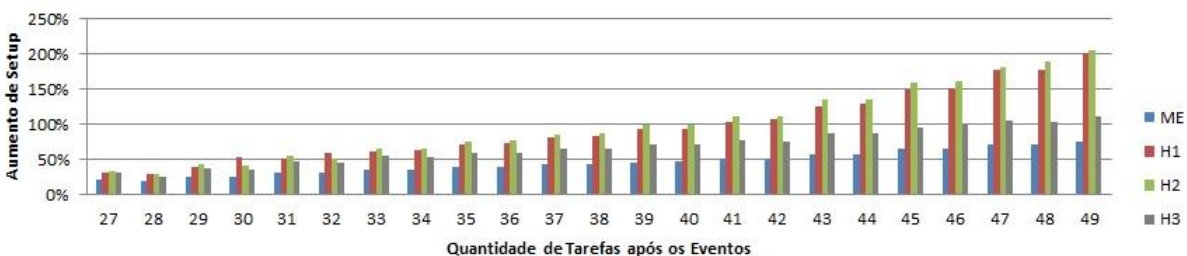
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 74 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 40 TAREFAS - CENÁRIO 4



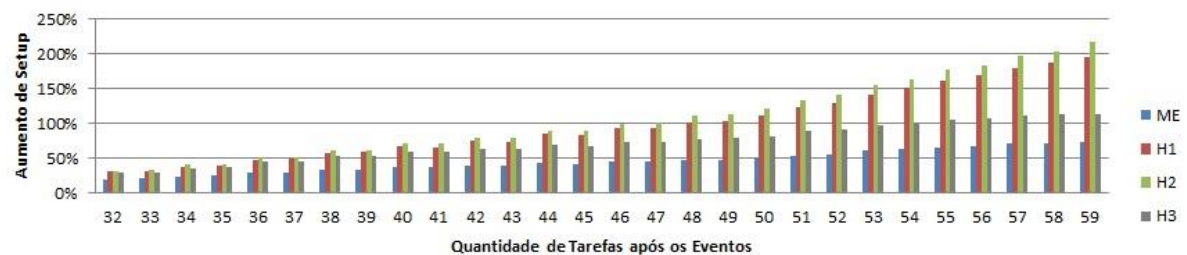
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 75 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 50 TAREFAS - CENÁRIO 4



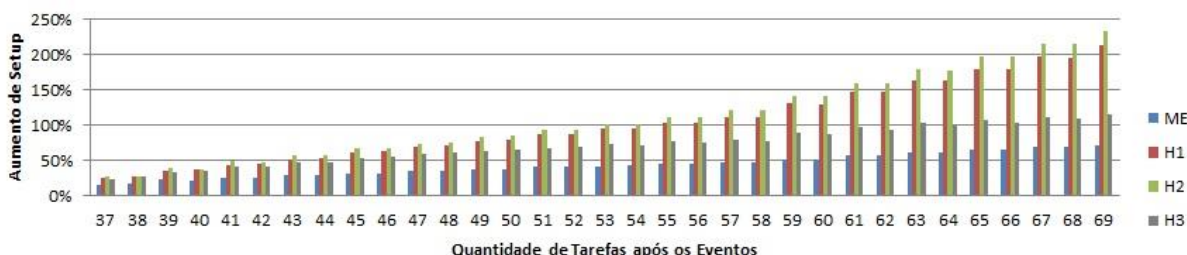
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 76 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 60 TAREFAS - CENÁRIO 4



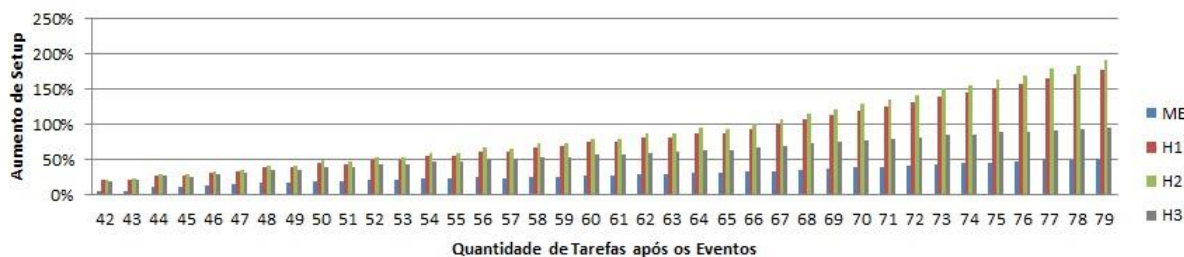
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 77 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 70 TAREFAS - CENÁRIO 4



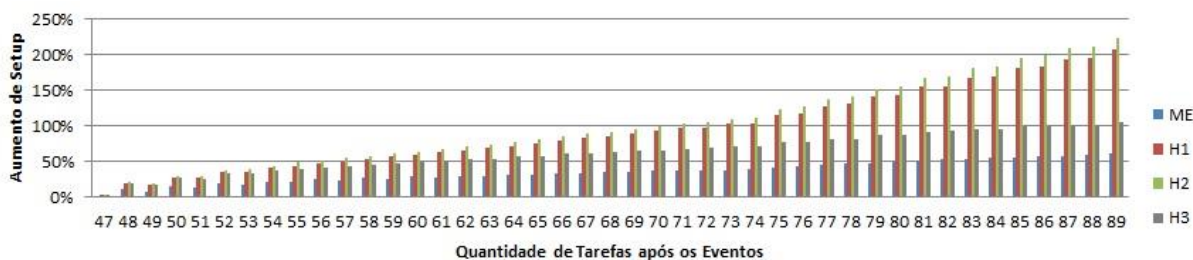
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 78 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 80 TAREFAS - CENÁRIO 4



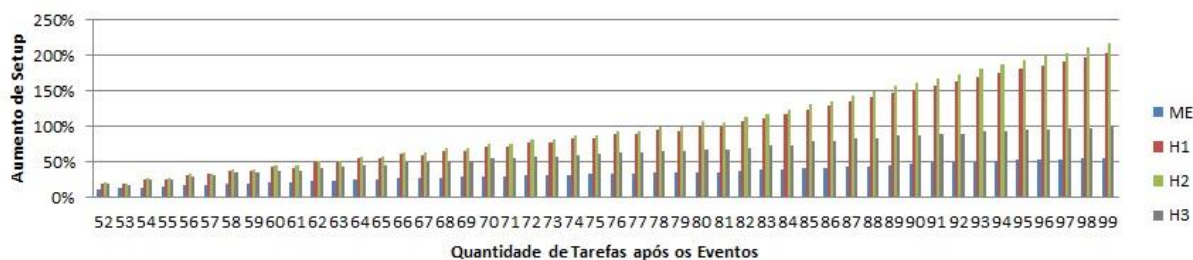
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 79 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 90 TAREFAS - CENÁRIO 4



FONTE: A autora (2016).

FIGURA 80 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 100 TAREFAS - CENÁRIO 4



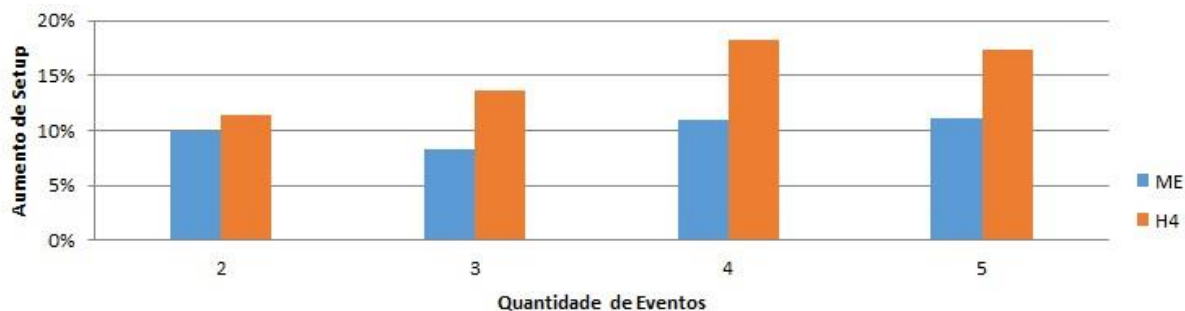
FONTE: A autora (2016).

- Cenário 5: Apenas saídas de pedidos

FIGURA 81 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 8 TAREFAS - CENÁRIO 5



FONTE: A autora (2016).

FIGURA 82 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 10 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 83 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 12 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 84 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 15 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 85 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 20 TAREFAS - CENÁRIO 5

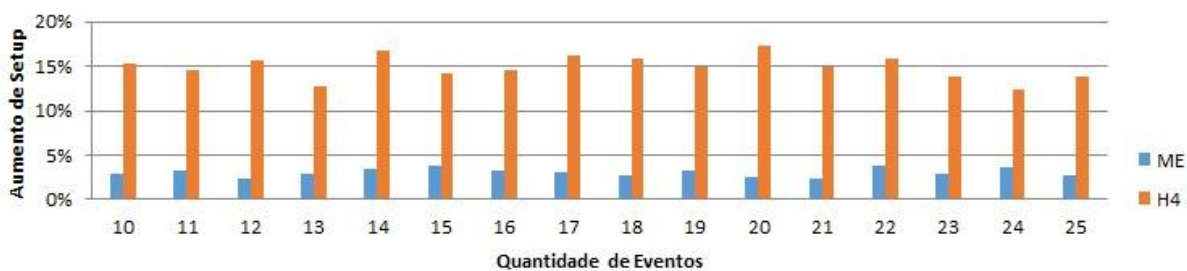
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 86 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 30 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 87 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 40 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 88 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 50 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 89 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 60 TAREFAS - CENÁRIO 5

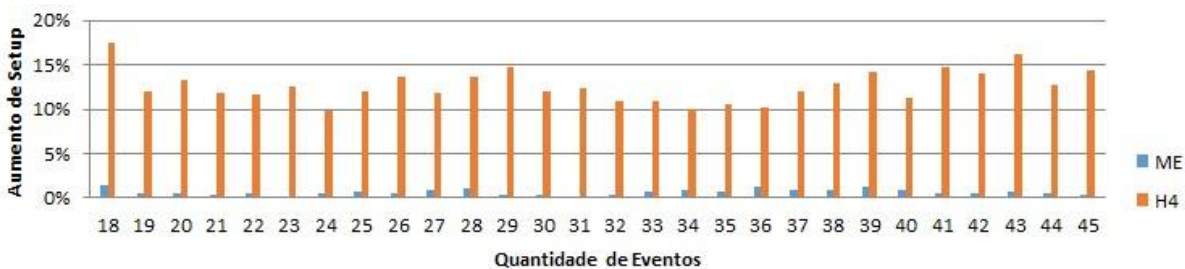
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 90 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 70 TAREFAS - CENÁRIO 5

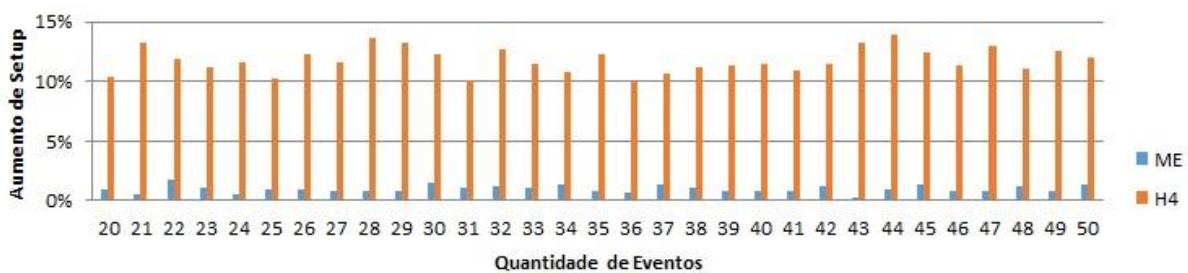
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 91 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 80 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 92 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 90 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

FIGURA 93 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* PARA 100 TAREFAS - CENÁRIO 5

FONTE: A autora (2016).

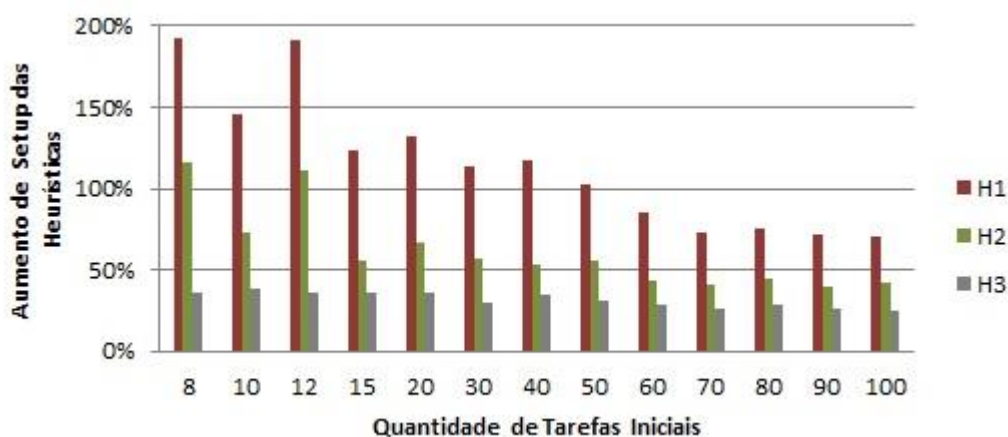
APÊNDICE 2 – GRÁFICOS DO ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM
RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS

Os testes realizados para a pesquisa foram efetuados em um intervalo de 20 a 50 por cento de novos eventos gerados. A cada intervalo de 5% de eventos criados, a diferença entre o *setup* final do conjunto de modelos exatos e das heurísticas geradas foi examinado.

Os gráficos expostos neste apêndice representam essa análise. Sendo assim, cada um dos gráficos analisa a porcentagem da comparação realizada entre *setups* supracitados, em cada cenário proposto no presente trabalho.

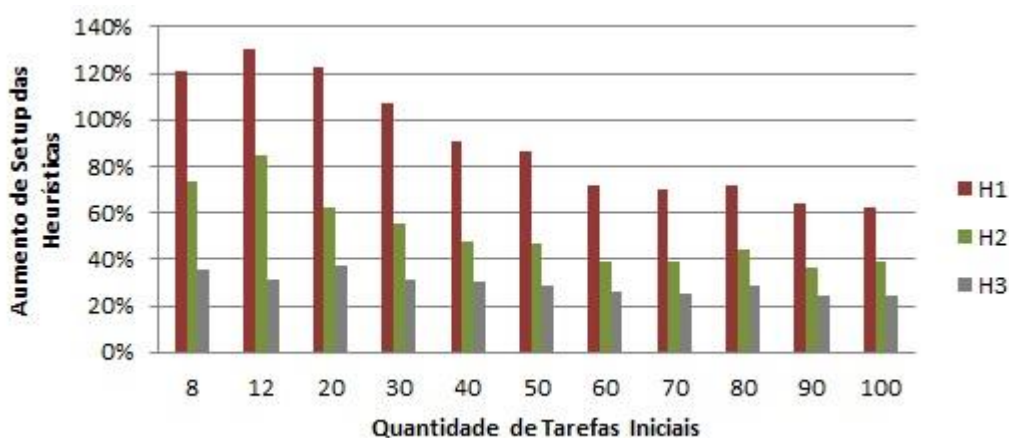
- Cenário 1: Apenas chegadas de Pedidos

FIGURA 94 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1



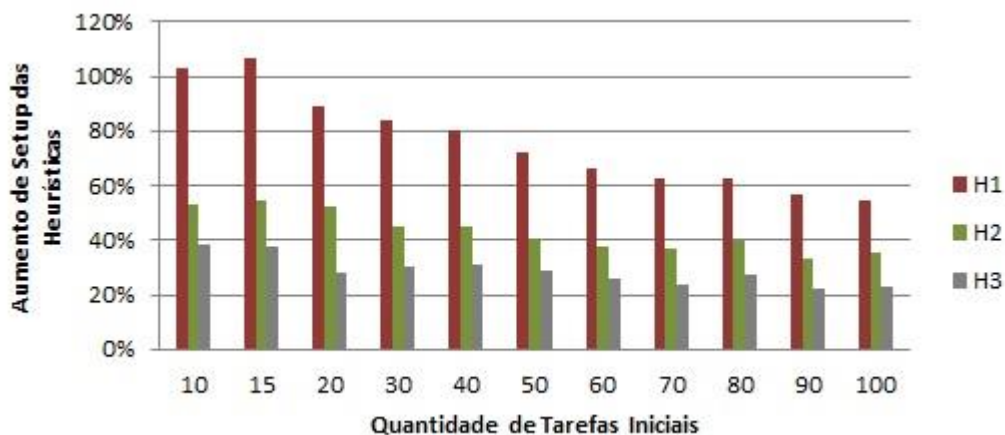
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 95 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 20% A 25% DE INSERÇÕES – CENÁRIO 1



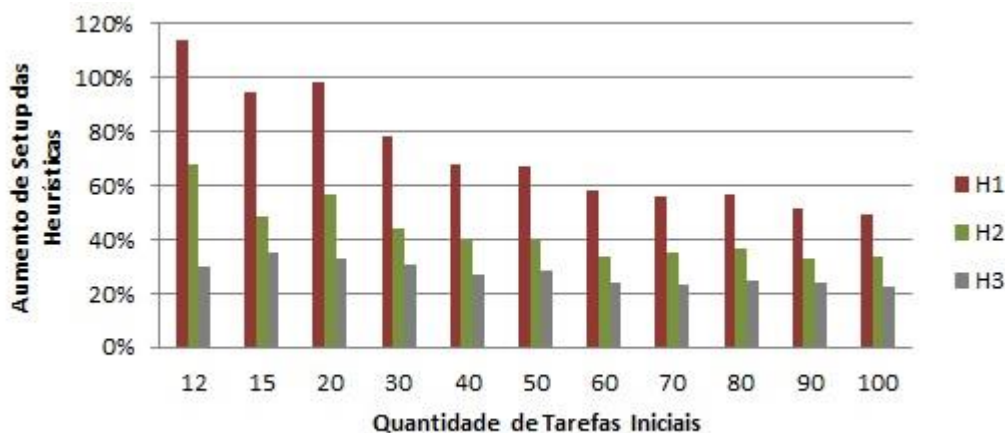
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 96 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 25% A 30% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1



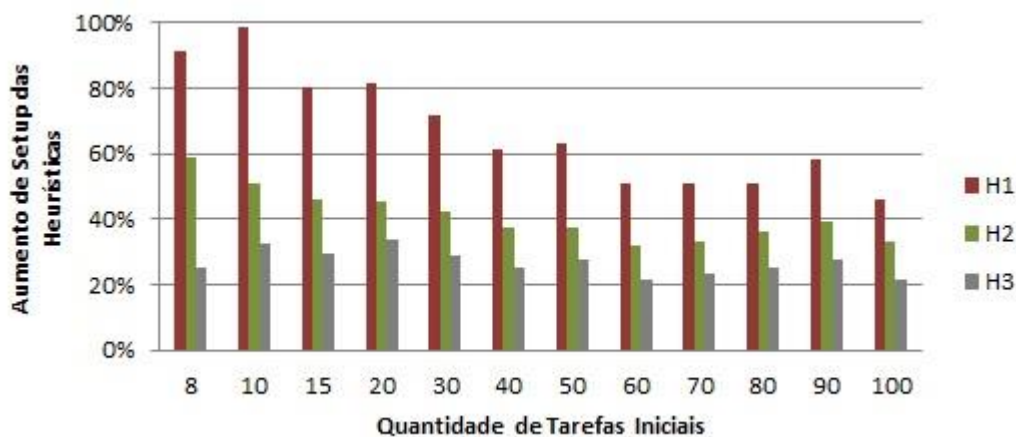
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 97 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 30% A 35% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1



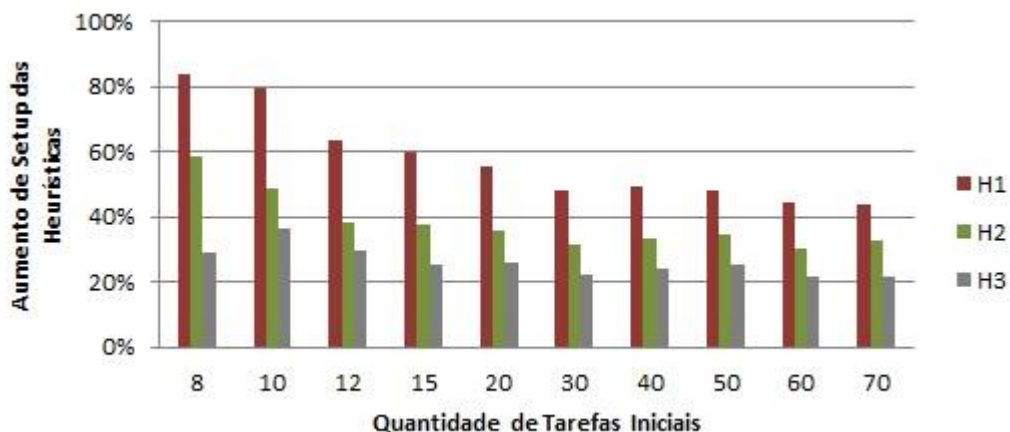
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 98 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 35% A 40% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1



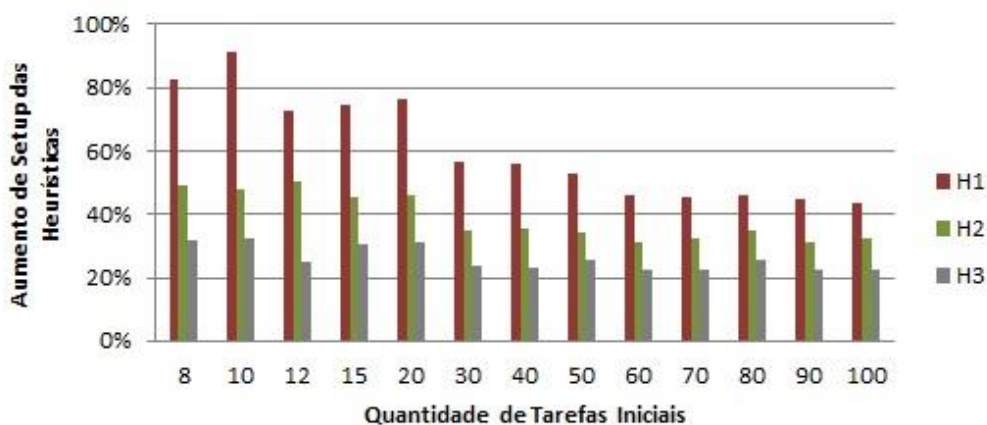
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 99 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 40% A 45% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1



FONTE: A autora (2016).

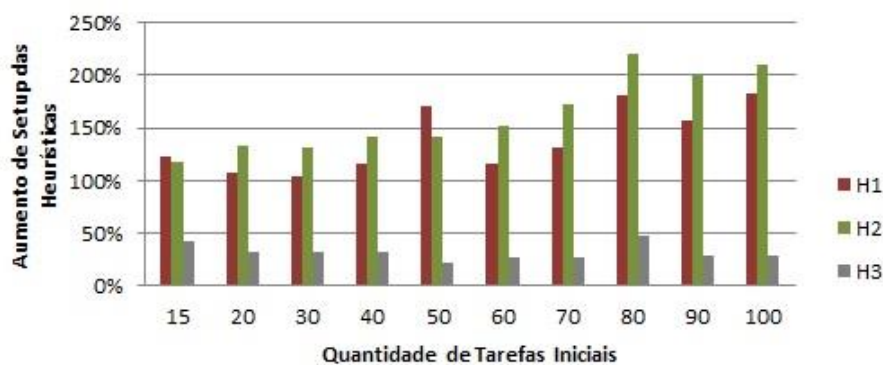
FIGURA 100 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 45% A 50% DE INSERÇÕES - CENÁRIO 1



FONTE: A autora (2016).

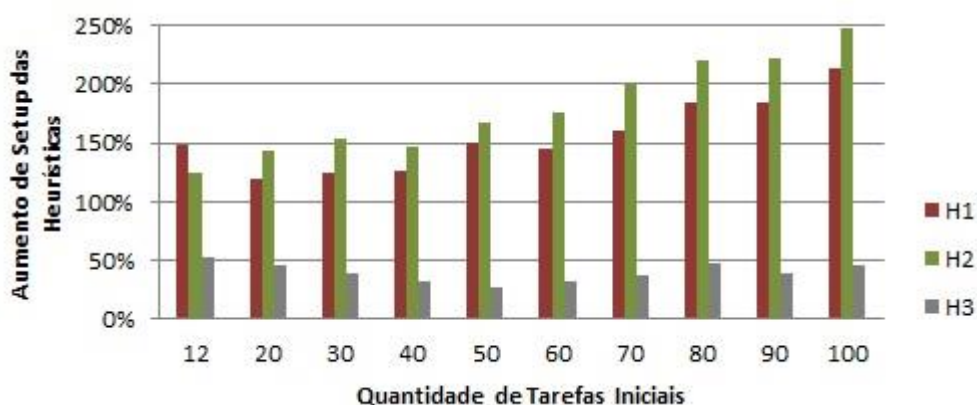
- Cenário 2: Mais chegadas do que saídas de pedidos

FIGURA 101 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2



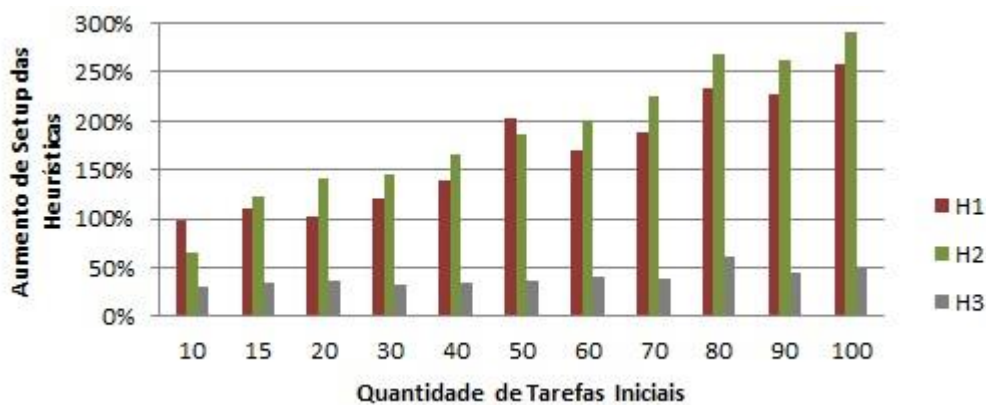
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 102 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 20% A 25% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2



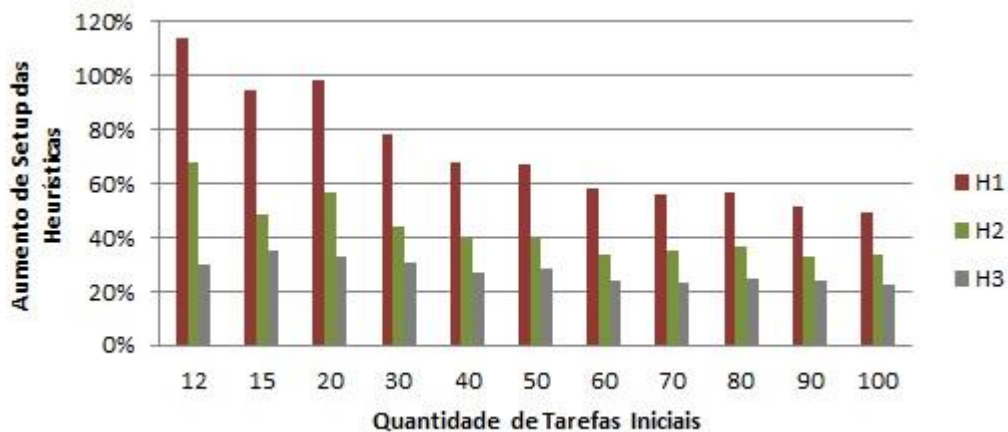
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 103 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 25% A 30% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2



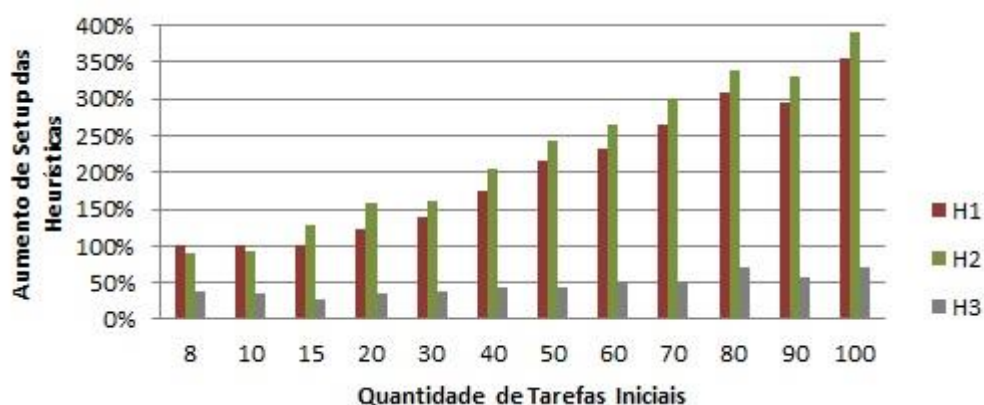
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 104 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 30% A 35% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2



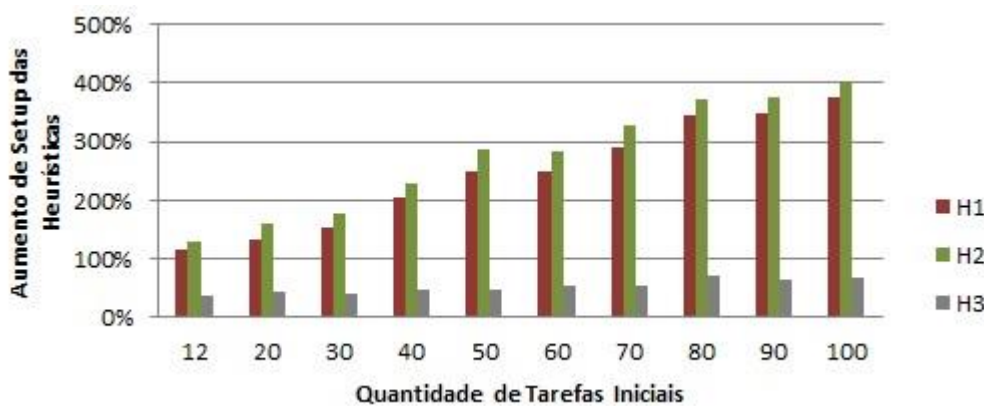
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 105 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 35% A 40% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2



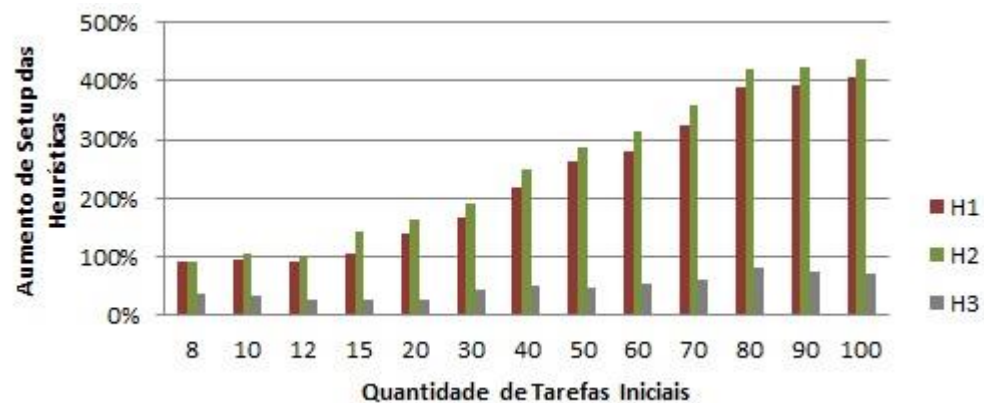
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 106 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 40% A 45% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2



FONTE: A autora (2016).

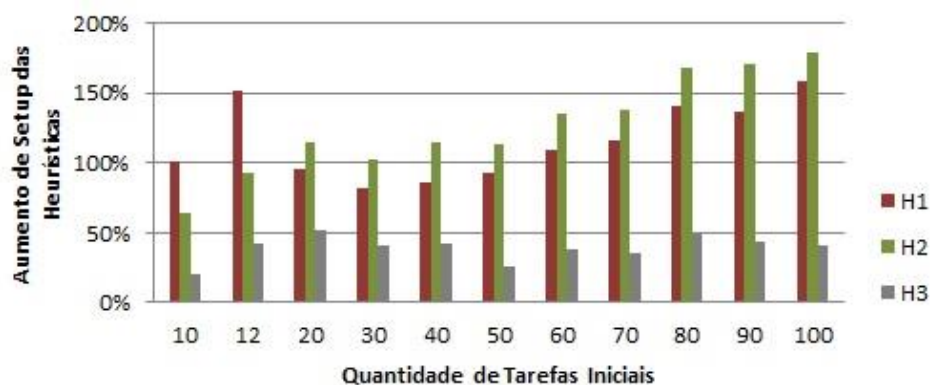
FIGURA 107 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 45% A 50% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 2



FONTE: A autora (2016).

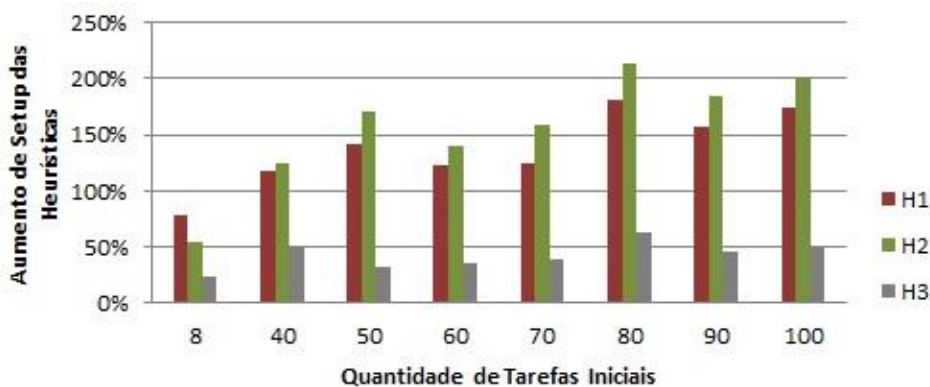
- Cenário 3: Chegadas e saídas em equilíbrio

FIGURA 108 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3



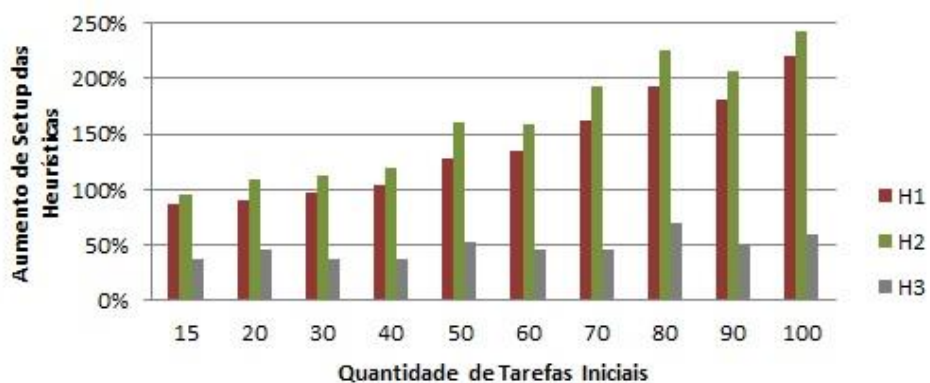
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 109 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 20% A 25% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3



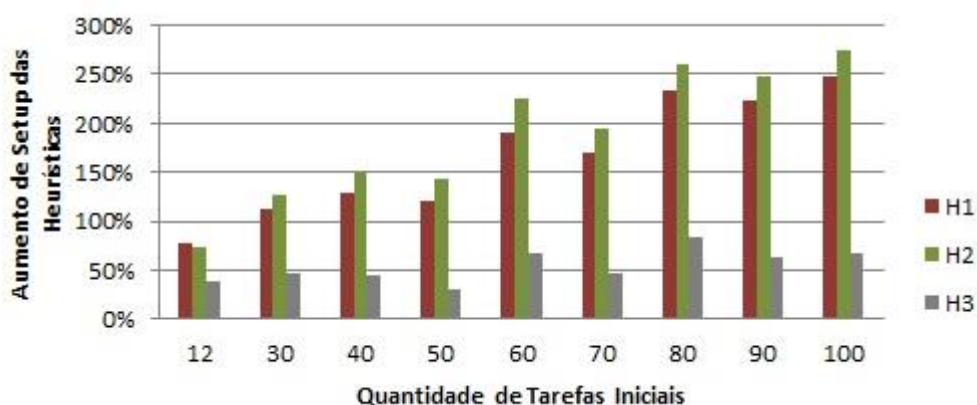
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 110 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 25% A 30% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3



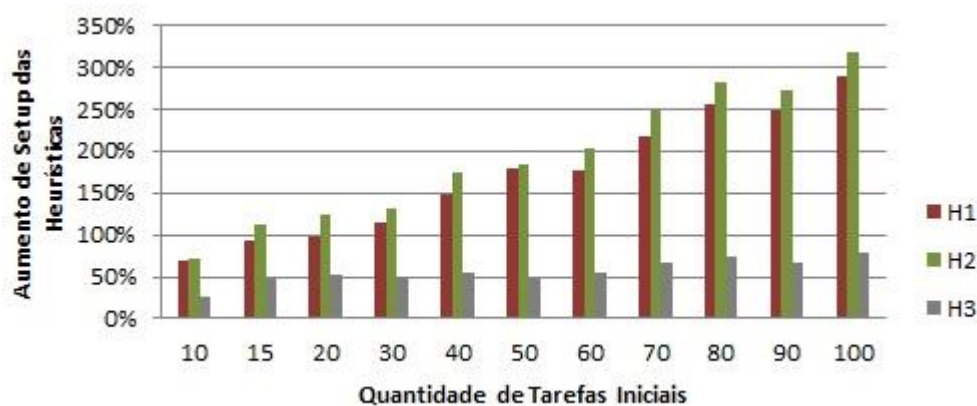
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 111 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 30% A 35% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3



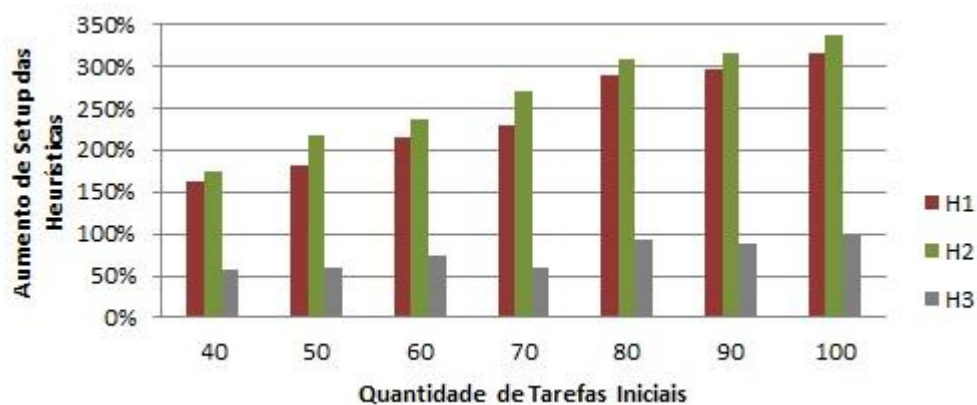
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 112 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 35% A 40% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3



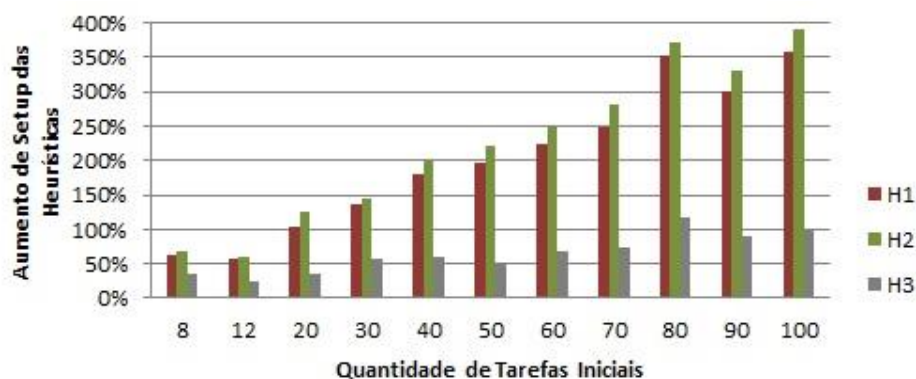
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 113 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 40% A 45% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3



FONTE: A autora (2016).

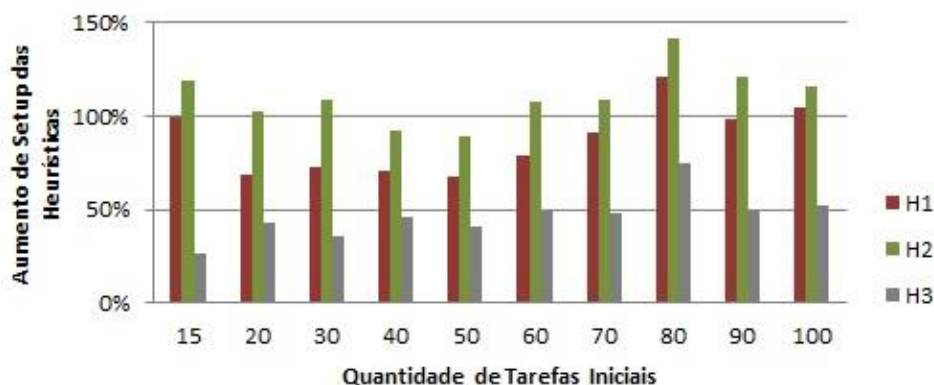
FIGURA 114 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 45% A 50% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 3



FONTE: A autora (2016).

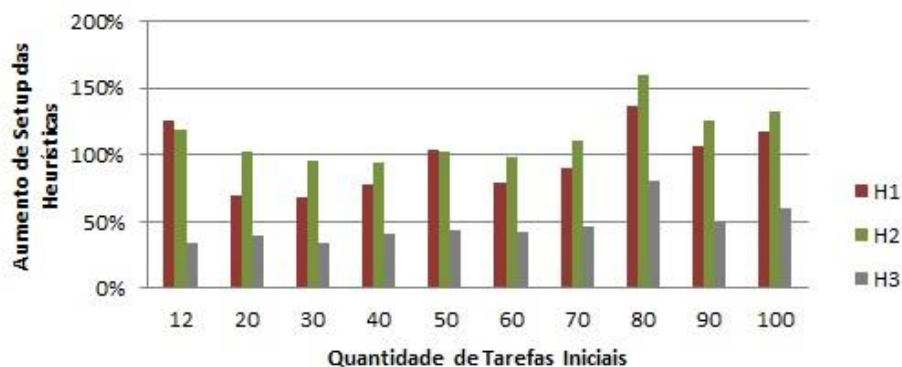
- Cenário 4: Mais saídas do que chegadas de pedidos

FIGURA 115 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4



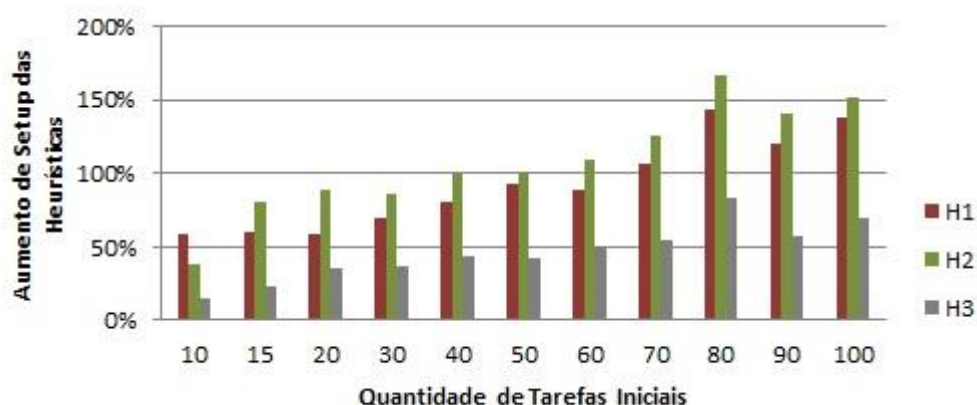
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 116 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 20% A 25% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4



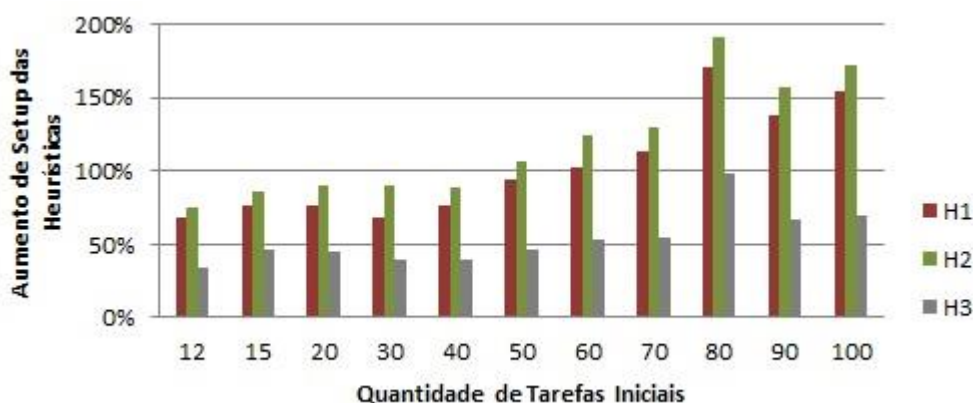
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 117 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 25% A 30% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4



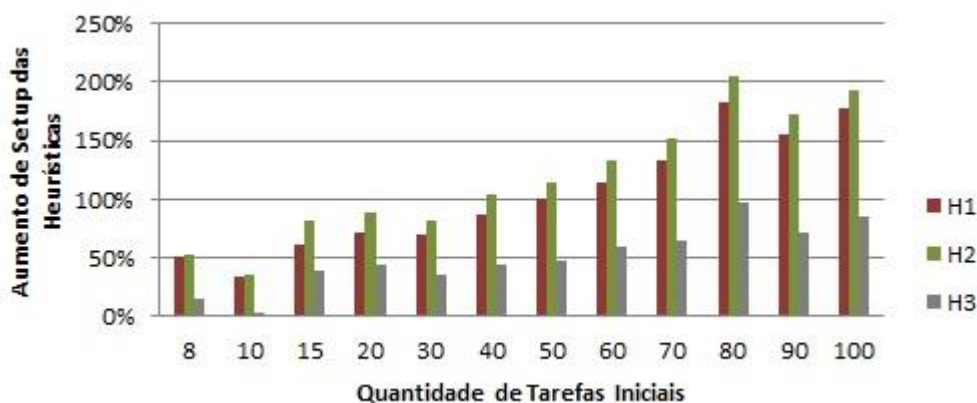
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 118 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 30% A 35% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4



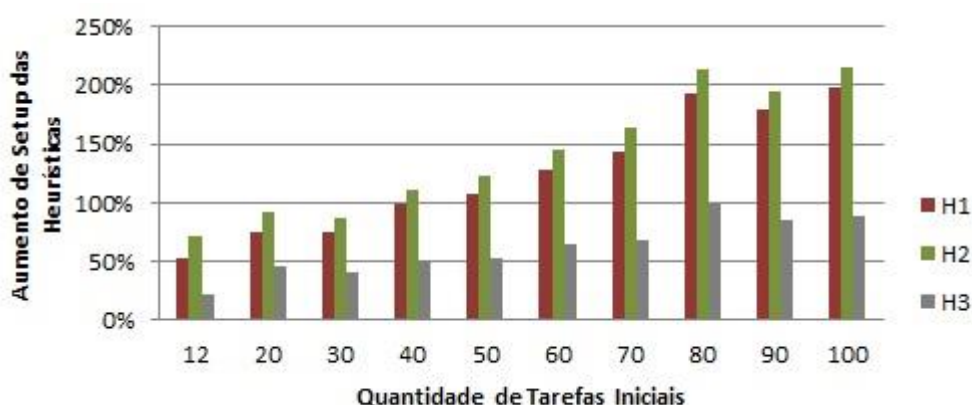
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 119 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 35% A 40% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4



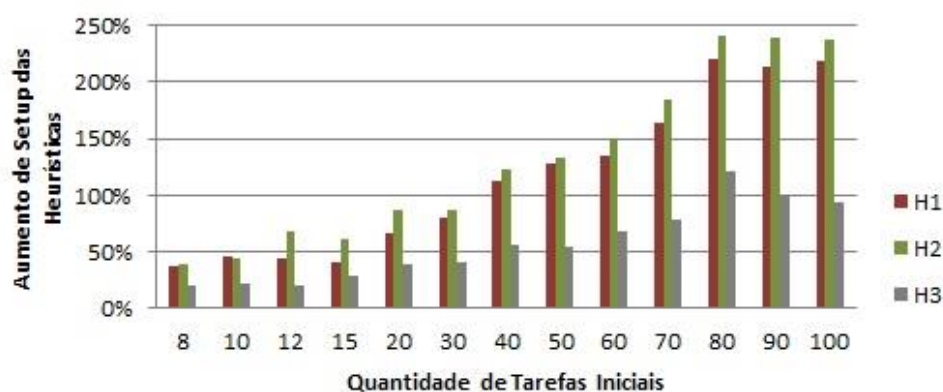
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 120 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 40% A 45% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4



FONTE: A autora (2016).

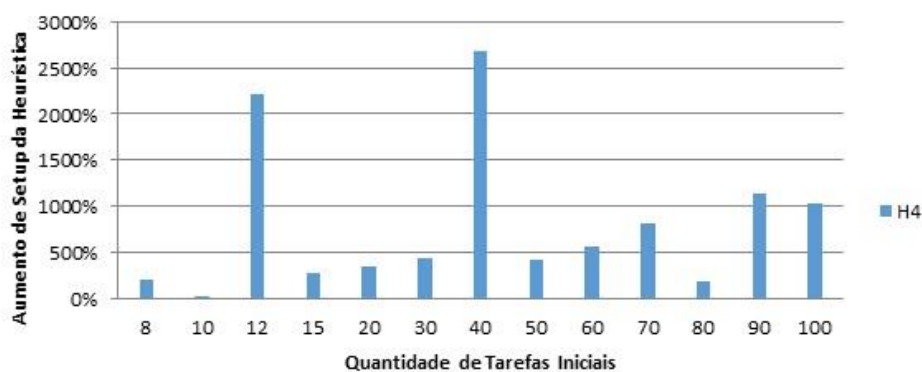
FIGURA 121 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM 45% A 50% DE GERAÇÃO DE EVENTOS - CENÁRIO 4



FONTE: A autora (2016).

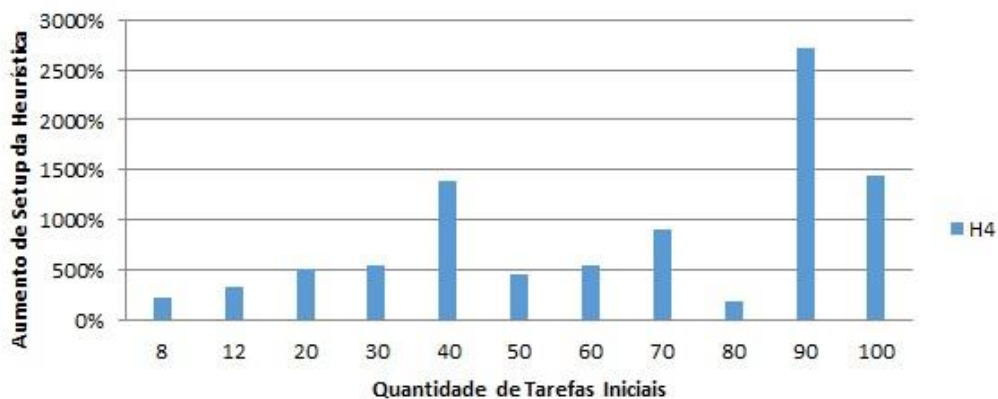
- Cenário 5: Apenas saídas de pedidos

FIGURA 122 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, COM ATÉ 20% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5



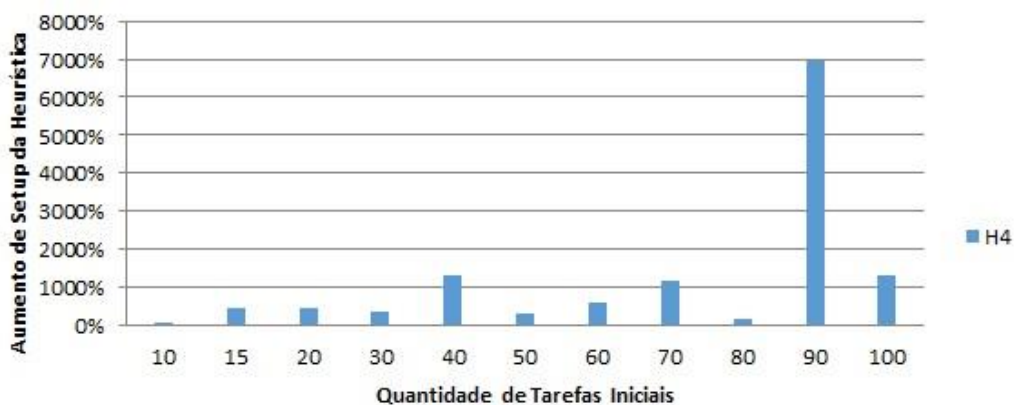
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 123 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 20% A 25% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5



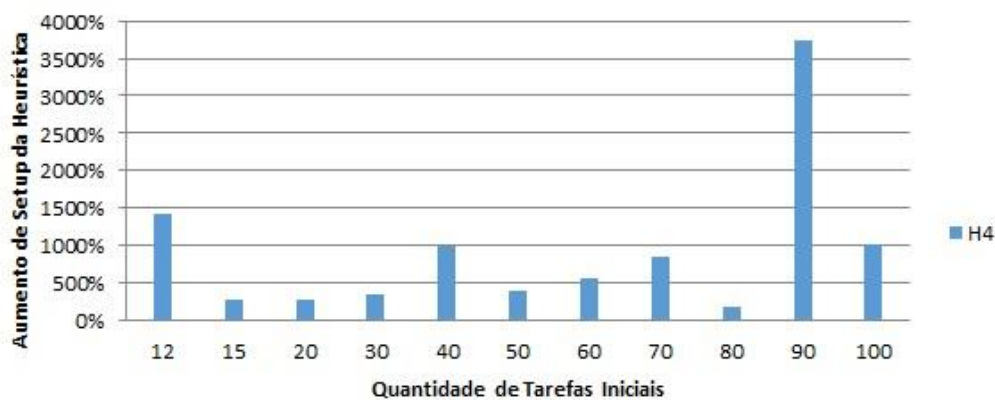
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 124 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 25% A 30% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5



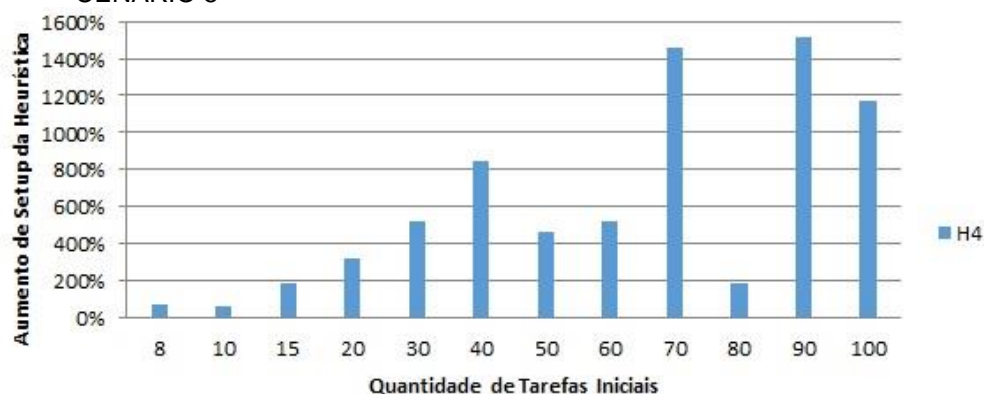
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 125 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 30% A 35% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5



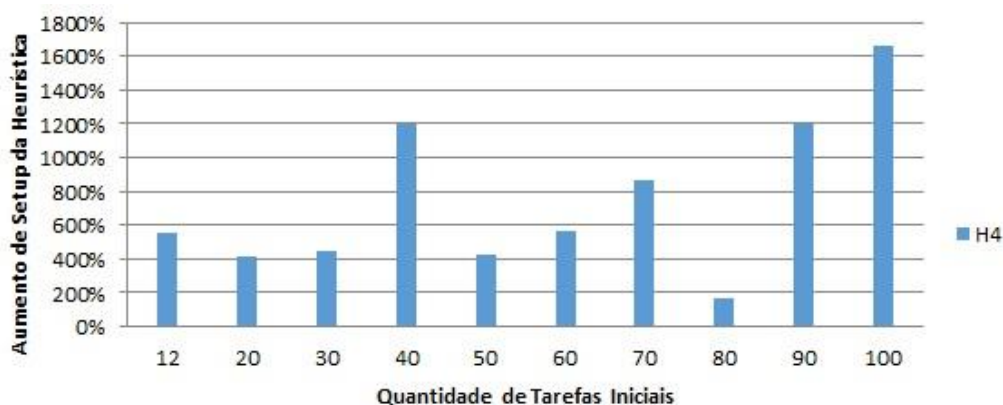
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 126 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 35% A 40% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5



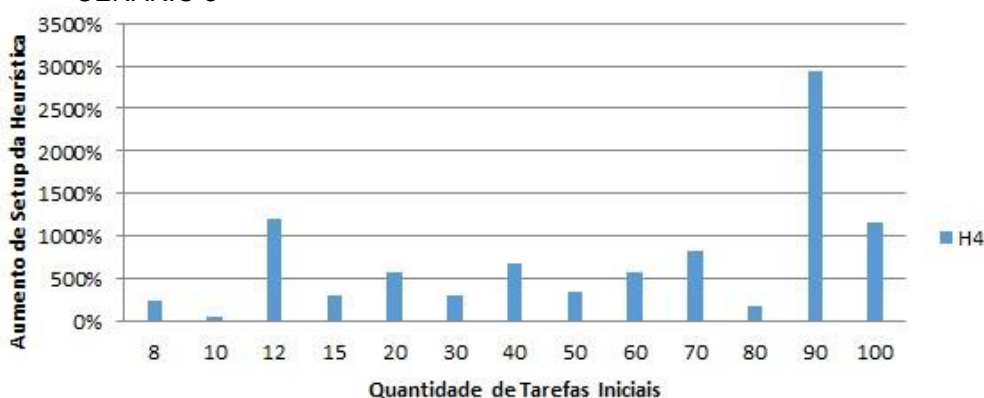
FONTE: A autora (2016).

FIGURA 127 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 40% A 45% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5



FONTE: A autora (2016).

FIGURA 128 - ACRÉSCIMO DO *SETUP* DAS HEURÍSTICAS EM RELAÇÃO AO *SETUP* DO CONJUNTO DE MODELOS EXATOS, DE 45% A 50% DE DESISTÊNCIAS - CENÁRIO 5



FONTE: A autora (2016).