UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

VINICIUS AMORIM SOBREIRO

PROPOSTA DE UMA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA BASEADA NA TEORIA DAS
RESTRIÇÕES PARA DEFINIÇÃO DE MIX DE PRODUÇÃO

São Carlos

2012

VINICIUS AMORIM SOBREIRO

PROPOSTA DE UMA HEURÍSTICA CONSTRUTIVA BASEADA NA TEORIA DAS
RESTRICÇÕES PARA DEFINIÇÃO DE MIX DE PRODUÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Doutorado do
Departamento de Engenharia de Produção da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Economia, Organizações
e Gestão do Conhecimento.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Seido Nagano.

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

	Sobreiro, Vinicius Amorim
S677p	Proposta de uma heurística construtiva baseada na teoria das restrições para definição de mix de produção / Vinicius Amorim Sobreiro ; orientador Marcelo Seido Nagano .-- São Carlos, 2012.
	Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.
	1. Heurística. 2. TOC. 3. Mix de produção. I. Título.

Dedicatória

À memória de José Sobreiro, meu pai, que dentro de suas condições sempre me incentivou e apoiou a estudar. Tamanho era o incentivo que, em seus últimos dias, no hospital, enquanto eu era seu acompanhante, ele foi capaz de arrumar confusão com o pessoal do hospital para que a luz ficasse acesa e eu pudesse estudar de madrugada.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **VINICIUS AMORIM SOBREIRO**

Título da tese: "Proposta de uma heurística construtiva baseada na teoria das restrições para definição de mix de produção".

Data da defesa: 28/02/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Marcelo Seido Nagano (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Fernando Bernardi de Souza**
(Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho/UNESP-campus de Bauru)

APROVADO

Prof. Dr. **Elton Eustáquio Casagrande**
(Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho/UNESP-campus de Araraquara)

Aprovado

Prof. Dr. **Walther Azzolini Júnior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Titular **Márcio Mattos Borges de Oliveira**
(Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto/FEARP-USP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Prof. Titular **Henrique Rozenfeld**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar em todas as minhas realizações. A toda minha família que me auxiliou e proporcionou apoio, de maneira magistral, nas horas que precisei. A toda família de minha esposa por todo incentivo, visto os diferentes sentidos que essa palavra possa ter.

Ao professor Dr. Marcelo Seido Nagano, meu orientador, pessoa de notório saber, que foi capaz de visualizar um caminho ainda não percorrido e me impulsionou a dar o primeiro passo nessa nova jornada. A objetividade de seu trabalho aliada a sua grande competência acadêmica sempre será para mim um norte.

Apesar de uma tese ser um trabalho monográfico escrito por uma pessoa, à mesma não é uma iniciativa solitária de seu autor, mas sim o resultado de um projeto no qual diversas pessoas ajudaram a construir com suas críticas, dúvidas, incentivos, e sugestões. É longa a lista das pessoas a quem tenho que agradecer, entretanto gostaria de registrar meus mais sinceros agradecimentos a:

Profª. Dra. Ana Beatriz Lopes de Sousa Jabbour, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho;

Me. Carolina Maria Fioramonti Calixto;

Prof. Assoc. Charbel José Chiappetta Jabbour, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho;

Me. Enzo Barberio Mariano;

Me. Andre Rossi;

Prof. Dr. Fábio José Ceron Branco, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza;

Prof. Dr. Fernando César Almada Santos, Universidade de São Paulo; e

Prof. Assoc. José Francisco Ferreira Ribeiro, Universidade de São Paulo.

À “EESC”, pela oportunidade da realização do curso de doutorado. Ao departamento de Engenharia de Produção e, conseqüentemente, a todos os funcionários do mesmo que contribuíram de maneira direta ou indireta na realização deste trabalho. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo incentivo financeiro.

Finalmente, mas não menos importante, gostaria de agradecer a Fernanda Pilati Sobreiro, minha esposa e eterna namorada, pelo permanente carinho, dedicação, e incentivo, apesar das

inúmeras horas de convivência familiar sacrificadas. Amor, eu sei que as minhas palavras de agradecimento jamais farão justiça aos seus esforços e sacrifícios, entretanto sei também que só aqueles que amam de verdade são capazes de tais privações.

Epígrafe

“O todo da ciência nada mais é do que o refinamento do pensamento de todos os dias”.

Albert Einstein

Resumo

SOBREIRO, V. A. Proposta de uma heurística construtiva baseada na teoria das restrições para definição de mix de produção. 2012. 170f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

A definição do mix de produção proporciona a alocação dos recursos produtivos no processo de manufatura, visando a otimização da sua utilização e do desempenho do sistema produtivo o que, por sua vez, em um nível gerencial, norteia a performance da organização. Entretanto, apesar de sua importância, a definição do mix de produção é um problema do tipo NP-Completo, ou seja, de difícil solução. Assim, com o auxílio da Teoria das Restrições - TOC, muitas heurísticas construtivas têm sido apresentadas para fazer frente a esse problema. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é propor uma nova heurística, denominada TOC-SN, baseado na TOC e no problema da mochila, que proporcione melhores soluções quando comparada com as principais heurísticas apresentadas na literatura, a TOC-h de Fredendall e Lea e a TOC-AK de Aryanezhad e Komijan. Para realização dessa comparação foram realizadas experimentações computacionais visando identificar o mix de produção que possibilitasse o maior ganho possível, em situações nas quais não há recursos disponíveis para produção de todos os produtos. Como resultado, observou-se que a TOC-SN obteve uma solução mais satisfatória quando comparada à aplicação das outras heurísticas e à solução ótima o que, em conclusão, evidencia a sua importância na definição de mix de produção.

Palavras-chave: Heurística; Teoria das Restrições; Mix de produção.

Abstract

SOBREIRO, V. A. The proposal of a constructive heuristics based on Theory of Constraints for product-mix decision. 2012. 170f. Thesis (Doctoral) - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, 2012.

The product-mix decision make possible to distribute the resources in the manufacture process, with the objective of optimizing the use of the resources and the performance of the productive system. This problem is well-known for being NP-Complete and therefore, most contributions to the topic focus on developing heuristics able to obtain good solutions for the problem in a short CPU time. Then, the objective in this thesis is to propose a new constructive heuristic or the TOC-SN based on the Theory of Constraints – TOC and on the Knapsack Problem that indicates better solutions than the TOC-h heuristic proposed by Fredendall and Lea and the TOC-AK heuristic proposed by Aryanezhad and Komijan. Experimentation computational was accomplished with the objective of testing the heuristics in the definition of product mix that made possible the best throughput in situations with scarcity of productive resources. The computational results indicate that the proposed heuristic obtains better results than the existing heuristic.

Keywords: Heuristics; Theory of Constraints; Product-Mix.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Mapa de citações referente à coleção de Goldratt (1988).....	44
Figura 2 – Mapa de citações referente à coleção de Luebbe & Finch (1992).....	46
Figura 3 – Restrições e não restrições.	56
Figura 4 – Exemplo de restrições e não restrições em manufatura.	57
Figura 5 – Estágios evolutivos da TOC.....	60
Figura 6 – Algoritmo <i>Greedy</i>	76
Figura 7 – Algoritmo <i>B-Greedy</i>	80
Figura 10 – Esquema de pesquisa adotado.....	85
Figura 11 – Pseudocódigo do algoritmo <i>B-Greedy-M</i>	98
Figura 12 – <i>Passo 2.b.ii</i>	102
Figura 13 – Suplemento desenvolvido.	127
Figura 14 – Aplicativo para definição do mix de produção.	127
Figura 15 – Aplicativo <i>Solver</i> [®]	129
Figura 16 – Resultados obtidos pelas heurísticas para problemas de pequeno e médio porte em termos de DRPM.	136
Figura 17 – Tempo total de processamento utilizado pelas heurísticas em problemas de pequeno e médio porte agrupados pelo número de gargalos.....	137
Figura 18 – Resultados obtidos pela TOC-SN em comparação à P. L. I. para problemas de pequeno e médio porte em termos de DRPM agrupados pelo número de gargalos.....	141
Figura 19 – Tempo total de processamento utilizado pela TOC-SN e P. L. I. em problemas de pequeno e médio porte agrupados pelo número de gargalos.....	141

Figura 20 – Resultados obtidos pelas heurísticas para problemas de grande porte em termos de DRPM.....	146
Figura 21 – Tempo total de processamento utilizado pelas heurísticas em problemas de grande porte agrupados pelo percentual de gargalos.	147
Figura 22 – Resultados obtidos pela TOC-SN em comparação à P. L. I. para problemas grande porte em termos de DRPM agrupados pelo percentual de gargalos.	150
Figura 23 – Tempo total de processamento utilizado pela TOC-SN e P. L. I. em problemas de grande porte agrupados pelo percentual de gargalos.	150
Figura 24 – Algoritmo <i>Quicksort Recursivo</i>	165

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características das coleções bibliométricas.....	43
Tabela 2 – Contribuição da coleção Goldratt (1988).....	45
Tabela 3 – Contribuição da coleção Luebbe & Finch (1992).....	47
Tabela 4 – Desempenho da TOC.....	55
Tabela 5 – Dados produtivos do problema P e Q	70
Tabela 6 – Relação de ganho por consumo de recurso gargalo.....	73
Tabela 7 – Relacionando o mix de produção, a TOC, e o problema da mochila.	80
Tabela 10 – Comportamento da heurística TOC-AK.....	90
Tabela 11 – Problema P e Q adaptado com dois gargalos.	99
Tabela 12 – Dados produtivos do problema A , B , C , e D	105
Tabela 13 – Valores obtidos para os R_i	107
Tabela 14 – Primeira verificação do gargalo dominante.	108
Tabela 15 – Segunda verificação do gargalo dominante.	108
Tabela 16 – Terceira verificação do gargalo dominante.	108
Tabela 17 – Obtendo os valores de X	110
Tabela 18 – Busca na vizinhança.....	111
Tabela 19 – Prioridades por recursos gargalos.	111
Tabela 20 – Utilização do B -Greedy.	116
Tabela 21 – Utilização do B -Greedy- M	116
Tabela 22 – Identificando a solução S_2	117
Tabela 23 – O valor de RA_i	117
Tabela 24 – Identificação da solução S_4	118

Tabela 25 – Identificação da solução S_5	118
Tabela 26 – Soluções obtidas.....	119
Tabela 27 – Classes dos problemas.....	122
Tabela 28 – Problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte.	123
Tabela 29 – Problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte.....	124
Tabela 30 – Problemas de grande porte.	126
Tabela 31 – Resultados obtidos para os problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte em termos de DRP.	131
Tabela 32 – Resultados obtidos para os problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte em termos de DRP.	132
Tabela 33 – Tempo de processamento para os problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte.	133
Tabela 34 – Tempo de processamento para os problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte.	134
Tabela 35 – Resultados agrupados pelo número de gargalos obtidos pelas heurísticas para problemas de pequeno e médio porte em termos de DRPM e tempo de processamento.	135
Tabela 36 – Comparação do desempenho da TOC-SN com a P. L. I. para os problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte.	138
Tabela 37 – Comparação do desempenho da TOC-SN com a P. L. I. para os problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte.	139
Tabela 38 – Resultados obtidos pela TOC-SN em comparação à P. L. I. para problemas de pequeno e médio porte em termos de DRPM e tempo de processamento.	140
Tabela 39 – Resultados obtidos para os problemas 1 a 50 de grande porte em termos de DRP.	143
Tabela 40 – Tempo de processamento para os problemas 1 a 50 de grande porte.	144

Tabela 41 – Resultados agrupados por percentual de gargalos obtidos pelas heurísticas para problemas de grande porte em termos de DRPM e tempo de processamento.	145
Tabela 42 – Comparação do desempenho da TOC-SN com a P. L. I. para os problemas de grande porte.	148
Tabela 43 – Resultados obtidos pela TOC-SN em comparação à P. L. I. para problemas grande porte em termos de DRPM e tempo de processamento.	149

Lista de Abreviaturas e Siglas

APICS	<i>American Production and Inventory Control Society</i>
BKP	<i>Bounded Knapsack Problem</i>
CCPM	<i>Critical Chain Project Management</i>
DRP	Desvio Relativo Percentual
DRPM	Desvio Relativo Percentual Médio
MKP-I	<i>Multiple Knapsack Problem with Identical Capacities</i>
MRP	<i>Material Requirement Planning</i>
OPT	<i>Optimized Production Technology</i>
P. L. I.	Programação Linear Inteira
RPL	Relaxamento do Problema Linear
RSI	Retorno Sobre o Investimento
TOC	<i>Theory of Constraints</i>
TOCICO	<i>Theory of Constraints International Certification Organization</i>
UKP	<i>Unbounded Knapsack Problem</i>
WSPT	<i>Weighted Shortest Processing Time first</i>

Lista de Símbolos

Índices

$j = 1, \dots, m$ tarefas, itens ou recursos produtivos .

$i = 1, \dots, n$ produtos ou máquina

$q = 1, \dots, m$ recursos gargalos na heurística TOC-h.

$k = 1, \dots, q$ recursos gargalos da heurística TOC-AK.

$\theta = 1, \dots, 5$ soluções obtidas da heurística TOC-SN.

Dados

α quantidades a serem produzidas do produto P .

BN_q recurso gargalo q .

b_j capacidade disponível do recurso produtivo j .

b_j número de cópias idênticas do item j .

β quantidades a serem produzidas do produto Q .

CM_i diferença entre o preço de venda e o custo do material direto para o produto i .

CN_j capacidade necessária do recurso gargalo j para se produzir x_i unidades.

CP_j capacidade produtiva do recurso j .

C_{i,j_k} data de término do processamento na máquina i da tarefa j_k .

$C_{m,n}$ tempo de término do processamento da última tarefa na última máquina, ou seja, o *makespan*.

c_i	custo direto do produto i .
c_q	capacidade disponível do recurso gargalo q .
CR	conjunto contendo os recursos gargalos.
CU	consumo unitário da restrição.
c	tamanho ou capacidade da mochila.
D_i	demanda de mercado para o produto i .
d_j	diferença entre a capacidade disponível e a necessária para o recurso j .
DO	despesa operacional total.
$DRP(h)$	desvio relativo percentual da heurística h .
e_j	eficiência do produto j .
f	parâmetro que indica quantas unidades do produto X são necessárias para gerar o mesmo ganho de uma unidade de Y .
$f(h)$	valor da função objetivo quando a heurística h é utilizada.
f^*	melhor valor conhecido ou obtido.
G	ganho total.
H	conjunto de produtos que não tiveram sua demanda atendida.
I	investimento total.
LL	lucro líquido.
m	número de máquinas ou recursos.
N	quantidades do produto X a serem reduzidas para o cálculo do parâmetro Z .
n	número de tarefas.
p_i	ganho proporcionado pelo produto i .
p_j	o valor de uma característica do item j a ser carregado na mochila ou tempo de processamento da tarefa j .
P	produto P .
P_i	preço de venda do produto i .

Q_i	quantidades do produto i .
Q_k	quantidades do produto a jusante mais próximo de Q_i .
Q	produto Q .
R_{i,BN_k}	diferença entre o preço de venda e o custo do material direto para cada unidade consumida de BN_k pelo produto i .
RSI	retorno sobre o investimento.
S_θ	conjunto contendo as cinco soluções obtidas pela heurística TOC-SN.
s	item de parada no problema da mochila.
T_u	ganho unitário.
t_{ij}	consumo de recurso j pelo produto i .
$t_{left,q}$	sobra de recurso no gargalo BN_q .
$\overline{w}_q$	capacidade já utilizada no recurso gargalo q .
w_{iq}	consumo do recurso gargalo q pelo produto i .
w_j	peso diferenciado da tarefa j ou tamanho do objeto j .
x^{RPL}	conjunto contendo a solução ótima para o problema linear relaxado.
x_i	número de unidades do produto i a serem produzidas.
x_{iq}	número de unidades a serem produzidas do produto i conforme o recurso gargalo q .
x_j	variável binária que representa o objeto j .
X	conjunto de produtos que podem ter suas quantidades alteradas e proporcionarem aumentos no ganho. Na heurística TOC-AK corresponde a um produto que sofrerá diminuições em suas quantidades.
Y	corresponde ao produto que terá as suas quantidades aumentadas por causa da redução das quantidades a serem produzidas de X , na heurística TOC-AK.
Z	parâmetro utilizado para indicar qual é a melhor alternativa ou ganho total proporcionado pelo mix de produção.

Sumário

Dedicatória	v
Folha de Aprovação.....	vii
Agradecimentos	ix
Epígrafe	xi
Resumo	xiii
Abstract	xv
Lista de Ilustrações.....	xvii
Lista de Tabelas	xix
Lista de Abreviaturas e Siglas	xxiii
Lista de Símbolos	xxv
Sumário	xxix
1. Introdução	33
1.1 Conceção da Pesquisa	33
1.2 Objetivo Principal da Pesquisa	37
1.3 Relevância da Pesquisa	38
1.4 Estrutura da Pesquisa	39
2. Revisão de Literatura	41
2.1 Referencial Teórico.....	41
2.1.1 Análise Bibliométrica	42
2.1.2 Análise Cronológica	48
2.1.2.1 Coleção Goldratt (1988).....	48
2.1.2.2 Coleção Luebbe & Finch (1992)	51

2.2	Teoria das Restrições.....	53
2.2.1	Definição.....	53
2.2.2	Conceitos Básicos	55
2.2.2.1	Sistema e Meta.....	55
2.2.2.2	Restrições e Não Restrições.....	56
2.2.2.3	Otimização Local e do Sistema	58
2.2.3	Estágios Evolutivos.....	59
2.3	Mix de Produção	69
2.3.1	Definindo o Mix de Produção com Auxílio da TOC	73
2.3.2	Relacionando o Mix de Produção, a TOC, e o Problema da Mochila	74
3.	Métodos Heurísticos.....	83
3.1	Procedimentos de Pesquisa	83
3.2	A Heurística TOC-h	86
3.3	A Heurística TOC-AK.....	90
3.4	A Heurística TOC-SN	96
3.4.1	O Algoritmo <i>B-Greedy-M</i>	97
3.4.2	O Pseudocódigo da Heurística TOC-SN.....	100
3.5	Aplicação das Heurísticas: Um Exemplo Numérico.....	105
3.5.1	A Aplicação da Heurística TOC-h	106
3.5.2	A Aplicação da Heurística TOC-AK	111
3.5.3	A Aplicação da Heurística TOC-SN.....	115
4.	Experimentação Computacional	121

4.1	Conjunto de Problemas	121
4.2	Software e Hardware	126
4.3	Resultados Obtidos	129
4.3.1	Problemas de Pequeno e Médio Porte	130
4.3.2	Problemas de Grande Porte	142
5.	Considerações Finais	151
	Referência Bibliográfica.....	155
	Apêndice - A	165
	Índice Remissivo	167

1. Introdução

Você vê coisas e diz: Por que?; mas eu sonho coisas que nunca existiram e digo: Por que não? - George Bernard Shaw (Dramaturgo – 1856 a 1950)

1.1 Concepção da Pesquisa

A partir da Revolução Industrial, que iniciou na Inglaterra em meados do século XVII e se expandiu pelo mundo no início do século XIX, as organizações presenciam um crescimento extraordinário no seu tamanho e complexidade. De maneira mais pontual, as oficinas de artesãos de outrora evoluíram para grandes corporações com unidades espalhadas pelo mundo inteiro. Entre todos os elementos que compõem o pano de fundo¹ dessa evolução, o principal fator dessa mudança foi o aumento na divisão do trabalho e a segmentação das responsabilidades gerenciais nessas organizações, consequentemente, os resultados desse processo de mudanças foram excelentes. No entanto, apesar de suas melhorias, esse processo apresentou alguns problemas que, por sua vez, ainda persistem em muitas organizações. Um deles é que com o exacerbo da complexidade e especialização nas organizações, torna-se cada vez mais difícil alocar os recursos disponíveis para as diversas atividades da maneira mais eficiente para a organização como um todo (Hillier & Lieberman, 2001, p. 1).

Com base nesse contexto, a questão da alocação dos recursos passa a ser incumbência de todas as áreas de uma organização. Conforme apontado por Wang, Sun, & Yang (2009, p. 4522), apesar dessa necessidade latente de gestão eficiente dos recursos em qualquer parte de uma organização, na área produtiva a questão parece ser mais clara e aguda, pois quando as

¹ De acordo com o dicionário eletrônico Houaiss da língua portuguesa, em seu sentido figurado, a expressão “pano de fundo” é compreendida como uma série de eventos sobre os quais se desenrola uma ação (Houaiss, Franco, & Villar, 2001).

organizações aumentam ou diminuem o seu nível de produção durante períodos de ajustes estratégicos ou de investimentos financeiros, o principal problema que surge é como utilizar os recursos escassos para maximizar os ganhos, ou melhor, como otimizá-los para aumentar as saídas geradas por eles. De maneira pormenorizada, no escopo da área produtiva, como muito bem salienta Patterson (1992, p. 80), visando otimizar os recursos escassos, uma das decisões mais fundamentais é a definição ou escolha do mix de produção. A deliberação básica nesse problema está em identificar as quantidades a serem produzidas de cada produto o que, por sua vez, possibilita maximizar lucros ou minimizar prejuízos. Além disso, para Fredendall & Lea (1997, p. 1535), o mix de produção é uma das principais partes do *Master Production Schedule - MSP*², que corresponde, no entendimento de Slack, Chambers, & Johnston (2007, p. 438), a uma importante programação de produção que, contendo volume e tempo necessários para elaboração de produtos finais, auxilia no planejamento da necessidade de materiais.

Como muito bem salienta Linhares (2009, p. 122), apesar da definição das quantidades a serem produzidas, ou melhor, do mix de produção parecer um problema de fácil solução, ele não pode ser entendido como tal, visto que com a inserção de novos produtos no processo de fabricação, o número de possibilidades de mix de produção aumenta exponencialmente. Ademais, o mesmo pesquisador destaca que se existirem, no ambiente produtivo, recursos com a capacidade inferior à necessária para atender a demanda neles solicitadas, a definição do mix de produção é um problema NP-Completo³, ou seja, de difícil solução, visto que, essa situação de escolha se assemelha ao problema da mochila também conhecido como *Knapsack problem* ou *Rucksack problem*⁴.

² Tradução livre: plano mestre de produção.

³ Para uma discussão abrangente e detalhada a respeito de complexidade computacional ver *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, de Michael R. Garey e David S. Johnson ou, de maneira mais resumida, o terceiro capítulo em *Scheduling Algorithms* de Peter Brucker.

⁴ Maiores informações sobre o problema da mochila serão apresentadas na seção 2.2.2.

Em sua versão original, apresentada por Dantzig (1957, p. 273), o problema da mochila compreende ao processo de decisão que uma pessoa deve realizar para selecionar alguns objetos como, por exemplo, roupas de cama, eletrônicos, e comida em lata, sendo que os mesmos apresentam diferentes pesos e importâncias.

De acordo com Pinedo (2008, p. 50), o problema da mochila corresponde a um caso especial de problemas de sequenciamento da produção em máquina única. Logo, conforme Linhares (2009, p. 127), por analogia, os produtos a serem selecionados para compor o mix de produção compreendem os itens a serem colocados na mochila, o ganho de cada produto corresponde ao valor dos objetos a serem selecionados, a carga máxima requerida para cada produto em um recurso equivale ao peso de cada item e, por fim, a capacidade do recurso produtivo apresenta similitudes com o peso que o mochileiro aguenta carregar. Sob a ótica da *Theory of Scheduling*⁵, conforme aponta Pinedo (2008, p. 50), uma boa e popular solução para o problema da mochila é a aplicação da regra *Weighted Shortest Processing Time first - WSPT*⁶ que prioriza a ordenação das tarefas de maneira decrescente com base na taxa w_j/p_j , aonde w_j corresponde a um peso diferenciado⁷ e p_j ao tempo de processamento da tarefa j .

Dessa forma, para fazer frente a esse problema, isto é, auxiliar os gestores das organizações ou, de maneira mais precisa, os responsáveis pela determinação das quantidades a serem produzidas na definição do mix de produção, diversas heurísticas⁸ foram propostas para auxiliar nesse processo, a saber: (a) Luebbe & Finch (1992); (b) Patterson (1992); (c) Lee & Plenert (1993); (d) Plenert (1993); (e) Fredendall & Lea (1997); (f) Hsu & Chung (1998); e (g) Aryanezhad & Komijan (2004).

⁵ Tradução livre: Teoria da Programação.

⁶ Tradução livre: Priorizar o processamento das tarefas com menor tempo de processamento.

⁷ O peso diferenciado corresponde à diferença entre o preço de venda de um produto e o custo do material direto do mesmo.

⁸ Conforme Polya (1995, pp. 86-87) e Zanakis & Evans (1981, p. 84), a palavra heurística é derivada do grego "*heuriskein*" e significa aquilo que serve para descobrir ou descoberta.

No entendimento de Zanakis & Evans (1981, p. 84), as heurísticas são compreendidas como algoritmos⁹ que apresentam bons desempenhos ou soluções factíveis de modo fácil e rápido para vários problemas, mas que não apresentam provas de serem sempre rápidas e eficientes em todos os problemas. Goldbarg & Luna (2005, p. 196) complementam essa definição destacando que as heurísticas são capazes de garantir boas soluções ou até mesmo a otimalidade da solução encontrada, especialmente nas ocasiões em que a busca se inicia a partir de uma solução viável próxima do ótimo. Além disso, de acordo com Silver et al. (1980, p. 158) e Silver (2004, p. 939), as heurísticas podem ser classificadas em construtivas quando acrescentam componentes individuais à solução inicial até a obtenção de uma solução factível.

Entre as várias heurísticas construtivas para definição de mix de produção, atualmente, se destacam a TOC-h, de Fredendall & Lea, apresentada em 1997, e a TOC-AK, de Aryanezhad & Komijan, proposta em 2004. As duas heurísticas propostas foram desenvolvidas considerando a filosofia de gerenciamento de produção denominada Teoria das Restrições ou *Theory of Constraints* - TOC, proposta pelo físico israelense Dr. Eliyahu M. Goldratt¹⁰. Em termos amplos, a TOC visa identificar as metas da organização e, posteriormente, orientar como todo o sistema organizacional deve explorar os recursos que limitam a maximização dessas metas (Plenert, 1993, p. 126). Dentro desse contexto, a heurística TOC-h se destaca por dois aspectos muito importantes, ou seja, a proposição da utilização do gargalo dominante¹¹ e a utilização de um procedimento de busca na vizinhança¹² para melhorar a solução inicial. Por outro lado, a heurística TOC-AK é muito relevante por

⁹ De acordo com Cormen, Leiserson, & Rivest, (2000, p. 12), um algoritmo é qualquer procedimento computacional bem definido que toma algum valor ou conjunto de valores de entrada e produz algum valor ou conjunto de valores como saída.

¹⁰ Na maioria das traduções para a língua portuguesa dos livros de Eliyahu M. Goldratt, o mesmo é apresentado como físico israelense. Entretanto, de acordo com informações disponíveis no site pessoal (<http://www.eligoldratt.com.br/index.php?cont=21>), acessado no dia 03/09/2009, ele é bacharel em ciência pela Universidade Tel Aviv, mestre e doutor em filosofia pela Universidade Bar-Ilan.

¹¹ Para Fredendall & Lea (1997, p. 1538), conforme apontado na heurística TOC-h, um gargalo é considerado dominante quando o mesmo é o primeiro recurso produtivo a apresentar falta de capacidade.

¹² Verificação e avaliação de melhoria nos resultados adotando soluções adjacentes à solução inicial dentre todas as soluções possíveis.

realizar uma busca na vizinhança não considerando apenas a solução inicial com base no gargalo dominante, mas avaliando todas as diferentes soluções com base nos diversos gargalos existentes de maneira conjunta. Embora tais características sejam importantes para se alcançar bons resultados, nem sempre elas são capazes de assegurar soluções com qualidades razoáveis para diversos ambientes produtivos.

1.2 Objetivo Principal da Pesquisa

Com base no contexto apresentado na seção anterior, o principal objetivo deste trabalho é **propor e analisar uma heurística construtiva, denominada TOC-SN, baseada na TOC, para auxiliar na definição de mix de produção, visando à obtenção de melhores soluções quando comparadas com as heurísticas TOC-h e TOC-AK**. A principal diferença entre a heurística proposta e as outras duas, de destaque na literatura, consiste em duas qualidades distintivas fundamentais que, por sua vez, compreendem os desdobramentos do objetivo principal deste trabalho, ou seja, os objetivos secundários, a saber:

- *Apresentar e analisar uma nova maneira para identificar o gargalo dominante quando possível e, conseqüentemente, desenvolver uma solução inicial; e*
- *Propor e melhorar a solução obtida pela heurística proposta.*

Visando o cumprimento desses objetivos e, também, a apresentação dos aspectos metodológicos para possibilitar a aplicação e utilização das heurísticas por outros especialistas na área, uma experimentação computacional será realizada para testar a eficiência da heurística proposta em comparação às demais heurísticas na definição de mix de produção em diversas situações. Dentro desse contexto, não é o objetivo deste trabalho abordar tudo sobre

o mix de produção e assuntos correlatos que entremeiem o problema de pesquisa, mas expor os princípios necessários, por meio de uma revisão da literatura, para compreensão da lógica e simplicidade desses, pois, em suma, todas as heurísticas construtivas desenvolvidas para a definição de mix de produção visam contribuir para o processo decisório a respeito das quantidades de seus produtos. Além disso, por motivos de delimitação do tema de pesquisa é importante destacar que, também, não é objetivo desse trabalho realizar a comparação da heurística construtiva proposta com outros métodos que não sejam construtivos.

1.3 Relevância da Pesquisa

Em uma perspectiva temporal, segundo Krauth & Warschat (1989, p. 142), depois da publicação do pioneiro trabalho intitulado *A scientific routine for stock control*, de Wilson R. H, em 1935, na *Harvard Business Review*, muita atenção tem sido dada para os problemas existentes na área de produção como, por exemplo, a definição do mix de produção, pois esse problema apresenta impactos diretos em várias áreas da organização, já que a definição errônea das quantidades a serem produzidas pode proporcionar a necessidade de altos níveis de inventários.

Esse apontamento feito por Krauth & Warschat (1989, p. 142), conforme denota Lea (2007, p. 1188-1189), continua válido nos dias atuais, pois o processo de manufaturar envolve a conversão de matéria prima em produtos acabados mediante a utilização de equipamentos e esforços dos trabalhadores e, logo, a maneira mais eficiente de realizar essa conversão contribuirá com o principal objetivo estratégico da organização. Assim, qualquer pesquisa ou estudo que auxilie na definição do mix de produção se reveste de suma importância tanto na prática, por sua fácil adequação a situações reais, quanto no tocante a aspectos acadêmicos, por suscitar novas discussões e contribuir para a resolução de um problema clássico.

1.4 Estrutura da Pesquisa

Além desta introdução, esta tese está estruturada da seguinte forma: no capítulo 2, de maneira breve, uma revisão de literatura sobre TOC e mix de produção serão apresentadas; o capítulo 3 trata de expor as principais heurísticas construtivas da literatura e a heurística proposta; no capítulo 4 são mostrados os dados, o software¹³, o hardware e os principais procedimentos de pesquisas que conduzirão a experimentação computacional; e finalmente, o capítulo 5 apresentará as principais conclusões.

¹³ O termo “software” já se encontra nos dicionários da língua portuguesa. Para maiores informações consulte Houaiss, Franco, & Villar (2001).

2. Revisão de Literatura

Se fui capaz de ver mais longe, é porque me apoiei em ombros de gigantes. – Isaac Newton (Cientista Inglês – 1643 a 1727).

2.1 Referencial Teórico

No tocante aos principais artigos referentes aos temas desse trabalho, com o objetivo de elaborar uma revisão de literatura válida e relevante, buscando identificar as principais definições e, tão logo, reconhecer a ordem de ocorrência e desenvolvimento dos fatos fundamentais referentes aos assuntos da presente pesquisa, as seguintes análises foram realizadas:

- Bibliométrica: corresponde a um estudo pormenorizado dos artigos ordenados pela sua relevância que, por sua vez, é definida com base em um ranking de citações; e
- Cronológica: compreende ao estudo e, conseqüentemente, a identificação dos principais fatos ou ordem de seu acontecimento bem uma perspectiva temporal.

Nesse sentido, a utilização da TOC nos processos de otimização da produção e a discussão a respeito da definição do mix de produção com auxílio da TOC ou da P. L. I. foram selecionadas como as principais áreas de conhecimento a que se refere esta tese. Conseqüentemente, no que diz respeito à utilização da TOC nos processos de otimização da produção, o artigo *Computerized shop floor scheduling*, de Goldratt (1988), foi selecionado como a primeira publicação indexada e importante a respeito do assunto. Por outro lado, no tocante a discussão a respeito da definição de mix de produção com auxílio da TOC ou da P.

L. I., o artigo *Theory of constraints and linear programming: a comparison*, de Luebbe & Finch (1992), foi escolhido com o mesmo propósito. Além disso, é importante destacar que não é o objetivo na seção de referencial teórico, ou melhor, nas subseções de análise bibliométricas e cronológica apresentar os principais conceitos e definições referentes ao tema desse trabalho, mas de expor o encadeamento lógico necessário para sua compreensão e, conseqüentemente, do objetivo desta tese, visto que as principais definições e conceitos serão apresentados de maneira mais específica a partir da seção 2.2. Com base nesse contexto e nos artigos indicados anteriormente, nas próximas seções serão apresentadas as análises bibliométricas e cronológica.

2.1.1 Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica foi utilizada com o objetivo de indicar a leitura dos artigos que proporcionaram ou iniciaram novas discussões, isto é, outros artigos. Assim, a partir dos artigos bases indicados na seção anterior, foram identificados, mediante busca no site *ISI Web of Knowledge – Science*¹⁴, todos os artigos, publicados em periódicos indexados e contemplados no *Journal Citation Reports – JCR*¹⁵, que os citaram, visando à elaboração de duas coleções ou, em outras palavras, de dois bancos de dados para subsidiar a análise bibliométrica e, tão logo, a cronológica. As características dessas duas coleções são apresentadas na Tabela 1.

¹⁴ Corresponde a uma base de dados de indexação de aproximadamente 9.300 periódicos, publicados a partir de 1900, nas áreas de arte, ciência, ciências sociais, e humanidades. Para maiores informações a respeito do *ISI Web of Knowledge – Science* acesse <http://science.thomsonreuters.com/pt/produtos/wos/>.

¹⁵ É uma ferramenta de análise sistêmica e estatística com o objetivo de identificar de maneira quantitativa a influência e, tão logo, o impacto de um periódico em uma determinada área do conhecimento. Informações pertinentes a respeito do JCR podem ser acessadas em http://thomsonreuters.com/products_services/science/science_products/a-z/journal_citation_reports/

Coleção – Artigo de Origem	Número de Referências	Características		
		Artigos Analisados	Autores	Periódicos
Goldratt (1988)	500	15	29	6
Luebbe & Finch (1992)	242	16	30	6

Tabela 1 – Características das coleções bibliométricas.

Com base nessas duas coleções e com o auxílio do *HistCite*^{®16}, um software de uso livre para auxiliar os pesquisadores na visualização, análise e identificação das relações históricas a partir dos resultados de uma busca a respeito de literatura especializada no site *ISI Web of Knowledge – Science*, foram elaborados dois mapas de citações que, por sua vez, identificaram quais artigos deveriam ser lidos em uma perspectiva temporal e de importância, já que todos os registros das coleções foram classificadas com base em um ranking de citações. Na Figura 1 é apresentado o mapa de citações referente à coleção do Goldratt (1988).

¹⁶ O *HistCite*[®] foi desenvolvido pelo Dr. Eugene Garfield, um dos fundadores do *ISI Web of Knowledge – Science* e responsável pelo desenvolvimento do *Journal Citation Reports – JCR* e *Science Citation Index – SCI*.

Figura 1 – Mapa de citações referente à coleção de Goldratt (1988).

Com base na Figura 1 é possível identificar que, por exemplo, o artigo publicado ano de 1998, identificado pelo número 2, é o principal artigo desse assunto, visto o tamanho do círculo ou importância desse em relação aos demais artigos. Consequentemente, com o objetivo de expor quais foram os principais trabalhos identificados a respeito da coleção de Goldratt (1998), na Tabela 2 são apresentados todos os dados de cada trabalho demonstrado no mapa de citações exposto na Figura 1.

Legenda	Autores	Artigo	Periódico	Ranking de Citação Local
2	Rahman (1998)	<i>Theory of Constraints: A review of the philosophy and its applications</i>	<i>International Journal of Operations & Production Management</i>	8
1	Miltenburg (1997)	<i>Comparing JIT, MRP and TOC, and embedding TOC into MRP</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	4
6	Gupta M. (2003)	<i>Constraints management - recent advances and practices</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	3
9	Watson, Blackstone, & Gardiner (2007)	<i>The evolution of a management philosophy: The theory of constraint</i>	<i>Journal of Operations Management</i>	3
5	Gupta, Baxendale, & Raju (2002)	<i>Integrating ABM/TOC approaches for performance improvement: a framework and application</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	2
7	Boyd & Gupta (2004)	<i>Constraints Management: What is the theory?</i>	<i>International Journal of Operations & Production Management</i>	2
4	Gupta, Ko, & Min (2002)	<i>TOC-based performance measures and five focusing steps in a job-shop manufacturing environment</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	1
8	Steele, Philipoom, Malhotra, & Fry (2005)	<i>Comparisons between drum–buffer–rope and material requirements planning: a case study</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	1
3	Croci & Pozzetti (2000)	<i>OPT scheduling performances: a case study</i>	<i>Production Planning & Control</i>	-
10	Gupta & Boyd (2008)	<i>Theory of constraints: a theory for operations management</i>	<i>International Journal of Operations & Production Management</i>	-
11	Lembke (2009)	<i>Theory of constraints at UniCo: analysing The Goal as a fictional case study</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	-
12	Gupta & Snyder (2009)	<i>Comparing TOC with MRP and JIT: a literature review</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	-
13	Wang, Sun, & Yang (2009)	<i>Theory of constraints product mix optimisation based on immune algorithm</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	-
14	Hicks & Pongcharoen (2009)	<i>Applying different control approaches for resources with high and low utilisation: a case study of the production of complex products with stochastic processing times</i>	<i>International Journal of Technology Management</i>	-
15	Hsiao, Lin, & Huang (2010)	<i>Optimal multi-stage logistic and inventory policies with production bottleneck in a serial supply chain</i>	<i>International Journal of Production Economics</i>	-

Tabela 2 – Contribuição da coleção Goldratt (1988).

Por outro lado, da mesma forma que para a coleção do Goldratt (1988), o mapa de citações referente a coleção do Luebbe & Finch (1992) é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Mapa de citações referente à coleção de Luebbe & Finch (1992).

De maneira semelhante que para a coleção de Goldratt (1998), os dados referentes aos principais trabalhos identificados na coleção de Luebbe & Finch (1992) são apresentadas na Tabela 3.

Legenda	Autores	Artigo	Periódico	Ranking de Citação Local
2	Fredendall & Lea (1997)	<i>Improving the product mix heuristic in the theory of constraints</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	11
3	Hsu & Chung (1998)	<i>The TOC-based algorithm for solving product mix problems</i>	<i>Production Planning & Control</i>	6
10	Aryanezhad & Komijan (2004)	<i>An improved algorithm for optimizing product mix under the theory of constraints</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	4
5	Onwubolu & Mutingi (2001)	<i>A genetic algorithm approach to the theory of constraints product mix problems</i>	<i>Production Planning & Control</i>	3
7	Onwubolu (2001)	<i>Tabu search-based algorithm for the TOC product mix decision</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	3
9	Lea & Fredendall (2002)	<i>The impact of management accounting, product structure, product mix algorithm, and planning horizon on manufacturing performance</i>	<i>International Journal of Production Economics</i>	3
4	Mabin & Gibson (1998)	<i>Synergies from spreadsheet LP used with the theory of constraints - a case study</i>	<i>Journal of The Operational Research Society</i>	1
6	Onwubolu & Mutingi (2001)	<i>Optimizing the multiple constrained resources product mix problem using genetic algorithms</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	1
8	Gupta, Ko, & Min (2002)	<i>TOC-based performance measures and five focusing steps in a job-shop manufacturing environment</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	1
11	Köksal (2004)	<i>Selecting quality improvement projects and product mix together in manufacturing: an improvement of a theory of constraints-based approach by incorporating quality loss</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	1
12	Tsai, Lai, & Chang (2007)	<i>An algorithm for optimizing joint products decision based on the Theory of Constraints</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	1
1	Verma (1997)	<i>Management Science, Theory of Constraints/Optimized Production Technology and Local Optimization</i>	<i>Omega</i>	-
13	Bhattacharya, Vasant, Sarkar, & Mukherjee (2008)	<i>A fully fuzzified, intelligente theory-of-constraints product-mix decision</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	-
14	Wang, Sun, & Yang (2009)	<i>Theory of constraints product mix optimisation based on immune algorithm</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	-
15	Aryanezhad, Badri, & Komijan (2010)	<i>Threshold-based method for elevating the system's constraint under theory of constraints</i>	<i>International Journal of Production Research</i>	-
16	Ray, Sarkar, & Sanyal (2010)	<i>The TOC-Based Algorithm for Solving Multiple Constraint Resources</i>	<i>IEEE Transactions on Engineering Management</i>	-

Tabela 3 – Contribuição da coleção Luebbe & Finch (1992).

Considerando os artigos expostos na Tabela 2 e Tabela 3, na próxima seção são apresentadas, de maneira cronológica, as principais contribuições de cada trabalho.

2.1.2 Análise Cronológica

2.1.2.1 Coleção Goldratt (1988)

Inicialmente é importante destacar que de acordo com Gupta, Baxendale, & Raju (2002, p. 3226) que, por volta de 1989, a partir de um colóquio, entre os estudantes da área de gestão de operações e contabilidade, ocorrido na *Harvard Business School*, temas como, por exemplo, *Just-in-Time* - JIT e TOC começaram a ser discutidos de maneira mais intensa, pois até então, tais temas estavam sendo discutidos principalmente nas conferências anuais da *American Production and Inventory Control Society – APICS*. Esse apontamento pode ser melhor observado quando se verifica, por exemplo, que quase todas as referências bibliográficas apontadas no trabalho de Goldratt (1988) são de trabalhos apresentados na *APICS*.

A partir das idéias apresentadas por Goldratt (1988), Miltenburg (1997) propôs e apresentou, em uma indústria de microeletrônica voltada para a fabricação de circuitos, a utilização de um procedimento composto por cinco passos ou fases para implementação do JIT ou da TOC em um sistema de planejamento dos recursos de manufatura, isto é, em sistemas MRP.

Rahman (1998), considerando as vantagens competitivas proporcionadas pelas novas abordagens de gestão das operações como, por exemplo, o JIT e a TOC, relatadas em livros, conferências e artigos publicados em periódicos, apresentou uma revisão de literatura classificando as publicações nas seguintes categorias, a saber: a) apresentação da filosofia

TOC; b) exposição de aplicações da TOC; e c) livros texto referentes à TOC. Em termos amplos, a contribuição de Rahman (1998) foi muito importante na área da TOC, pois sintetizava ou indicava, ainda que de maneira simplista, aos pesquisadores na área os principais conceitos, artigos e livros referentes à TOC.

Croci & Pozzetti (2000), assim como Miltenburg (1997), também apresentou um estudo de caso tendo como objetivo expor, a partir de exemplos de uma organização na área de tecelagem, os principais impactos proporcionados pela gestão das restrições em um ambiente produtivo.

Com base em outra perspectiva da TOC, Gupta, Baxendale, & Raju (2002) sugeriram um modelo denominado de *Activity-Based Throughput Management*, que integra os conceitos da TOC e da Gestão Baseada em Atividades, para auxiliar na melhoria da gestão de qualidade.

A partir da experiência prática apresentada por Miltenburg (1997) e da revisão de literatura realizada por Rahman (1998), Gupta, Ko, & Min (2002) apresentaram a utilização de medidas globais de desempenho baseadas na TOC em processos operacionais como, por exemplo, a definição do mix de produção, a gestão de inventário, e a programação e planejamento da produção.

Observando a necessidade da exposição sintetizada das características básicas da TOC, Gupta M. (2003) expôs, de maneira breve, um resumo a respeito dos conceitos básicos para os novos pesquisadores na área da TOC, já que ela tem sido um campo com muitas respostas ou soluções para problemas práticos e, também, acadêmicos. Ainda no tocante a essa necessidade, Boyd & Gupta (2004) sugeriram um modelo ou construto de gestão orientado pelo ganho¹⁷ sobre as restrições.

¹⁷ No contexto da TOC, de acordo com Kee & Schmidt (2000, p. 3), o conceito de ganho consiste no dinheiro gerado pelas vendas, ou seja, a taxa de dinheiro que o sistema gera. Assim, o ganho de um produto corresponde à diferença entre o preço de venda e o custo totalmente variável.

Ao contrário de Miltenburg (1997), Steele, Philipoom, Malhotra, & Fry (2005) realizaram uma comparação dos aspectos entre o MRP e a TOC, no que se refere ao controle de um ambiente manufatureiro.

Seguindo a idéia de Rahman (1998), Watson, Blackstone, & Gardiner (2007) apresentaram uma revisão de literatura, com o objetivo de demonstrar alguns apontamentos considerados definições básicas relacionadas à TOC e, principalmente, à sua evolução, destacando estágios e potenciais áreas de estudos da TOC. Gupta & Boyd (2008) complementaram esse estudos apontando que, já naquela época, a TOC estaria sendo considerada como uma perspectiva de estudo na área de gestão das operações.

De maneira geral, atualizando o estudo de Miltenburg (1997), Gupta & Snyder (2009) realizaram uma revisão de literatura comparativa no que se refere às seguintes filosofias de gerenciamento: (a) MRP; (b) JIT; e (c) TOC. Ainda nesse mesmo sentido, Hicks & Pongcharoen (2009) expuseram os efeitos dessas filosofias no controle de sistemas produtivos que apresentassem altos e baixos níveis de utilização de seus recursos.

Lembke (2009) demonstrou uma análise de todas as informações quantitativas da terceira edição livro “A Meta: Um processo de melhoria contínua”, visando auxiliar os gestores e, conseqüentemente, os acadêmicos a compreenderem e avaliarem os impactos cumulativos dos processos de melhoria contínua e, também, algumas inconsistências existentes no livro como, por exemplo, a divergência do número de fornos, existentes na área produtiva, apresentada nas suas páginas 146, 147, 148 e 192.

Wang, Sun, & Yang (2009) e, também, Hsiao, Lin, & Huang (2010) apresentaram a utilização de algoritmos, considerando alguns aspectos da TOC, para auxiliar no processo de tomada de decisão em problemas como, por exemplo, mix de produção, inventário, logísticos e de cadeia de suprimentos.

2.1.2.2 Coleção Luebbe & Finch (1992)

Tendo como base a comparação entre a TOC e a P. L. I., apresentada no trabalho de Luebbe & Finch (1992), Fredendall & Lea (1997) propuseram uma heurística construtiva, baseada na TOC, para a resolução de problema de mix de produção com múltiplas restrições que proporcionasse solução melhores do que a utilização das iniciais propostas por Goldratt (1988). Concomitantemente ao trabalho de Fredendall & Lea (1997), mas seguindo a perspectiva de comparação realizada por Luebbe & Finch (1992), Verma (1997) expôs uma comparação do desempenho da TOC com um método de otimização local e, também, com os princípios gerais das Ciências Administrativas.

Com base nessa linha de pesquisa apontada por Fredendall & Lea (1997), Hsu & Chung (1998) propuseram um algoritmo baseado em uma regra de dominância das restrições umas sobre as outras, sem realizar comparação com a heurística de Fredendall & Lea (1997), já apresentada na literatura.

No decorrer do processo de ampla divulgação da utilização de planilhas eletrônicas na resolução de problemas, Mabin & Gibson (1998) demonstraram, de maneira muito didática, a utilização da Programação Linear para definição de mix de produção com auxílio do *Microsoft Office Excel*[®]. Além disso, tais pesquisadores também indicaram que a TOC fornece uma estrutura para guiar a utilização da Programação Linear.

Onwubolu & Mutingi (2001 a), Onwubolu & Mutingi (2001 b), e Onwubolu (2001) apresentaram a utilização de meta-heurísticas como, por exemplo, algoritmos genéticos e Busca Tabu no problema de definição do mix de produção.

Dentro do enfoque do problema de mix de produção, Gupta, Ko, & Min (2002) demonstraram que medidas globais de desempenho baseadas na TOC poderiam ser utilizadas

em processos operacionais como, por exemplo, a definição do mix de produção, a gestão de inventário, e a programação e planejamento da produção.

Em uma perspectiva mais gerencial, Lea & Fredendall (2002) expuseram que a definição de fatores como, por exemplo, o algoritmo de identificação ou definição de mix de produção, sistemas de contabilidade gerencial, estrutura dos produtos, e horizonte de planejamento seriam responsáveis pelo desempenho das organizações manufatureiras.

Com o objetivo de propôs uma heurística construtiva mais eficiente que Fredendall & Lea, (1997), Aryanezhad & Komijan (2004) apresentaram uma heurística construtiva que define um mix de produção para cada gargalo e, conseqüentemente, os analisa visando identificar o melhor mix de produção entre todos.

Corroborando os estudos do problema de mix de produção, Köksal (2004) propôs também que a TOC poderia ser utilizada na avaliação e seleção de projetos de melhoria de qualidade conjuntamente com a definição de mix de produção, visto a correlação existente entre aumento de qualidade e o aumento das vendas.

Partindo das premissas ou idéias apresentadas nos trabalhos citados anteriormente, em que foram propostas heurísticas ou algoritmos para auxiliar no problema de definição do mix de produção, Tsai, Lai, & Chang (2007) sugeriram um algoritmo para otimização de processos de produção conjunta com base em princípios da TOC.

Retomando o problema de definição do mix de produção, Bhattacharya, Vasant, Sarkar, & Mukherjee (2008) apresentaram a utilização da lógica *fuzzy* e Wang, Sun, & Yang (2009) demonstraram o emprego de algoritmos imunes no problema de definição de mix de produção.

Ainda dentro desse foco, mas de maneira mais atual, Aryanezhad, Badri, & Komijan (2010) propuseram um algoritmo que, na medida do possível, utilizando processos markovianos de decisão, tenta converter recursos não restrição em capacidade para os

recursos gargalos, com o objetivo de auxiliar na definição do mix de produção. Por outro lado, Ray, Sarkar, & Sanyal (2010) demonstraram a utilização conjunta da TOC e de métodos analíticos hierárquicos na definição de mix de produção. Considerando todas essas contribuições e, conseqüentemente, essa tendência de pesquisa no desenvolvimento de métodos que apresentassem um bom desempenho com a utilização de pouco tempo computacional em relação à P. L. I., na próxima seção serão apresentados os principais conceitos referentes à TOC e mix de produção que subsidiarão o desenvolvimento da heurística proposta.

2.2 Teoria das Restrições

2.2.1 Definição

A Teoria das Restrições ou *Theory of Constraints* – TOC foi proposta e desenvolvida por Dr. Eliyahu M. Goldratt, por volta de 1980 (Lea & Fredendall, 2002, p. 281; Boyd & Gupta, 2004, p. 351). De maneira mais precisa, segundo Meleton (1987) apud Verma (1997, p. 191), a TOC surgiu, em Israel, quando o Dr. Eliyahu M. Goldratt aplicou uma técnica de predição de átomos de cristal aquecido em problemas de programação de tarefas com grande número de variáveis. Em termos amplos, a TOC é compreendida como um conjunto de princípios teóricos que fundamentam e sintetizam a miríade de conhecimentos particulares de gestão e controle que, por sua vez, reconhece o papel dos fatores limitantes do sistema e se foca sobre eles, visando o aumento ou a melhoria de suas utilizações. Ainda nesse contexto, utilizando-se das palavras de Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 400), a TOC pode ser compreendida como:

[...] uma abordagem pragmática (prática) e holística (prioriza o entendimento integral dos fenômenos) de melhoria contínua, cobrindo com base em uma comum fundamentação teórica os fatores que limitam o aumento da performance¹⁸ em relação a uma meta. Assim, existe uma necessidade elevada de compreensão de técnicas específicas e das variáveis do sistema¹⁹ para assegurar o sucesso de sua implementação e ampla aceitação²⁰.

Gupta & Snyder (2009, p. 3705), a partir de uma revisão de literatura realizada a respeito da TOC e outras teorias de gestão, advogam²¹ que ela tem surgido como um distinto, viável, e competitivo sistema de planejamento e controle para as organizações melhorarem o seu desempenho. Tais características apontadas por esses pesquisadores são possíveis porque a TOC é capaz de auxiliar em diversas atividades fundamentais nas organizações que, por sua vez, contribuem para o seu desempenho global. Esse apontamento é observado parafraseando Finch & Luebbe (2000, p. 1466):

A TOC fornece uma estrutura bem definida para melhorar o ganho que tem amplas implicações para a determinação do mix de produção, programação de produção, estabelecimento de pulmões/inventários, implementação de locais de inspeção etc. Seus objetivos vão além do escopo dos objetivos da programação linear. Ela ainda fornece uma eficiente maneira para melhorar a meta ou função de uma organização por meio de esforços contínuos²².

É válido ainda destacar, no tocante à utilização da TOC pelas organizações, que Mabin & Balderstone (2003, p. 581) realizaram uma análise da sua performance, a partir de oitenta e um estudos de casos previamente publicados em revistas especializadas e identificaram, no que diz respeito à redução de inventário, tempo de produção e melhoria do desempenho financeiro, conforme apresentado na Tabela 4, que a TOC foi capaz de auxiliar as organizações quanto a esses aspectos de maneira significativa.

¹⁸ O termo “performance” já se encontra nos dicionários da língua portuguesa. Para maiores informações consulte Houaiss, Franco, & Villar (2001).

¹⁹ O conceito de sistema na perspectiva da TOC é apresentado na seção 2.2.2.1.

²⁰ Tradução livre.

²¹ De acordo com o Novo Dicionário Eletrônico Aurélio, o termo “advogar” é compreendido como defender com razões e argumentos (Ferreira, 2004).

²² Tradução livre.

Aspectos	Número de Casos	Média
Redução de inventário	32	49%
Redução no tempo de processamento dos pedidos	34	70%
Aumento do desempenho financeiro	4	65%

Tabela 4 – Desempenho da TOC.

Fonte: Adaptado de Mabin & Balderstone (2003, p. 581).

Em recente trabalho, Goldratt (2010, pp. 3-4) induz ao entendimento de que a TOC em princípio pode ser sintetizada como a abordagem do foco, isto é, a performance de um sistema é determinada por um pequeno número de elementos. Assim, como muito bem destaca Rahman (1998, p. 337), o foco sobre esse pequeno número de elementos representará oportunidades de melhoria ou controle da maior parte do desempenho do sistema. Entretanto, resguardando o melhor entendimento da definição da TOC, se faz necessária a apresentação dos conceitos básicos que estruturam tal teoria.

2.2.2 Conceitos Básicos

2.2.2.1 Sistema e Meta

No entendimento de Dettmer (1997, p. 3), de maneira generalizada, um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou elementos interdependentes e interrelacionados ou como uma técnica, método ou processo empregado para transformar entradas em saídas, visando alcançar a sua meta que, por sua vez, é o objetivo do sistema. Segundo Spencer (1994, pp. 300-301), Boyd & Gupta (2004, p. 355) e Corbett (2005, p. 70), a meta de uma organização capitalista ou dos gestores que a compõem é ganhar dinheiro hoje e no futuro. Contudo, de acordo com Herman & Goldratt (2010, p. 587), em uma perspectiva mais atual essa definição de meta compreende a realização de ações que tenham o objetivo de tornar a organização cada vez mais bem-sucedida.

Conforme destacado por Corbett (2005, p. 46), ainda no tocante ao conceito de sistema e suas metas, uma analogia pode ser feita a partir de uma corrente, em que ela representaria o sistema e seus elos os seus componentes. Consequentemente, a meta ou objetivo desse sistema seria a sua capacidade de resistir à tração.

2.2.2.2 Restrições e Não Restrições

Os elementos do sistema podem ser classificados em restrições e não restrições, conforme a sua capacidade de atender as solicitações efetuadas sobre ele. Em contrapartida, os elementos que não apresentam capacidade para atender as solicitações são denominados de restrições e, por outro lado, os elementos que têm capacidade são os não restrições (Dettmer, 1997, p. 8). Ainda considerando a analogia da corrente e conforme destacam Gupta & Boyd (2008, p. 993), a restrição seria o elo mais fraco e os demais elos seriam os recursos não restrição. A Figura 3 é representativa desses conceitos de restrição e não restrição.

Figura 3 – Restrições e não restrições.

Fonte: Adaptado de Dettmer, (1997, p. 8) e Goldratt (2006, p. 50).

Considerando os aspectos de manufatura e produção, Dettmer (1997, p. 9) exemplifica os conceitos de restrição e não restrição a partir de um sistema produtivo que elabora produtos

por meio de cinco processos e tem uma demanda de quinze unidades por dia, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de restrições e não restrições em manufatura.

Fonte: Adaptado de Dettmer (1997, p. 9).

Com base na Figura 4 e considerando a demanda de quinze unidades por dia, esse sistema produtivo só consegue produzir seis unidades ao dia, pois o Processo C não consegue produzir mais do que seis unidades diariamente. Assim, a restrição desse sistema é o Processo C e os demais processos são do tipo não restrição. De acordo com Corbett (2005, pp. 35-36), a característica mais importante da TOC é assumir que em qualquer sistema existe no mínimo uma restrição, ou seja, alguma coisa que limita um melhor desempenho ou o alcance de altos padrões de performance. Ainda segundo esse autor, a afirmação de que todo sistema tem uma restrição se justifica ou é explicada pelo fato de que se não houvesse algo que limitasse o desempenho do sistema, esse seria infinito. Além disso, Onwubolu & Mutingi (2001, p. 21) destacam que, em uma organização, as restrições definem como o sistema gera dinheiro por meio das vendas e que, por causa disso, as restrições devem ser tratadas com muita atenção pelos gestores das organizações.

Ainda no que diz respeito à TOC, observando ela no tocante a sua progênie²³, é interessante acrescentar que para Souza (1997, p. 4) e Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 388), o início da TOC se deu com a introdução da tecnologia de otimização em softwares da programação de produção e ferramentas gerenciais para as áreas de logística, produção, e mensuração de desempenho. Além disso, com base nesses mesmos autores e em Goldratt & Cox (2006, p. 353), por contemplar ou auxiliar em diversas áreas do gerenciamento de operações como, por exemplo, gerenciamento de projetos, cadeia de suprimentos, melhoria de processos e variedade de ambiente de produção, a TOC já foi implementada em grandes companhias como, por exemplo, *3M, Amazon, AVCO, Bendix, Boeing, Delta Airlines, Ford Motor Company, General Electric, General Motor, Kodak, Philips, RCA, Westinghouse*, e, também, em organizações sem fins lucrativos tais como *British National Health Service, Israel Air Force, NASA, Pretoria Academic Hospital, e United States Department of Defense*.

2.2.2.3 Otimização Local e do Sistema

Um dos principais conceitos da TOC é indicar que, por causa da interdependência e da variação dos elementos do sistema, a performance do sistema como um todo não é igual à soma da performance individuais de todos os elementos. Consequentemente, não é necessário que todos os elementos do sistema apresentem uma ótima performance para que o sistema como um todo tenha um bom ou ótimo desempenho (Dettmer, 1997, p. 13). Assim, como será discutido na seção 3.4 e seção 3.5, uma boa performance do sistema em relação à sua meta é resultante principalmente da administração de suas restrições.

Nesse sentido, considerando o sistema produtivo apresentado na Figura 4, ele terá sua performance melhorada se o Processo C conseguir produzir mais do que seis unidades ao dia

²³ De acordo com o Novo Dicionário Eletrônico Aurélio, o termo “progênie” é compreendido como origem, procedência, ou ascendência (Ferreira, 2004).

e não se a capacidade de produção ao dia dos demais processos for aumentada, pois nesse exemplo o Processo C é a restrição do sistema. Ainda com base nesse exemplo, é válido frisar que esse processo de gestão das restrições também facilita a compreensão e a possibilidade de otimização do sistema aos gestores organizacionais, como muito bem destaca Maday (1994, p. 84):

O ponto de vista de Fox-Goldratt sobre a gestão das restrições faz com que o processo de otimização seja visível. Isto pode requerer um pouco de cuidado na aplicação, mas é muito útil porque nos permite ver o processo de otimização²⁴.

Nesse sentido, ainda considerando a perspectiva da gestão de produção, a utilização de maneira eficiente das restrições do sistema permite aumentar o nível de produção e diminuir o nível de inventário ou materiais em processo, pois somente as restrições, ou seja, os recursos gargalos devem ser utilizados em sua total capacidade. Goldratt (2010, p. 4) destaca ainda que uma hora das restrições perdida corresponde a uma hora perdida para todo o sistema e que uma hora poupada de um recurso não gargalo é uma miragem.

É importante destacar que de acordo com Goldratt (1991, p. 1), as restrições podem ser classificadas em dois tipos, a saber: (a) restrições de recursos como, por exemplo, uma máquina ou matéria-prima; e (b) restrições de política que, por sua vez, constituem as normas, procedimentos e práticas usuais. Além disso, geralmente no tocante ao escopo, é válido destacar que as restrições de recursos são geralmente internas e as políticas são internas e externas.

2.2.3 Estágios Evolutivos

²⁴ Tradução livre.

Watson, Blackstone, & Gardiner (2007) realizaram uma intensa pesquisa para identificar o processo de evolução da TOC desde seu surgimento até os dias atuais. Tais autores constataram que a TOC pode ser subdividida em cinco estágios ou fases distintas conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Estágios evolutivos da TOC.

Fonte: Adaptado de Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 388).

De maneira pormenorizada, conforme apontado por Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 388), esses cinco principais estágios contemplam ou podem ser assim explicitados:

- a) **A era do OPT – o algoritmo secreto:** Por volta de 1970, um vizinho do Dr. Eliyahu M. Goldratt, que gerenciava uma fábrica de gaiolas, solicitou a ele ajuda no desenvolvimento de um algoritmo de programação da produção que proporcionasse aumentos nos rendimentos da organização. Assim, o Dr. Eliyahu M. Goldratt desenvolveu um programa, denominado *Optimized Production Technology* – OPT, que triplicou o rendimento da organização em um pequeno período de tempo. Na década de 80, o Dr. Eliyahu M. Goldratt apresentou essa solução ao meio acadêmico com a submissão de um artigo à conferência anual da *APICS*. Além disso, com o objetivo de auxiliar a implementação do OPT, em 1986, mediante o livro *The Race*, o Dr. Eliyahu M. Goldratt e Robert E. Fox apresentaram nove regras para a boa gestão da produção, a saber:

1. Balancear o fluxo e não a capacidade;
2. O nível de utilização dos recursos não gargalos não deve ser determinado pelo seu próprio potencial, mas sim pelo potencial dos recursos gargalos;
3. Utilização e ativação²⁵ de um recurso não são sinônimos;
4. Uma hora de atraso no gargalo é uma hora de atraso em toda a produção;
5. Uma hora poupada em um recurso não gargalo é apenas uma miragem;
6. Os gargalos são responsáveis pelas saídas e pelos inventários existentes em todo o sistema;
7. Transferir um lote não pode e não deve ser igual a processar um lote;
8. O lote de transferência deve ser variável e não fixo; e
9. A programação da produção deve ser estabilizada a partir da observação de todos os gargalos do sistema simultaneamente. Assim, os tempos de espera ou de processamento dos produtos são resultados da programação e não podem ser pré-determinados.

Apesar dos esforços realizados, o Dr. Eliyahu M. Goldratt percebeu que existia uma grande dificuldade de expor suas idéias a gestores das organizações e aos acadêmicos.

- b) **A era da “Meta” – tambor, pulmão, e corda:** Visto a imensa dificuldade de disseminar suas idéias, o Dr. Eliyahu M. Goldratt e Jeff Cox escreveram um livro, chamado “A Meta”, no qual o protagonista Alex Rogo consegue recuperar uma

²⁵ Nota do autor: De maneira geral, o processo de ativação compreende ao emprego de um determinado recurso na elaboração dos produtos, sem que o recurso gargalo apresente condições de absorver ou processar tais produtos. Por outro lado, o processo de utilização corresponde ao emprego desse recurso com a possibilidade do recurso gargalo de absorver ou processar os produtos por eles gerados.

organização industrial com a ajuda de um mentor, um físico chamado Jonah, que auxilia Alex Rogo a aplicar a TOC na organização. Para tanto, nesse romance, os autores descrevem a aplicação da TOC mediante a existência de dois pré-requisitos e cinco passos de melhoria comumente denominados como processos de melhoria contínua.

Os dois pré-requisitos são:

- 1) Definir o sistema por meio da investigação e identificação de seus propósitos; e
- 2) Estabelecer medidas que alinhem o sistema para seu propósito.

Os cinco passos de melhora contínua são:

- 1) Identificar as restrições do sistema;
- 2) Decidir como explorar as restrições;
- 3) Subordinar todos os elementos da produção à restrição identificada no passo anterior;
- 4) Aumentar as capacidades das restrições do sistema; e
- 5) Se nos passos anteriores as restrições forem superadas, voltar ao primeiro passo, sem deixar que a inércia se torne uma restrição.

Ademais, tendo como finalidade o bom entendimento desses passos e, por conseguinte, uma eficiente aplicação, o Dr. Eliyahu M. Goldratt apresentou conjuntamente com os cinco passos, nos livros “A Meta” e “The Race”, uma metáfora na qual a filosofia TOC se assemelha a um tambor, pulmão e corda com base nos seguintes apontamentos:

- **O tambor:** Corresponde à restrição do sistema que deve determinar o ritmo da produção;
- **A corda:** Apresenta similitude com o mecanismo de liberação ou comunicação entre os processos da restrição e os demais que controlam ou limitam o material liberado ao sistema, para manter ou sustentar o gargalo em operação; e
- **Os pulmões:** Compreendem a existência de tempo ou material para sustentar uma provável falta de recursos que possa prejudicar as datas de entregas.

Para Luebbe & Finch (1992, p. 1471) e Gupta, Ko, & Min (2002, p. 909), cumpre frisar que, com base nos apontamentos do tambor, pulmão e corda, a filosofia TOC visa reduzir o *lead time* ou, em outras palavras, o tempo de espera entre a programação e o acabamento de um produto.

Esses avanços, no decorrer desse processo de evolução na teoria, facilitaram e conduziram a compreensão do que hoje se entende pelo conceito de TOC. Entretanto, os gestores das organizações ainda apresentavam muitas dificuldades para incorporar as fricções do mundo real a essa nova perspectiva, principalmente pela incongruência entre a TOC e as tradicionais medidas de desempenho de um sistema (Lea & Fredendall, 2002, p. 280).

- c) **A era da síndrome do palheiro²⁶ – a criação de medidas da TOC:** Desde seu início, os defensores da TOC têm chamado a atenção para a reforma dos padrões utilizados na contabilidade de custo. No tocante a esse apontamento, é conveniente destacar que, conforme apontado por Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 393) e Corbett (2005, p. 35), esse processo teria começado, por volta de 1983, quando Dr. Eliyahu M. Goldratt publicou o artigo “*Cost accounting: the number one enemy of productivity*”, na conferência internacional da APICS, alegando que os princípios da contabilidade de custos tradicional, quando aplicados para mensuração da performance, provocam enganos ou proporcionam informações erradas para os gestores das organizações. Para tanto, havia a necessidade da criação de um conjunto de princípios e, conseqüentemente, medidas para fazer frente às dificuldades impostas principalmente pelo rateio dos custos indiretos sugerida pela contabilidade de custos, conforme exposto nas próprias palavras de Goldratt (1991, pp. 29-30):

A contabilidade foi uma das soluções mais poderosas na história da indústria. Foi uma das grandes ferramentas que possibilitaram a indústria prosperar e crescer com notável velocidade. Devido a este crescimento, a necessidade de melhor tecnologia aumentou exponencialmente. Este mesmo crescimento também propiciou o meio para financiar a invenção e o desenvolvimento da tecnologia. Mas, com o avanço da tecnologia, mudaram os índices entre a necessidade de músculos e cérebros humanos. Os fatores *overhead*²⁷ das empresas cresceram no último século de índices modestos de um décimo para a situação atual, onde muitas empresas possuem fatores de despesas de *overhead* entre cinco e oito²⁸. Os gastos de mão-de-obra direta na época em que a contabilidade de custos foi inventada eram cerca de dez vezes maiores que as despesas de *overhead*. Hoje, estão rapidamente se aproximando da época em que serão apenas um décimo da despesa geral de *overhead*.

²⁶ Nota do autor: Provavelmente, a denominação dada a essa fase por Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 393) foi motivada pela publicação do livro “*The Haystack Syndrome: Sifting Information Out of the Data Ocean*”, do Dr. Eliyahu M. Goldratt, em 1990.

²⁷ Tradução livre: Custos indiretos.

²⁸ Nota do autor: Para o Dr. Eliyahu M. Goldratt, a presença dos custos indiretos nos processos de fabricação é muito maior atualmente do que nas décadas passadas, por isso o aumento de 10% para 50%.

Assim, em uma instância maior, essas informações enganosas poderiam causar a implementação de políticas ou práticas incogruentes com o objetivo da organização, pois a teoria por trás da contabilidade de custos é válida para reportar atividades passadas e não proporciona características visando a maximização das saídas do sistema atualmente e no futuro. Com base nesse contexto, o Dr. Eliyahu M. Goldratt focou esforços no desenvolvimento e apresentação de medidas de performance centradas nos processos do sistema, que aumentassem e melhorassem a performance financeira. Comumente denominado de Contabilidade de Ganho, o conjunto de medidas desenvolvidas é constituído das seguintes partes, a saber:

1. **Medidas de performance global:** (a) Lucro Líquido; (b) Retorno Sobre o Investimento - RSI; e (c) Fluxo de Caixa. De acordo com Goldratt (1991, p. 32-33) e Corbett (2005, p. 45), o Lucro Líquido é calculado pela diferença entre o Ganho Total e as Despesas Operacionais Totais, ou seja, $LL = G - DO$ e o Retorno Sobre o Investimento é obtido mediante a divisão da diferença entre o Ganho Total e as Despesas Operacionais Totais pelo Investimento Total, isto é, $RSI = (G - DO) / I$;
2. **Medidas de desempenho no nível produtivo:** (a) nível de produção; (b) inventário²⁹; e (c) gastos operacionais;
3. **Medidas de processos:** (a) ganho diário; (b) inventário diário; e (c) gastos operacionais locais.

²⁹ No contexto da TOC, de acordo com Kee & Schmidt (2000, p. 3), o conceito de inventário compreende a todo o dinheiro investe comprando itens que se espera vender e o conceito de despesas operacionais a todo o dinheiro desembolsado para transformar o inventário em ganho.

É importante destacar que para a filosofia TOC, apesar da redução dos custos ser importante, o seu principal foco é o aumento dos ganhos. Sendo assim, além dessas nove medidas, há também a utilização da relação entre ganho unitário³⁰ do produto, também denominado de *Unit Throughput* - T_u , e consumo unitário da restrição, *Consumed Constraint Units* - CU , que corresponde a um fator³¹ que indica o quanto o produto contribui para o ganho por consumo de recurso gargalo (Souza & Manfrinato, 2007, p. 4).

- d) **A era do livro *It's not luck* - aplicação de Processos de Raciocínio:** Mediante a publicação do livro *It's not luck*, o Dr. Eliyahu M. Goldratt apresentou uma visão sobre problemas complexos não estruturados ou, em outras palavras, expôs os princípios dos Processos de Raciocínio para fazer frente, principalmente, as restrições políticas. Ainda no tocante a esse conceito, de acordo com Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 395), os Processos de Raciocínio são compreendidos como uma estrutura rigorosa e sistêmica de identificação e resolução de problemas gerenciais não estruturados, relacionados com as políticas de gerenciamentos. Corbett (2005, p. 34) complementa essa definição salientando que os Processos de Raciocínio são diagramas lógicos que auxiliam na explicitação de intuições referentes à solução de problemas. De maneira geral, segundo Verma (1997, p. 192) e Köksal (2004, p. 5011), esses processos são propostos com o objetivo de auxiliar os gestores organizacionais a responderem três perguntas que, por sua vez, perfazem qualquer processo gerencial decisório, a saber:

³⁰ Segundo Corbett (2005, p. 57), o ganho unitário corresponde à diferença entre o preço de venda e o custo totalmente variável de um produto.

³¹ Esse fator será visto com maior propriedade no Capítulo 3.

- O que mudar?
- O que fazer para mudar?
- Como promover as mudanças?

Dentro dessa ótica, conforme apontam Rentes & Souza (1997, p. 4) e Corbett (2005, p. 15), os Processos de Raciocínio, mediante sua essência socrática, visto que os principais envolvidos na construção da solução passam a assumir o papel de inventores e, conseqüentemente, defensores da solução obtida, tornam-se capazes de superar certos aspectos fundamentais que, por sua vez, regem atitudes e comportamentos organizacionais, tendo por objetivo a criação de um ambiente favorável às mudanças;

- e) **A era da Corrente Crítica - Gestão de projetos com o auxílio da TOC:** Nessa fase, o Dr. Eliyahu M. Goldratt apresentou como a TOC poderia ser utilizada para programação e controle de projetos. Tais conjuntos de conceitos são frequentemente denominados de *Critical Chain Project Management*³² - *CCPM* e, em termos amplos, têm por foco auxiliar na resolução dos principais conflitos existentes nos projetos ou obter o maior valor financeiro possível dos projetos com o menor desperdício de recursos e com a menor quantidade de trabalhos em processo. Assim, como nos cinco passos de melhoria contínua³³, o principal objetivo na Corrente Crítica é identificar a sequência crítica de tarefas que não permite ao projeto o término antes ou no prazo estipulado e possibilitar a exploração de melhorias como, por exemplo, a remoção de desperdícios ou a criação de pulmões para ela.

³² Tradução livre: Gerenciamento de Projetos pela Corrente Crítica.

³³ Para maiores informações a respeito dos cinco passos de melhoria contínua consulte a página 31.

Além dessas cinco fases ou estágios evolutivos da TOC, para Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 388) há necessidade da criação de um sexto estágio, que é voltado para as aplicações emergentes dos principais conceitos da TOC como, por exemplo, as alterações destacadas por Souza & Pires (2010, pp. 685) na área de logística e, também, na Gestão da Cadeia de Suprimentos. Entretanto, Watson, Blackstone, & Gardiner (2007, p. 388) advogam que a criação desse novo estágio esbarra principalmente na dificuldades de dissiminação da filosofia TOC e, também, na ambiguidade existente em algumas definições apresentadas pelo Dr. Eliyahu M. Goldratt, como, por exemplo, a utilização da terminologia da contabilidade de custos para explicar a Contabilidade de Ganho. Assim, ainda segundo esses autores, como uma indicação para o futuro da TOC, existe a necessidade da *Theory of Constraints International Certification Organization* - TOCICO³⁴ coletar e arquivar, de maneira cumulativa, o corpo de conhecimento da TOC, visando a criação de um dicionário, que assegurasse um vocabulário comum e rigoso e de uma série de testes padronizados para certificar as várias técnicas ou ferramentas criadas utilizando a filosofia TOC.

³⁴ Tradução livre: Organização Internacional de Certificação em Teoria das Restrições. Para maiores informações consulte <http://www.tocico.org/>

2.3 Mix de Produção

O mix de produção é compreendido como um conjunto numérico que contém as quantidades a serem produzidas, considerando aspectos financeiros, econômicos e estratégicos (Onwubolu, 2001, p. 2065; Lea & Fredendall, 2002, pp. 278-279; Bayou & Reinstein, 2005, p. 36). Em um determinado intervalo de tempo, as organizações podem apresentar quantidades insuficientes de recursos produtivos para atender toda a demanda por seus produtos ou precisam apresentar flexibilidade na produção, visando fabricar uma ampla gama de produtos com uma pequena variação nos custos (Bhattacharya, Vasant, Sarkar, & Mukherjee, 2008, p. 790; Wang, Sun, & Yang, 2009, p. 4522). Assim, sua definição é fundamental para a performance do setor produtivo, pois servirá como base para o balanceamento das capacidades produtivas visando a eliminação de desperdícios dessas e o auxílio, de maneira direta, no desempenho da organização. Com base nesse contexto, de maneira mais pormenorizada, conforme Lea (2007, pp. 1189-1190), o problema de definição do mix de produção pode ser assim formulado:

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar} & Z = \sum_{i=1}^n (P_i - c_i)x_i \\ \text{Sujeito a} & \sum_{i=1}^n a_{ji}x_i \leq b_j \quad j = 1, 2, \dots, m \\ & x_i \leq D_i \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

Aonde:

Índices

$i = 1, 2, \dots, n$ representa os produtos.

$j = 1, 2, \dots, m$ representa os recursos.

Dados

Z	corresponde ao ganho total.
P_i	corresponde o preço do produto i .
c_i	corresponde ao custo direto do produto i .
D_i	corresponde a demanda de mercado para o produto i .
b_j	corresponde a capacidade do recurso produtivo j .
x_i	corresponde a quantidades do produto i .
a_{ji}	corresponde ao quantidade de recurso j para produzir o produto i .

Porém, deve ser ressaltado que a definição de mix de produção é influenciada por algumas características gerenciais ou produtivas, a saber: a) sistema de contabilidade gerencial; b) composição ou estrutura do produto; e c) horizonte de planejamento. Para facilitar o entendimento a respeito da importância da definição do mix de produção, um exemplo, denominado de problema P e Q , adaptado de Goldratt (1991, p. 62), é apresentado na Tabela 1.

Produtos	Número do Recurso				Demanda de Mercado	Preço de Venda	Custo da Matéria Prima	Ganho Unitário
	1	2	3	4				
P	15	15	15	20	100	90	45	45
Q	10	30	5	5	50	100	40	60
Capacidade Disponível	2.400	2.400	2.400	2.400				
Capacidade Requerida	2.000	3.000	1.750	2.250				
Diferença	400	-600	650	150				

Tabela 5 – Dados produtivos do problema P e Q .

Fonte: Adaptado de Goldratt (1991, p.62).

Neste problema existem dois produtos, P e Q , demonstrados na linha 1 e 2, que apresentam respectivamente uma demanda de mercado de 100 e 50 unidades. Além disso, o

produto P tem um preço de venda igual a \$90 e um custo da matéria prima de \$45 e o produto Q tem um preço correspondente a \$100 e custo no valor de \$40. Para a fabricação desses produtos há a necessidade do emprego de quatros recursos ou insumos produtivos, com suas capacidades disponíveis apresentadas na linha 3. Consequentemente, caso fosse realizada a produção para atender toda a demanda de mercado, o recurso produtivo 2 não apresentaria capacidade suficiente para atender a produção, pois seriam necessários 3.000 unidades do seu tempo mesmo e tal recurso apresenta disponível somente 2.400. À luz do exposto, e considerando que o principal objetivo nessa situação seja maximizar o lucro, existe a necessidade da definição ou escolha do mix de produção que melhor utilize os recursos produtivos entre todas as opções de combinações possíveis, ou seja, entre as 5.151 possibilidades existentes³⁵.

Entre essas diversas possibilidades, uma das possíveis estratégias seria produzir primeiramente o máximo de unidades do produto com o maior ganho, ou seja, produzir 50 unidades de Q . Assim, sobrariam 900 unidades produtivas do recurso 2 para produzir o máximo de unidades do produto P o que, por sua vez, possibilitaria a produção de 60 unidades deste produto. Tal mix de produção, $50Q + 60P$, resultariam em um ganho total de \$5.850.

A solução ótima para o mix de produção pode ser obtida por meio da aplicação da Programação Linear Inteira – P. L. I.³⁶ Para tal aplicação, as variáveis de decisão são α e β que, por sua vez, correspondem às unidades a serem produzidas dos produtos P e Q , dado que o mix de produção pode ser representado conforme apresentado na Expressão 1, a saber:

$$\alpha P + \beta Q \quad (1)$$

³⁵ Esse valor resulta do número possível de combinações entre os valores das demandas para os dois produtos, acrescida de uma unidade, visto que existe a possibilidade de não se produzir um dado produto como, por exemplo, no mix de produção $100P + 0Q$.

³⁶ Para maiores informações a respeito de P. L. I. veja o capítulo 12 de Hillier & Lieberman (2001, pp. 576-653). Um exemplo da utilização da P. L. I. com auxílio de planilhas eletrônicas é encontrado em Mabin & Gibson (1998, p. 919).

Nesse sentido, a função objetivo é maximizar o ganho total e coeficiente de cada variável na função objetivo corresponde ao ganho por produto. As restrições do modelo correspondem à capacidade produtiva disponível por recurso e a demanda de mercado para cada produto. Com base nesses parâmetros, o problema correspondente do exemplo apresentado pode ser assim representado:

$$\begin{array}{llllll}
 \text{Maximizar:} & 45\alpha & + & 60\beta & & \\
 \text{Sujeito a:} & 15\alpha & + & 10\beta & \leq & 2.400 \\
 & 15\alpha & + & 30\beta & \leq & 2.400 \\
 & 15\alpha & + & 5\beta & \leq & 2.400 \\
 & 20\alpha & + & 5\beta & \leq & 2.400 \\
 & \alpha & & & \leq & 100 \\
 & & & \beta & \leq & 50
 \end{array}$$

Além disso, α e β são variáveis inteiras e não negativas. Por conseguinte, a solução ótima obtida corresponde a $100P + 30Q$ com um ganho total de \$6.300. É importante destacar que o P. L. I. proporciona de maneira rápida o mix de produção ótimo para os problemas de pequeno porte, ou seja, com poucos recursos ou produtos, porém, para problemas de grande porte, essa definição do mix de produção, na maioria das vezes, exige bastante tempo computacional. Com base nesse contexto, para fazer frente a esse tipo de situação, auxiliando os gestores produtivos na definição do mix de produção, a TOC vem sendo empregada.

2.3.1 Definindo o Mix de Produção com Auxílio da TOC

Considerando os dados apresentados na Tabela 5 e os cinco passos de melhoria contínua propostos na TOC, o mix de produção, conforme Goldratt (1991, pp. 70-72), pode ser obtido da seguinte maneira, a saber:

- **Passo 1 – Identificar as restrições do sistema:**

O recurso produtivo 2 é o único que não apresenta uma capacidade produtiva superior ou igual a necessária para atender a demanda, pois tem uma capacidade produtiva de 2.400 que, por sua vez, é inferior a capacidade requerida de 3.000. Com base nesse contexto, o recurso produtivo 2 é a única restrição ou recurso gargalo do sistema;

- **Passo 2 – Decidir como explorar as restrições:**

A única restrição do sistema, isto é, o recurso produtivo 2 deve se explorado com base no índice de ganho unitário por unidade de recurso gargalo consumido. Na Tabela 5, essa taxa é apresentada na terceira coluna.

Produtos	Ganho Unitário	Consumo do Recurso Gargalo	Ganho/Consumo de Recurso Gargalo
<i>P</i>	45	15	3
<i>Q</i>	60	30	2

Tabela 6 – Relação de ganho por consumo de recurso gargalo.

Consequentemente, o produto *P* é o que apresenta o maior valor para o índice de ganho unitário por consumo de recurso o que, por sua vez, demonstra que o

mix de produção deve apresentar o máximo de unidades desse produto. Assim, com a produção de 100 unidades do produto P , o recurso produtivo 2 passa a apresentar somente 900 unidades de capacidade, o que possibilita a produção de 30 unidades do produto Q . Consequentemente, o mix de produção corresponde a $100P + 30Q$ e apresenta um ganho total de \$6.300 o que, por sua vez, é idêntico ao da solução ótima. Cabe destacar, conforme salienta Posnack (1994, p. 85), que no tocante às restrições internas da organização, de acordo com o exposto nesse passo, a TOC visa maximizar o ganho por restrição para, em uma instância maior, maximizar o ganho do sistema.

Conforme destaca Hsu & Chung (1998, p. 37), os demais passos são ações gerenciais baseadas na solução desenvolvida na utilização dos dois primeiros passos. Assim considerando o escopo deste trabalho, para fins de definição de mix de produção, não se faz uso deles. Além disso, é importante destacar que em todo este trabalho, visando apontar os dois pré-requisitos³⁷ considerados na utilização da TOC e, consequentemente, das heurísticas construtivas, o principal propósito da utilização da TOC consiste em auxiliar na maximização do ganho pela otimização do emprego das capacidades produtivas. Para tanto, o segundo pré-requisito, ou seja, a principal medida considerada, foi o ganho total proporcionado pelo mix de produção.

2.3.2 Relacionando o Mix de Produção, a TOC, e o Problema da Mochila

Visando apresentar a relação entre mix de produção, TOC e o problema da mochila, se faz necessário inicialmente apresentar com maior propriedade esse último e,

³⁷ Para maiores informações a respeito dos dois pré-requisitos da TOC consulte a página 33.

consequentemente, as relações com os demais. De acordo com Martello & Toth (1990, p. 1), Pisinger & Toth (1998, p. 302) e Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, pp. 2-3), em sua versão mais simplista o problema da mochila pode ser matematicamente expresso pela definição, representando os objetos 1 até n , de um conjunto de variáveis binárias x_j ($j = 1, \dots, n$), com as características apresentada na Expressão 2:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{se o objeto } j \text{ é selecionado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

Considerando que p_j representa uma característica como, por exemplo, valor ou conforto do objeto j , w_j corresponde ao tamanho desse objeto e c o tamanho da mochila, o problema será selecionar, entre todos os valores binários, os x_j que satisfaçam a restrição demonstrada na Expressão 3.

$$\sum_{j=1}^n w_j x_j \leq c \quad (3)$$

Além disso, a escolha dos x_j deve visar maximizar a função objetivo mostrada na Expressão 4.

$$\sum_{j=1}^n p_j x_j \quad (4)$$

Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, p. 15) sugerem um algoritmo do tipo *greedy* ou guloso³⁸ baseado na seleção de produtos com maiores eficiência (e_j) para encontrar boas soluções. A e_j é calculada com base na Expressão 5, a saber:

$$e_j = \frac{p_j}{w_j} \quad (5)$$

É válido destacar que para a aplicação do algoritmo, todos os x_j devem ser ordenados de maneira decrescente com base em e_j , conforme a Expressão 6.

$$\frac{p_1}{w_1} \geq \frac{p_2}{w_2} \geq \dots \geq \frac{p_n}{w_n} \quad (6)$$

Assim, ainda com base em Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, p. 16), a idéia do algoritmo é iniciar a escolha dos itens com a mochila vazia e, tão logo, ir acrescentando nelas os itens que apresentam maior eficiência, até que se alcance o limite de capacidade da mochila. Na Figura 6 é apresentado o pseudocódigo desse algoritmo.

1.	$\bar{w} \leftarrow 0$	$\bar{w}$ é o peso total da mochila com todos os itens.
2.	$Z^G \leftarrow 0$	Z^G é o ganho com a solução atual.
3.	For $j = 1$ to n do	
4.	If $\bar{w} + w_j \leq c$ then	
5.	$x_j \leftarrow 1$	Colocando o item j na mochila.
6.	$\bar{w} \leftarrow \bar{w} + w_j$	
7.	$Z^G \leftarrow Z^G + p_j$	
8.	Else $x_j \leftarrow 0$	

Figura 6 – Algoritmo *Greedy*.

Fonte: Adaptado de Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, p. 16).

³⁸ De acordo com Cormen, Leiserson, & Rivest (2000, p. 329), um algoritmo do tipo guloso sempre realiza a escolha que lhe pareça a melhor opção naquele momento, ou seja, seleciona o ótimo local visando que a seleção de tais opções proporcionem o ótimo global.

No tocante ao mix de produção, esse algoritmo *Greedy*, considerando que a capacidade da mochila é análoga à capacidade disponível no recurso gargalo; p_j representa o ganho individual do produto j ; e w_j corresponde ao consumo de capacidade do recurso gargalo pelo produto j , apenas indicaria se um produto deve ou não ser produzido, mas seria incapaz de fornecer as quantidades a serem produzidas. Cabe destacar que no que diz respeito à TOC que ela poderia ser utilizada para identificar o recurso gargalo e, conseqüentemente, quais são os valores de e_j , ou seja, da eficiência de cada produto. Assim, há necessidade de se utilizar alguma das diferentes variações existentes do problema da mochila, apontadas por Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, p. 6), para melhor adequar a relação entre o mix de produção e o problema da mochila. Para Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, p. 6), as principais variações do problema original da mochila são:

- *Bounded Knapsack Problem - BKP*: no qual existe b_j cópias idênticas do produto j e b_j é um número pequeno e conhecido;
- *Unbounded Knapsack Problem - UKP*: no qual b_j é muito grande ou há um número infinito de cópias do produto j ;
- *D-dimensional Problem* ou *Multidimensional Knapsack Problem*: no qual existem duas ou mais restrições como, por exemplo, carga e volume máximo a serem observadas;
- *Multiple Knapsack Problem with Identical Capacities - MKP-I*: no qual existem várias mochilas com capacidades idênticas; e
- *Quadratic Knapsack Problem - QKP*: no qual existe interação entre os produtos que estão sendo levados e, conseqüentemente, suas características se alteram.

Considerando essas variações do problema da mochila, a variante *Bounded Knapsack Problem* é a que apresenta maiores similitudes com o problema de decisão de mix de produção, pois há a consideração de cópias dos objetos, no caso da mochila, ou produtos no caso de uma situação de mix de produção. Consequentemente, conforme Pisinger & Toth (1998, p. 382) e Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, p. 185), o problema correspondente ao *Bounded Knapsack Problem* é assim apresentado:

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximizar} && \sum_{j=1}^n p_j x_j \\
 & \text{Sujeito a} && \sum_{j=1}^n w_j x_j \leq c \\
 & && 0 \leq x_j \leq b_j, \quad x_j \text{ é inteiro}, \quad j = 1, \dots, n
 \end{aligned}$$

Para evitar que o problema apresente situações triviais, é assumido que $n \geq 2$, ou seja, que exista no mínimo dois itens a serem escolhidos e, também, que o peso de nenhum item seja superior a capacidade de carga da mochila, conforme destacado na Expressão 7:

$$b_j \leq \left\lfloor \frac{c}{w_j} \right\rfloor \quad (7)$$

Consequentemente, também, é assumido que o peso total de todos os itens deva ser maior que a capacidade da mochila, pois, caso contrário, a solução ótima para esse problema seria levar todos os itens. Tal apontamento é apresentado na Expressão 8.

$$\sum_{j=1}^n w_j b_j \geq c \quad (8)$$

Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, p. 17) destacam que uma abordagem padrão para uma melhor compreensão da estrutura e complexidade de um problema inteiro, ou seja, uma proposta inicial para se estimar a solução inicial é omitir a condição de integralidade do problema. Tal técnica é conhecida como Relaxamento do Problema Linear – RPL e uma das suas principais características é conter a solução para o problema não relaxado, pois o seu conjunto de solução é muito mais amplo, visto que x_j não precisa ser um valor inteiro. A vantagem da utilização do RPL é que, de modo geral, o ótimo global pode ser obtido pela seleção de ótimos locais. Além disso, para esse mesmos autores, se os itens estiverem classificados de maneira decrescente e for identificado o item de parada³⁹, ou seja, o primeiro item que não será selecionado para ir na mochila, comumente representado por s , o conjunto com a solução ótima, ou seja, $x^{RPL} = (x_1^{RPL}, \dots, x_n^{RPL})$, para um RPL é dado por:

$$\begin{aligned} x_j^{RPL} &\leftarrow b_j \quad \text{para } j = 1, \dots, s-1, \\ x_s^{RPL} &\leftarrow \frac{1}{w_s} \left(c - \sum_{j=1}^{s-1} w_j b_j \right), \\ x_j^{RPL} &\leftarrow 0 \quad \text{para } j = s+1, \dots, n. \end{aligned}$$

Considerando essa solução, o algoritmo *Greedy*, apresentado na Figura 6, pode ser adaptado para identificar os itens em um problema *Bounded Knapsack Problem* que serão selecionados. Tal algoritmo é comumente denominado *B-Greedy*, conforme exposto na Figura 7.

³⁹ O item de parada para o problema da mochila é definido por $\sum_{j=1}^{s-1} w_j b_j \leq c$ e $\sum_{j=1}^s w_j b_j > c$.

1.	$\bar{w} \leftarrow 0$	$\bar{w}$ é o peso total da mochila com todos os itens.
2.	$Z^G \leftarrow 0$	Z^G é o ganho com a solução atual.
3.	For $j = 1$ to n do	
4.	If $\bar{w} + w_j \leq c$ then	
5.	$x_j \leftarrow \min\{b_j; [(c - \bar{w})/w_j]\}$	Colocando o item j na mochila.
6.	$\bar{w} \leftarrow \bar{w} + w_j x_j$	
7.	$Z^G \leftarrow Z^G + p_j x_j$	
8.	Else $x_j \leftarrow 0$	

Figura 7 – Algoritmo *B-Greedy*.

Fonte: Adaptado de Kellerer, Pferschy, & Pisinger (2004, p. 187).

O algoritmo *B-Greedy*, empregado para a resolução do *Bounded Knapsack Problem*, pode facilmente ser aplicado na definição do mix de produção, desde que a TOC forneça a informação de qual recurso produtivo é o gargalo dominante ou qual deve orientar a definição de prioridade de processamento dos produtos, ou seja, qual recurso produtivo representará a mochila e, conseqüentemente, poderá ser considerado para se calcular as taxas de eficiências. Considerando a situação de definição do mix de produção apresentada na seção 2.2, e que para essa situação a TOC, inicialmente, identificou que o recurso gargalo é o recurso produtivo 2, a paridade entre os elementos do problema da mochila e o mix de produção é apresentada na Tabela 7.

Problema da Mochila	Mix de Produção	Valores	
j	Produto	P	Q
p_j	Ganho	\$45,00	\$60,00
w_j	Consumo de Recurso Gargalo	15	30
b_j	Demanda	100	50
e_j	Eficiência ⁴⁰	3	2
c	Capacidade Disponível no Gargalo	2.400	

Tabela 7 – Relacionando o mix de produção, a TOC, e o problema da mochila.

Conseqüentemente, o algoritmo *B-Greedy*, exposto na Figura 7, pode ser empregado para definir o mix de produção e, conseqüentemente, o ganho total e o mix de produção obtidos pela utilização do *B-Greedy* são idênticos à solução proporcionada pela aplicação da

⁴⁰ Para o cálculo da eficiência foi utilizada a Expressão 5.

TOC e, também, pelo P. L. I. o que, por sua vez, evidência o relacionamento entre o mix de produção, a TOC e o problema da mochila.

3. Métodos Heurísticos

“[...] o poder de bem aquilatar e diferenciar o verdadeiro do falso, quer dizer, o chamado bom-senso ou razão, é naturalmente igual em todos os homens [...]” – René Descartes (filósofo, físico, e matemático francês, 1596-1650), em Discurso sobre o Método e Princípios de Filosofia.

3.1 Procedimentos de Pesquisa

De acordo com Kothari (2004, p. 1) e Marczyk, DeMatteo, & Festinger (2005, p. 1), a pesquisa pode ser compreendida como um processo que visa responder questões e, também, proporcionar novos conhecimentos por meio de uma busca sistemática por informações pertinentes a respeito de um tópico específico. Para Eco (2006, p. 10), essa especificação da área de pesquisa é um princípio fundamental, pois quando mais se restringe o campo, melhor e com mais segurança se trabalha. Além disso, segundo Sampieri, Collado, & Lucio (2006, p. 14), em termos gerais, no tocante ao seu enfoque, uma pesquisa pode ser classificada em:

- a) Quantitativa: tem como objetivo responder às questões de pesquisa e testar as hipóteses estabelecidas previamente a partir de medição numérica, contagem e, frequentemente, uso de estatística visando estabelecer com exatidão os padrões de comportamento de uma população; e
- b) Qualitativa: visa descobrir e refinar as questões de pesquisa mediante dados coletados sem medição numérica e, conseqüentemente, a aceitação ou refutação de hipóteses; e
- c) Multimodal ou triangulação: é a convergência ou fusão do enfoque quantitativo com o qualitativo.

Com base nesses apontamentos essa pesquisa é de enfoque quantitativo, visto que nela o problema de pesquisa é abordado mediante a mensuração e comparação numérica. De maneira simplificada, o método de pesquisa, isto é, os procedimentos que foram adotados, visam comparar a qualidade das soluções obtidas pela heurística proposta com os resultados obtidos por heurísticas já existentes na literatura, ou seja, a TOC-h e TOC-AK. Nesse sentido, considerando tais apontamentos, na Figura 8 é apresentado o esquema⁴¹ de pesquisa utilizado neste trabalho.

De maneira geral, o esquema apresentado na Figura 8 expõe que a partir do problema de pesquisa e definições apresentadas no capítulo 1 e capítulo 2 são expostas as principais heurísticas para definição de mix de produção, encontrada na literatura, neste capítulo como, também, a heurística proposta e, conseqüentemente, no capítulo 4, todas elas são testadas e comparadas visando identificar o desempenho da heurística proposta.

Para realização de tal propósito se faz necessário apresentar de maneira mais pormenorizada tais heurísticas. Cabe ressaltar que ambas heurísticas, a TOC-h e TOC-AK, são traduções livres para a língua portuguesa, realizadas pelo autor deste trabalho, a partir dos originais publicados em língua inglesa.

⁴¹ De acordo com o Novo Dicionário Eletrônico Aurélio, o termo “esquema” é compreendido como uma figura que representa, não a forma dos objetos, mas as suas relações e funções (Ferreira, 2004).

Figura 8 – Esquema de pesquisa adotado.

3.2 A Heurística TOC-h

A heurística TOC-h, proposta por Fredendall & Lea (1997, p. 1537), procura encontrar entre todos os gargalos existentes o gargalo dominante, ou seja, o primeiro gargalo a não apresentar capacidade suficiente para atender a demanda de mercado. Com base nesse gargalo dominante, uma solução ou um mix de produção inicial é desenvolvido visando à produção dos produtos que apresentem a maior taxa de ganho por consumo do recurso gargalo dominante. Consequentemente, por meio de uma análise dos ganhos proporcionados pelo aumento das quantidades produzidas de determinados produtos, em detrimento da redução das quantidades de outros, uma busca na vizinhança é realizada visando melhorar o ganho total. Essa busca na vizinhança é encerrada caso o ganho total obtido ao longo do processo diminua.

O pseudocódigo da heurística TOC-h é apresentado a seguir:

Passo 1 – Identifique a(s) restrição(s) do sistema:

- a) Calcule a diferença (d_j) entre a capacidade dos recursos e as demandas solicitadas sobre os mesmos:

$$d_j = CP_j - \sum_{i=1}^n t_{ij}D_i \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, m$$

- b) Determine $CR = \{BN_1, BN_2, \dots, BN_q\}$, considerando que $d_q \leq 0$ e $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_q$.

Passo 2 – Decida como explorar a(s) restrição(s):

- a) Assuma que BN_1 é o gargalo dominante. Calcule para cada produto a taxa de R_i , ou seja, a diferença entre o preço de venda e o custo do material direto (CM_i) dividido pelo consumo unitário de BN_1 pelo produto i :

$$R_i = CM_i / t_{i, BN_1}.$$

- b) Verifique se BN_1 é o gargalo dominante:

- Se o número de recursos (q) em CR for igual a um, então o gargalo dominante é BN_1 . Vá para (2c).
- Se o número de recursos em CR é maior que um e todos os produtos utilizam todos os recursos, então a restrição gargalo é BN_1 e os recursos gargalos classificados são $BN_2, BN_3, \dots, BN_q$. Vá para (2c).
- Caso contrário, determine o recurso gargalo da seguinte maneira:
 - i. Sequencie todos os produtos de maneira decrescente⁴² com base em R_i até que uma das seguintes condições seja encontrada:
 - a) A demanda de mercado é encontrada (Ex.: $Q_i = D_i$); e
 - b) No mínimo um dos recursos gargalos não apresenta capacidade suficiente para programação de mais produtos.

⁴² É importante frisar que todos os procedimentos de ordenação utilizados nas heurísticas foram realizados com o auxílio do algoritmo *Quicksort Recursivo*. Para maiores informações a respeito do *Quicksort Recursivo* consulte o Apêndice – A.

- ii. Se o primeiro recurso gargalo a exaurir suas capacidades não for BN_1 , assumo o próximo BN em CR . Assim, o atual BN_1 é atualizado passando a ser BN_2 . A classificação dos outros gargalos é alterada de maneira similar. O R_i para o novo gargalo dominante deve ser recalculado. Vá para o passo (2c).
- c) Sequencie todos os produtos que requerem o gargalo dominante de maneira decrescente com base em R_i . Para cada produto i , sequencie a máxima quantidade possível. Se dois produtos a serem programados apresentarem o mesmo R_i , sequencie primeiro o produto com a maior taxa de CM_i primeiro.
- d) Quando a capacidade do gargalo dominante for exaurida ou insuficiente para produzir outra unidade do produto, então assumo BN_2 como o novo gargalo. Repita os passos (2c) e (2d) até que todos os recursos em CR estejam exauridos, ou os produtos que sobraram não utilizem desses recursos.
- e) Sequencie os produtos “livres”, isto é, aqueles que não utilizam nenhum recurso gargalo até que suas demandas sejam encontradas.
- f) Calcule a sobra de recurso ($t_{left,q}$) no gargalo BN_q da seguinte maneira:

$$t_{left,q} = CP_{BN_q} - \sum_{i=1}^n t_{i,BN_q} Q_i$$

g) Examine se reduzindo uma Q_k e aumentando Q_i (onde $i > k$)⁴³ os ganhos aumentam (Ex.: Examine se existe um *trading-off* na produção de alguns produtos para outros produtos verificando se há aumento nos ganhos). Uma procura na vizinhança é conduzida para determinar quais produtos serão candidatos a essa troca. Nessa busca, o vizinho de um produto (k) é definido como o produto a jusante mais próximo, ou seja, $k + 1$. Considere X como um conjunto de produtos em que se reduzindo algumas quantidades de Q_k e aumentando algumas de Q_i ($i > k$) pode-se aumentar os ganhos. Esse conjunto X é encontrado da seguinte maneira:

i. Para $j = 1$ até q

Para $i = 1$ até $(n - 1)$

Se $t_{i+1, BN_j} > 0$

Então se $\frac{R_{i+1}(t_{left,j} + t_{i, BN_j})}{CM_i} \geq 1$, então vá para (ii)

Caso contrário, $i = i + 1$

Caso contrário, $j = j + 1$

ii. Se $Q_i < D_i$ ou $Q_{i+1} < D_{i+1}$

Então faça $k = i$ e vá para (iii)

Caso contrário, $i = i + 1$ e vá para (i).

iii. $X = \{P_k, P_{k+1}, \dots, P_n\}$ se $X = \emptyset$, o corrente mix de produção é ótimo, então pare. Caso contrário, vá para o passo (2h).

⁴³ Considerando um mix de produção qualquer como, por exemplo, $75A_1 + 80B_2 + 20C_3$, no qual os índices 1, 2, e 3 significam a ordem de produção, ou seja, primeiramente será produzido 75 unidades do produto A, posteriormente 80 unidades de B e, por último, 20 unidades de C e a redução das quantidades a serem produzidas do produto B para aumento das quantidades do produto C, o valor de k corresponderia a 2 e i a 3, por isso que $i > k$.

- iv. Reduza a quantidade atual de Q_k do produto P_k uma unidade por vez. Isso cria $(t_{k,BN_q} + t_{left,q})$ de tempo disponível sobre o recurso gargalo dominante. Utilize esse tempo disponível para processar $P_{k+1}, P_{k+2}, \dots$, e P_n é baseado na sua taxa R_i ($i = k + 1, k + 2, \dots, n$) de maneira decrescente conforme realizado no passo (2c). Calcule o ganho da seguinte maneira:

$$Ganho = \Delta Q_k CM_k + \Delta Q_{k+1} CM_{k+1} + \dots + \Delta Q_n CM_n$$

Aonde ΔQ_k é a variação de unidades para o produto P_k . Pare se o ganho é menor que zero, ou se a solução se tornar inviável (Ex.: $Q_k > D_k$).

3.3 A Heurística TOC-AK

A heurística TOC-AK, proposta por Aryanezhad & Komijan (2004, p. 4227), procura identificar o mix de produção observando todas as possíveis sequências de produção para cada gargalo. Para cumprir tal propósito, a heurística TOC-AK identifica os produtos que apresentam diferentes classificações em meio a todas as sequências de produção por gargalo e realiza uma análise verificando quais produtos e suas respectivas quantidades devem ser produzidas. Em termos amplos, quando comparada com a TOC-h, no tocante aos seus resultados, essa heurística apresenta o comportamento demonstrado na Tabela 8.

Identificação do Gargalo Dominante	Resultados em Comparação a TOC-h
Possível	Inferiores ou iguais
Não é possível	Superiores

Tabela 8 – Comportamento da heurística TOC-AK

O pseudocódigo da heurística TOC-AK é apresentado a seguir:

Passo 1 – Identifique a(s) restrição(s) do sistema:

Calcule a diferença (d_j) entre a capacidade dos recursos e as demandas solicitadas sobre eles:

$$d_j = CP_j - \sum_{i=1}^n t_{ij} D_i \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, m$$

Determine $CR = \{BN_1, BN_2, \dots, BN_q\}$, considerando que $d_q \leq 0$ e $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_q$.

Passo 2 – Determine a prioridade da produção considerando cada gargalo:

Para cada gargalo, calcule R_{i,BN_k} da seguinte maneira:

$$R_{i,BN_k} = \frac{CM_i}{t_{i,BN_k}} \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } k = 1, 2, \dots, q$$

Assim, R_{i,BN_k} representará a prioridade do produto i na perspectiva do gargalo k .

Repita os seguintes procedimentos para cada gargalo para determinar a prioridade dos seus produtos:

1. Classifique os produtos que são processados no gargalo k de maneira decrescente com base em R_{i,BN_k} . Classifique os produtos que apresentarem o mesmo R_{i,BN_k} de maneira decrescente com base em CM_i ;
2. Classifique os produtos que não são processados no gargalo k de maneira decrescente considerando a CM_i . Os produtos que apresentarem o mesmo CM_i devem ser classificados de maneira arbitrária; e
3. Classifique os produtos “livres” no final da lista de maneira decrescente com base em CM_i .

Dessa forma, cada gargalo apresenta uma sequência de produção a ser seguida.

Passo 3 – Desenvolva um plano mestre de produção viável (MPS):

Programe os produtos de acordo com a sequência de produção determinada para BN_1 e o limite de capacidade dos outros gargalos. O processo de considerar a capacidade limite dos outros gargalos é inevitável para se alcançar uma programação de produção viável.

Passo 4 – Determine alternativas viáveis para se aumentar o ganho:

Examine se a redução de uma unidade da produção de um produto e o aumento do outro produto poderá aumentar o ganho. Assuma que X e Y são os produtos candidatos para o processo de diminuição e aumento. A alternativa de se diminuir X e aumentar Y deve ser considerada válida caso as seguintes condições sejam encontradas:

- 1) Se no plano mestre de produção viável (MSP), X tiver prioridade sobre Y ; e
- 2) O produto Y apresentar três condições: (a) sua demanda não foi atendida, (b) apresentar prioridade sobre X em pelo menos uma das sequências, e (c) na mesma sequência em que tiver prioridade sobre X , ele deve ter prioridade a todos os produtos cuja demanda não foi atendida.

Passo 5 – Selecionar a melhor alternativa:

Se não foram desenvolvidas alternativas no Passo 4, a solução obtida no Passo 3 deve ser a ótima. Se uma alternativa foi desenvolvida, vá para o Passo 6. Por outro lado, se houver várias alternativas, identifique a melhor alternativa para alcançar a solução ótima. Para esse propósito, repita os seguintes procedimentos para cada alternativa:

- Considerando o tempo que sobrou nos gargalos, determine quantas unidades⁴⁴ (N) de X deveriam ser reduzidas para aumentar uma unidade de Y . Então, calcule Z da seguinte maneira:

$$Z = \sum_{k=1}^{q \leq m} (-NR_{X, BN_k} + R_{Y, BN_k})$$

Escolher a alternativa com o maior valor de Z e proceda para o Passo 6.

⁴⁴ Notas do autor: O valor de N corresponde ao máximo de unidades do produto Y que podem ser produzidas com a redução de uma unidade de X .

Passo 6 – Defina um conjunto com os produtos que não tiveram a demanda atendida:

Classifique todos os produtos (exceto Y) que não tiveram sua demanda atendida⁴⁵ de maneira decrescente com base em CM_i e dê o nome a esse conjunto de H . Os produtos que apresentarem o mesmo CM_i devem ser classificados de maneira arbitrária.

Passo 7 – Determine o máximo de unidades de X que podem ser reduzidas:

Determine quantas unidades (N) de X poderão ser reduzidas sequencialmente para aumentar uma unidade de Y com base nos seguintes procedimentos:

- Assuma que Y tem prioridade à X na sequência desenvolvida considerando o gargalo k ;
- Calcule $f = R_{Y,BN_k} / R_{X,BN_k}$;
- Determine quantas unidades de X não serão processadas se o gargalo k não processar X por f minutos ($f/t_{X,BN_k}$);
- Determine quantas unidades de Y podem ser processadas por BN_k em um minuto ($1/t_{Y,BN_k}$); e
- Calcule quantas unidades (N_k) de X poderão ser reduzidas sequencialmente para aumentar uma unidade de Y , com base na seguinte expressão $N_k = (f/t_{X,BN_k}) / (1/t_{Y,BN_k})$. Se N_k não for inteiro, arredonde o mesmo para baixo.

⁴⁵ O termo “Demanda atendida” significa que o produto apresenta uma quantidade a ser produzida igual à quantidade demandada no mercado.

Repita os procedimentos acima em todas as sequências cujo Y é prioritário à X . Faça N como o máximo valor obtido de N_k . Observe que, no mínimo, a soma de N será um, desde que pelo menos uma unidade de X deva ser reduzida para aumentar Y . Então, caso N se torna zero, conforme os cálculos acima, ele deve ser ajustado para um.

Passo 8 – Processo de Redução e Aumento:

Reduza uma unidade de X . Examine se o tempo que restou no gargalo possibilita o aumento de Y . Se isso for possível, aumente Y até que alguma dessas situações ocorram:

- A demanda de Y é atendida: nesse caso, ajuste o primeiro membro de H como Y e volte ao Passo 6;
- Não é possível aumentar Y por falta de capacidade: Deve-se examinar a possibilidade de se aumentar o primeiro membro de H . Se sua demanda já foi atendida ou não existir possibilidade de se aumentar as quantidades vá para o próximo membro do grupo e repita esse procedimento para todos os membros de H .

Se isso não for possível, repetir o procedimento 8. Pare se não for possível aumentar Y depois de reduzir N unidades de X .

É importante frisar que a heurística TOC-AK utiliza a variável N em dois passos, no Passo 5 e no Passo 8. Entretanto, apesar de N representar o número de unidades a serem

reduzidas de um produto visando o aumento das quantidades de outro, o cálculo da variável N em cada passo é diferente.

3.4 A Heurística TOC-SN

O novo método heurístico proposto, denominado TOC-SN, também visa à criação de uma solução inicial considerando o gargalo dominante e, conseqüentemente, a sua melhoria da mesma. Esse processo de criação da solução inicial é realizado com o auxílio do algoritmo *B-Greedy* para problemas em que o gargalo dominante for identificado e de uma versão modificada dele, denominada de *B-Greedy-M*, para problemas em que a identificação do gargalo dominante não for possível ou difícil. A utilização do algoritmo *B-Greedy* ou do *B-Greedy-M* possibilita que a heurística TOC-SN encontre uma solução inicial de maneira muito rápida o que, por sua vez, possibilita que ela utilize mais tempo na tentativa de melhorar a solução inicial.

Esse processo de melhoria é realizado mediante uma busca na vizinhança que considere não somente o produto a jusante na sequência do mix de produção, conforme realizado pela heurística TOC-h, mas também outros produtos, em diferentes posições, na sequência de produção. Além disso, também visando à melhoria da solução inicial, é proposta a utilização de uma taxa de ganho que leve em conta o ganho por tempo de processamento do produto i em todos os gargalos existentes de maneira conjunta e não somente no gargalo dominante, pois nem sempre é possível identificar o gargalo dominante. Conseqüentemente, a heurística adota como solução final ou mix de produção a melhor solução encontrada após a realização dessa busca na vizinhança.

Com base nesse contexto se faz necessário apresentar primeiramente o Algoritmo *B-Greedy-M*, para então expor o pseudocódigo da heurística TOC-SN, visto que a conceituação e utilização do *B-Greedy* já foi demonstrada na seção 2.2.2.

3.4.1 O Algoritmo *B-Greedy-M*

Em alguns problemas de definição do mix de produção é difícil ou não é possível identificar o gargalo dominante em meio aos existentes ou, em outras palavras, de maneira mais prática, quando a produção é orientada com base em BN_1 , o BN_2 é o primeiro recurso produtivo a exaurir suas capacidades o que, por sua vez, indica que a produção deve ser orientada com base em BN_2 , porém, quando a produção é orientada com base nesse gargalo, o BN_1 é o primeiro a ficar sem capacidade produtiva.

Essa situação não possibilita a aplicação do *B-Greedy*, visto que ele se baseia nas taxas de eficiências, ou seja, e_j que, por sua vez, é obtida considerando o gargalo dominante. Assim, se faz necessário ajustar o *B-Greedy* para que seja identificado um mix de produção, dada a existência de vários recursos gargalos e a dificuldade de identificação do recurso gargalo dominante. Com base nesse contexto, o algoritmo *B-Greedy-M* considera uma sequência de produção comum em todos os gargalos e busca identificar as quantidades máximas que cada gargalo possibilita produzir para um determinado produto, obedecendo à sequência de produção. Posteriormente, ele assume como quantidade a ser produzida de um determinado produto a menor quantidade encontrada em todos os gargalos. O pseudocódigo do algoritmo *B-Greedy-M* é apresentado na Figura 9.

```

1.  $\overline{w}_q \leftarrow 0$ 
2.  $Z \leftarrow 0$ 
3. For  $i = 1$  to  $n$  do
4.   For  $q = 1$  to  $m$  do
5.     If  $\overline{w}_q + w_{iq} \leq c_q$  then
6.       If  $w_{iq} = 0$  then
7.          $x_{iq} \leftarrow D_i$ 
8.       Else
9.          $x_{iq} \leftarrow \text{int} \left\{ \min \{ D_i; [(c_q - \overline{w}_q)/w_{iq}] \} \right\}$ 
10.      End if
11.    Else
12.       $x_{iq} \leftarrow 0$ 
13.    End If
14.    If  $q = m$  then
15.      For  $q = 1$  to  $m$  do
16.        If  $q = 1$  then
17.           $x_i \leftarrow x_{iq}$ 
18.        Else
19.          If  $x_{iq} < x_i$  then  $x_i \leftarrow x_{iq}$ 
20.        End if
21.      Next  $q$ 
22.      For  $q = 1$  to  $m$  do
23.         $\overline{w}_q \leftarrow \overline{w}_q + w_{iq}x_i$ 
24.      Next  $q$ 
25.       $Z \leftarrow Z + p_i x_i$ 
26.    End if
27.  Next  $q$ 
28. Next  $i$ 

```

Figura 9 – Pseudocódigo do algoritmo *B-Greedy-M*.

Para melhor compreensão do algoritmo *B-Greedy-M*, ele é aplicado ao problema P e Q , apresentado na Tabela 5, adaptado para uma situação em que não é possível ou difícil de se identificar o gargalo dominante conforme exposto na Tabela 9:

Produtos	Número do Recurso				Demanda de Mercado	Preço de Venda	Custo da Matéria Prima	Ganho Unitário
	1	2	3	4				
<i>P</i>	15	15	15	25	100	90	45	45
<i>Q</i>	10	30	5	5	50	100	40	60
Capacidade Disponível	2.400	2.400	2.400	2.400				
Capacidade Requerida	2.000	3.000	1.750	2.750				
Diferença	400	-600	650	-350				

Tabela 9 – Problema *P* e *Q* adaptado com dois gargalos.

Nessa adaptação do problema *P* e *Q* existem dois gargalos, o recurso produtivo 2 e o 4. Considerando o apontamento de Fredendall & Lea (1997, p. 1538) que define o gargalo dominante como o primeiro recurso produtivo exaurir sua capacidade, pode-se concluir que não possível identifica-lo, já que quando o recurso produtivo 2 for considerado o gargalo dominante e a produção for orientada a produzir primeiramente o máximo de unidades do produto⁴⁶ *P*, o recurso produtivo 4 ficará sem capacidade produtiva primeiro que o 2, porém, nos casos que a produção estiver orientada com base no recurso produtivo 4, visando produzir primeiramente o máximo de unidades do produto *Q*, o recurso produto 2 ficará sem capacidade produtiva antes do que o 4.

Com base nesse contexto, o algoritmo *B-Greedy-M* é aplicado considerando que a sequência produtiva seja realizada com base no recurso produtivo 2, visto que a diferença entre sua capacidade disponível e a necessária para satisfazer toda demanda, isto é, 600, é maior que a diferença apresentada pelo recurso produtivo 4, ou seja, 350. Assim, o algoritmo *B-Greedy-M* deve produzir o máximo de unidades de *P* e, posteriormente, de *Q*.

Como resultado, a aplicação do algoritmo *B-Greedy-M* obteve para o problema *P* e *Q* com dois gargalos, exposto na Tabela 9, o mix de produção $96P + 0Q$ com um ganho total de \$4.320,00. De certa forma, o algoritmo *B-Greedy-M* identifica de maneira rápida para cada produto a quantidade máxima a ser produzida observando todos os gargalos existentes com

⁴⁶ Considerando o recurso produtivo 2, o R_P é 3 e R_Q é 2. No tocante ao recurso produtivo 4, o R_P é aproximadamente 1,28 e R_Q é 12.

base em uma sequência de produção qualquer. Contudo, visto que a solução ótima obtida por P. L. I. para esse problema é $88P + 36Q$ com um ganho total na importância de \$6.120,00, o algoritmo *B-Greedy-M* obteve uma boa solução inicial para esse problema, mas não a solução ótima. Consequentemente, a melhoria dessa solução inicial é realizada pelos processos de busca na vizinhança realizada pela heurística TOC-SN. Com base nesse contexto, é importante destacar que tanto a utilização do *B-Greedy* e, principalmente, a do *B-Greedy-M* na identificação, quando possível, do gargalo dominante e, consequentemente, no desenvolvimento de uma solução inicial consiste, conforme destacado na seção *Objetivo Principal da Pesquisa*⁴⁷, no cumprimento de um dos objetivos secundários deste trabalho.

3.4.2 O Pseudocódigo da Heurística TOC-SN

Considerando o algoritmo *B-Greedy* e o *B-Greedy-M*, o pseudocódigo da heurística TOC-SN é apresentado a seguir:

Passo 1 – Identifique a(s) restrições(s) do sistema:

- a) Calcule a diferença (d_j) entre a capacidade dos recursos e as demandas solicitadas sobre eles:

$$d_j = CP_j - \sum_{i=1}^n t_{ij}D_i \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, m$$

- b) Determine $CR = \{BN_1, BN_2, \dots, BN_q\}$, considerando que $d_q \leq 0$ e $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_q$.

⁴⁷ Para maiores informações consulte a página 24.

Passo 2 – Decisão de como explorar a(s) restrições(s) do sistema:

- a) Assumir que BN_1 é o gargalo dominante. Calcule para cada produto a taxa de R_i , ou seja, a margem de contribuição por cada unidade de tempo de processamento consumida no gargalo, pela expressão $R_i = CM_i/t_{i,BN_1}$. Classifique os produtos de maneira decrescente com base no valor R_i obtido.
- b) Verifique se o BN_1 é o gargalo dominante:
- i. Aplique o algoritmo *B-Greedy* ao problema considerando o R_i obtido no *Passo 2a* e a sequência de produção atual.
 - ii. Considerando o mix de produção obtido no *Passo 2b.i*, examine se existe d_j menor do que zero. Caso exista, assuma o próximo BN em CR como BN_1 , classifique os produtos com base nesse novo recurso gargalo e volte para o *Passo 2a*. Se o BN_1 for igual a BN_q e ainda existir d_j menor que zero vá para o *Passo 2b.iii*. Por outro lado, se não existir nenhum d_j menor que zero vá para o *Passo 2c*. Esse procedimento pode ser realizado conforme apresentado na Figura 10.

```

1. For  $j = 1$  to  $m$ 
2.   For  $i = 1$  to  $n$ 
3.      $CN_j \leftarrow CN_j + t_{ij}x_i$ 
4.   Next  $i$ 
5.    $d_j \leftarrow CP_j - CN_j$ 
6.   If  $d_j < 0$  then
7.     If  $j = q$  then
8.       Goto Passo 2b.iii
9.     Else
10.       $q \leftarrow q + 1$ 
11.      Goto Passo 2a.
12.    End If
13.  End if
14. Next  $j$ 
15. Goto Passo 2c

```

Figura 10 – Passo 2.b.ii.

iii. Aplique o algoritmo *B-Greedy-M* considerando a sequência de produção dada por BN_q para obter o mix de produção que não apresente d_j menor que zero.

c) Assumir o ganho total obtido como S_1 .

d) Verifique a possibilidade de melhorar a solução obtida:

i. Identifique na sequência de produção que proporcionou S_1 o último produto com o maior R_i que apresenta a produção igual à demanda, isto é, $x_i = D_i$. Reduza a demanda desse produto, uma unidade por vez⁴⁸, e aplique o *B-Greedy-M* considerando a classificação dos produtos dada por R_i , visando identificar o um novo mix de produção. Realize esse procedimento até que a demanda de i seja igual à zero ou não seja possível aumentar as quantidades a serem produzidas dos demais produtos. Caso

⁴⁸ É importante destacar que a redução da demanda pode ser realizada considerando uma quantidade superior a uma unidade. Contudo, tais quantidades poderiam possibilitar que a TOC-SN não encontrasse boas soluções em problemas aonde apenas a diminuição de uma unidade da demanda possibilitaria uma boa solução.

existam dois produtos com o mesmo valor de R_i , sequeencie o de maior CM_i primeiro. Assumir como S_2 o maior ganho total obtido na realização desse procedimento.

- ii. Calcule o RA_i para todos os produtos da seguinte forma:

$$RA_i = \sum_{g=1}^q CM_i / t_{i,BN_g}$$

Classifique os produtos de maneira decrescente com base no novo RA_i e se existir produtos com o mesmo valor de RA_i , considere primeiramente o que apresentar o maior CM_i . Com base nessa nova classificação aplique o algoritmo *B-Greedy-M*, visando identificar um novo mix de produção inicial. Caso essa nova sequência de produção seja idêntica à sequência anterior vá para o *Passo 2d.iii*. Caso contrário, iniciando a procura do produto com maior RA_i para o menor, identifique o último produto que apresentou $x_i = D_i$. Reduzir a demanda desse produto, uma unidade por vez, e sequeencie a produção com base nessa nova demanda até que ela seja igual à zero ou não seja possível aumentar as quantidades a serem produzidas dos demais produtos. Comparando os resultados obtidos entre o novo mix de produção e os mixes de produção proporcionados pela redução da demanda do produto x_i , assumir o maior ganho total obtido como S_3 .

iii. Considerando o mix de produção obtido na solução S_1 , identifique o produto que apresentar o maior R_i . Reduzir a demanda desse produto, uma unidade por vez, e sequeencie a produção com base nessa nova demanda, utilizando o *B-Greedy-M*. Realize esse procedimento até que a demanda desse produto seja igual à zero ou não seja possível aumentar as quantidades a serem produzidas dos demais produtos. Assuma o maior ganho total encontrado como S_4 .

iv. Se o gargalo dominante for BN_1 , faça S_5 igual a zero e vá para o *Passo 2.e*. Caso contrário, sequeencie os produtos com base no R_i do primeiro gargalo do conjunto CR , ou seja, na maior diferença de capacidade existente. Caso existam produtos com o mesmo valor de R_i , sequeencie o que apresentar maior CM primeiro. Aplique o algoritmo *B-Greedy-M* visando identificar um mix de produção. Com base nele identifique o último produto que apresentar D_i igual a sua produção, diminua uma unidade por vez da demanda desse produto e sequeencie novamente todos os produtos. Realize esse procedimento até que a demanda desse produto seja igual a zero ou não seja possível aumentar as quantidades a serem produzidas dos demais produtos. Comparando os resultados obtidos entre o mix de produção obtido com base em BN_1 e os mixes de produção proporcionados pela redução da demanda do produto x_i , assumir o maior ganho total obtido como S_5 .

e) Assuma como solução final da heurística o mix de produção que apresentar o maior ganho do seguinte conjunto $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$.

Com base na TOC-SN, é válido destacar que os procedimentos realizados nos itens *i* a *iv*, do *Passo 2.d*, compreendem aos três novos modos ou maneiras de se realizar a busca na vizinhança, visando melhorar a solução inicial, apontados na seção *Objetivo Principal da Pesquisa*⁴⁹ deste trabalho.

3.5 Aplicação das Heurísticas: Um Exemplo Numérico

Com o propósito de facilitar o entendimento das três heurísticas apresentadas na seção anterior, se faz necessário demonstrar a sua aplicação a um problema. Sendo assim, o problema apresentado na Tabela 10, denominado de problema *A*, *B*, *C*, e *D*, é proposto. Nele o principal objetivo é definir qual será o mix de produção que proporcione o maior ganho total possível para uma fábrica que produz quatro produtos, *A*, *B*, *C*, e *D* considerando que a sua capacidade produtiva é inferior ao necessário para atender toda a demanda.

Produtos	Número dos Recursos				Demanda de Mercado	Preço de Venda	Custo da Matéria Prima	Ganho Unitário
	1	2	3	4				
<i>A</i>	13	12	18,8	0	80	45	12,7	32,3
<i>B</i>	28	20	14	18	30	60	34	26
<i>C</i>	18	0	16	22	40	60	34	26
<i>D</i>	12	15	16	12	40	90	63	27
Capacidade Disponível	1.950	1.830	2.355	2.400				
Capacidade Requerida	3.080	2.160	3.204	1.900				
Diferença	-1.130	-330	-849	500				

Tabela 10 – Dados produtivos do problema *A*, *B*, *C*, e *D*.

De acordo com os dados expostos na Tabela 10, esse problema apresenta três gargalos produtivos, ou seja, os recursos produtivos 1, 2, e 3 não apresentam capacidades para dar

⁴⁹ Para maiores informações referentes ao objetivo principal da pesquisa consulte a página 24.

suporte a uma produção que possibilite atender a demanda de mercado. Com o objetivo de maximizar o lucro, esse problema pode ser resolvido com o auxílio da P. L. I. com base no seguinte problema correspondente:

$$\begin{array}{rcllclclclcl}
 \text{Maximizar:} & 32,3a & + & 26b & + & 26c & + & 27d & & \\
 \text{Sujeito a:} & 13a & + & 12b & + & 18,8c & + & 0d & \leq & 1.950 \\
 & 28a & + & 20b & + & 14c & + & 18d & \leq & 1.830 \\
 & 18a & + & 0b & + & 16c & + & 22d & \leq & 2.355 \\
 & 12a & + & 15b & + & 16c & + & 12d & \leq & 2.400 \\
 & a & & & & & & & \leq & 80 \\
 & & & b & & & & & \leq & 30 \\
 & & & & & c & & & \leq & 40 \\
 & & & & & & & d & \leq & 40
 \end{array}$$

As variáveis a , b , c , e d representam respectivamente as quantidades a serem produzidas dos produtos A , B , C , e D . É importante frisar que elas devem ser inteiras e não negativas. A solução obtida para esse problema é $79A + 14B + 2C + 40D$ com um ganho total de \$4.047,70. As soluções obtidas pelas heurísticas são apresentadas a seguir.

3.5.1 A Aplicação da Heurística TOC-h

Passo 1 – Identifique a(s) restrição(s) do sistema:

Na Tabela 10 são apresentadas as diferenças entre as capacidades necessárias e as disponíveis. Assim, os recursos produtivos 1, 2, e 3 apresentam capacidades produtivas inferiores à necessária para atender a demanda de mercado. Consequentemente, eles são respectivamente os BN_1 , BN_2 , e BN_3 , isto é, $CR = \{1; 3; 2\}$.

Passo 2 – Decisão de como explorar a(s) restrição(s):

- a) Considerando o recurso produtivo 1 como BN_1 , o R_i ou a prioridade obtida para cada produto é apresentado na Tabela 11.

	Produtos			
	A	B	C	D
R_i	2,48	0,93	1,44	2,25

Tabela 11 – Valores obtidos para os R_i .

Dessa forma, a sequência de produção deverá ser A, D, C , e B .

- b) Verifique se BN_1 é o gargalo dominante:

Existe mais do que um gargalo e nem todos os produtos são processados em todos os gargalos. Assim, a produção é sequenciada com base em BN_1 , conforme apresentada na Tabela 12.

Produtos	Demanda de Mercado	Mix de Produção	R_i	Recurso Produtivo 1 - BN_1		Recurso Produtivo 3 - BN_2		Recurso Produtivo 2 - BN_3	
				Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível	Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível	Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível
<i>A</i>	80	80	2,48	1.040	1.950	1.504	2.355	960	1.830
<i>D</i>	40	40	2,25	480	910	640	851	600	870
<i>C</i>	40	13	1,44	234	430	208	211	0	270
<i>B</i>	30	0	0,93	0	196	0	3	0	270
					196		3		270

Tabela 12 – Primeira verificação do gargalo dominante.

Produtos	Demanda de Mercado	Mix de Produção	R_i	Recurso Produtivo 3 - BN_1		Recurso Produtivo 2 - BN_2		Recurso Produtivo 1 - BN_3	
				Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível	Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível	Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível
<i>B</i>	30	30	1,86	420	2.355	600	1.830	840	1.950
<i>A</i>	80	80	1,72	1.504	1.935	960	1.230	1.040	1.110
<i>D</i>	40	5	1,69	80	431	75	270	60	70
<i>C</i>	40	0	1,63	0	351	0	195	0	10
					351		195		10

Tabela 13 – Segunda verificação do gargalo dominante.

Produtos	Demanda de Mercado	Mix de Produção	R_i	Recurso Produtivo 2 - BN_1		Recurso Produtivo 1 - BN_2		Recurso Produtivo 3 - BN_3	
				Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível	Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível	Capacidade Utilizada	Capacidade Disponível
<i>A</i>	80	80	2,69	960	1.830	1.040	1.950	1.504	2.355
<i>D</i>	40	40	1,80	600	870	480	910	640	851
<i>B</i>	30	13	1,30	260	270	364	430	182	211
<i>C</i>	40	1	0,00	0	10	18	66	16	29
					10		48		13

Tabela 14 – Terceira verificação do gargalo dominante.

No entanto, conforme demonstrado na Tabela 12, o recurso produtivo 1 não é o primeiro recurso a ficar sem capacidade produtiva, pois o recurso produtivo 3 ficou sem capacidade produtiva primeiro do que ele. Assim, o recurso produtivo 3 passa a ser o BN_1 e a produção é sequenciada com base nesse novo gargalo dominante, como apresentado anteriormente na Tabela 13. Entretanto, quando o mix de produção é sequenciado com base na prioridade dada pelo recurso produtivo 3, o recurso produtivo 1 fica sem capacidade produtiva. Assim, o próximo elemento no conjunto CR é adotado como BN_1 , isto é, o recurso produtivo 2. Porém, conforme apresentado na Tabela 14, o recurso produtivo 2 e o recurso produtivo 3 ficaram sem capacidade produtiva. Consequentemente, como não há mais elementos no conjunto CR e o recurso produtivo 2 apresentou uma menor capacidade disponível que o recurso produtivo 3, ele é considerado o gargalo dominante.

- c)* Conforme observado na Tabela 14, a sequência de produção deve ser A, D, B , e C .
- d)* O gargalo dominante é o primeiro a exaurir sua capacidade. Sendo assim, não há capacidade para aumentar a produção de B , pois há necessidade de 20 unidades do BN_1 , entretanto ele apresenta somente 10 unidades.
- e)* O produto C não utiliza o recurso gargalo 2, por isso ele é considerado um produto “livre”. Contudo, visto as quantidades existentes dos recursos gargalos 1 e 3, somente é possível produzir 1 unidade do produto C .

- f) O mix de produção obtido com base no recurso gargalo 2 corresponde a $80A + 40D + 13B + 1C$ com um ganho total de \$4.028,00.
- g) Para se realizar a busca na vizinhança, há a necessidade do desenvolvimento do conjunto X , ou seja, um conjunto com os produtos candidatos a participarem das alterações nas quantidades sequenciadas. Assim, de acordo com os dados apresentados na Tabela 15, o conjunto X corresponde a $\{B, C\}$ e, considerando as quantidades de recursos disponíveis, é interessante diminuir uma unidade do produto D para aumentar uma unidade de B , porém não é válido diminuir uma unidade do produto B para aumentar C , visto que t_{C,BN_1} para esse produto é zero, ou seja, o produto C não utiliza o recurso produtivo 2. Nesse sentido, considerando a solução inicial e que a demanda de D foi completamente atendida, somente a primeira alternativa deve ser utilizada para a busca na vizinhança.

q	i	t_{i+1,BN_1}	$R_{i+1}(t_{left,j} + t_{i,BN_j})/CM_i$
2	D	$t_{B,BN_1} = 12 > 0$	$\frac{R_B(t_{left,j} + t_{D,BN_1})}{CM_D} = \frac{1,3(10 + 15)}{27} > 1$
2	B	$t_{C,BN_1} = 0 = 0$	-

Tabela 15 – Obtendo os valores de X .

- h) Os recursos produtivos 2 e 3 apresentam capacidades para produzir unidades adicionais. Nesse sentido, conforme demonstrado na Tabela 16, a redução de uma unidade de D proporciona o aumento de apenas uma unidade de B , pois o recurso produtivos 2 não apresenta capacidade suficiente, visto que ele apresenta apenas 5 unidades de capacidade enquanto o necessário seriam 20 unidades. O ganho obtido com essa nova solução é de \$4.027,00, ou seja, menor que o ganho inicial. Assim, a procura na vizinhança encerra sua busca, visto que não conseguiu melhorar a solução inicial de $80A + 40D + 13B + 1C$ com o ganho de \$4.028,00.

Solução	Mix de Produção	Capacidade Disponível no			Ganho
		Recurso 2	Recurso 1	Recurso 3	
Inicial	$80A + 40D + 13B + 1C$	10	48	13	\$4.028,00
Primeira busca	$80A + 39D + 14B + 1C$	5	32	15	\$4.027,00

Tabela 16 – Busca na vizinhança.

3.5.2 A Aplicação da Heurística TOC-AK

Passo 1 – Identifique a(s) restrição(s) do sistema:

As capacidades disponíveis e as requeridas são apresentadas na Tabela 10. Os recursos produtivos 1, 3, e 2 são os gargalos que ordenados com base em d_q correspondem ao seguinte $CR = \{1, 3, 2\}$.

Passo 2 – Determine a prioridade da produção considerando cada gargalo:

A prioridade para cada produto em cada recurso gargalos é apresentada na Tabela 17.

Prioridade	Recurso Gargalo 1 – BN_1		Recurso Gargalo 3 – BN_2		Recurso Gargalo 2 – BN_3	
	Produto	R_{i,BN_1}	Produto	R_{i,BN_2}	Produto	R_{i,BN_3}
1º	A	2,48	B	1,86	A	2,69
2º	D	2,25	A	1,72	D	1,80
3º	C	1,44	D	1,69	B	1,30
4º	B	0,93	C	1,63	C	0,00

Tabela 17 – Prioridades por recursos gargalos.

Passo 3 – Desenvolva um plano mestre de produção viável (MPS):

Com base no BN_1 , isto é, o recurso produtivo 1 e no limite de capacidade dos outros recursos gargalos, o mix de produção corresponde a produzir $80A + 40D + 13C + 0B$, conforme apresentado anteriormente na Tabela 12. Cabe destacar que não é possível produzir nenhuma unidade do produto B , pois há necessidade de 14 unidades do recurso produtivo 3, porém ele só apresenta 3 unidades.

Passo 4 – Determine alternativas viáveis para se aumentar o ganho:

Dada a sequência de produção A , D , C , e B o último produto que apresentou sua demanda atendida foi o produto D . Assim, duas opções são possíveis: (a) reduzir as quantidades de D para aumentar C ; e (b) reduzir as quantidades de D para aumentar B . Porém, dessas duas opções apenas a segunda é viável, pois apenas nesta o produto B tem prioridade sobre o produto D , considerando o recurso produtivo 3.

Passo 5 – Selecionar a melhor alternativa:

No *Passo 4* apenas uma alternativa foi desenvolvida. Sendo assim, não é necessário identificar qual é a melhor alternativa entre as existentes, considerando o parâmetro Z .

Passo 6 – Desenvolva um conjunto com os produtos que não tiveram a demanda atendida:

Dois produtos não tiveram suas demandas não atendidas, isto é, o produto C e B , portanto, ambos devem constituir o conjunto H . Entretanto, o produto B corresponde ao produto Y dos Passos 4 e 5 e não pode fazer parte de H . Consequentemente, o conjunto H é composto apenas do produto C , ou seja, $H = \{C\}$.

Passo 7 – Determine o máximo de unidades de X que podem ser reduzidas:

Conforme apresentado nas Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14, o produto B tem prioridade de produção somente quando a produção está orientada com base no recurso produtivo 3. Assim, k é igual a 3 e, consequentemente, o valor de f é:

$$f = R_{Y,BN_K} / R_{X,BN_K}$$

$$f = 1,6875 / 1,8571$$

$$f = 1,1005$$

Esse valor de f significa que o produto D precisa utilizar 1,1005 unidades do recurso produtivo 3 para proporcionar o mesmo ganho que o produto B proporciona com a utilização de 1 unidade do mesmo recurso produtivo. Considerando que 1,1005 unidades do recurso produtivo 3 não sejam utilizadas na fabricação do produto D , não serão produzidas aproximadamente 0,0688 ($f/t_{D,3} = 1,1005/16$) unidades do produto D . Por outro lado, com 1 unidade do recurso produtivo 3 é possível produzir aproximadamente 0,0714 ($1/t_{B,3} = 1/16$) unidade do produto D . Assim, N_3 , ou

seja, o máximo de unidades do produto D que podem ser reduzidas para se aumentar uma unidade do produto B , considerando o recurso produtivo 3, é 0,9630 unidades. Como o valor obtido é inferior a 1 unidade e não existem mais recursos produtivos gargalos nos quais se precise calcular o valor de N , ele é aproximado para 1 unidade.

Passo 8 – Processo de Redução e Aumento:

O mix de produção inicial é $80A + 40D + 13C + 0B$. Se for reduzida uma unidade do produto D e for dada preferência ao produto B em vez C é possível aumentar 14 unidades do produto B e, também, 1 unidade do produto C o que, por sua vez, resultará no mix de produção $80A + 39D + 14B + 1C$ com um ganho de \$4.027,00. Consequentemente, o recurso produtivo 3 apresentará 15 unidades produtivas e o recurso produtivo 2 apresentará 5 unidades. Assim, a redução de mais uma unidade do produto D ainda proporcionará o aumento de mais uma unidade de B , ou seja, o novo mix de produção será $80A + 38D + 15B + 1C$ com um ganho de \$4.026,00, visto a existência de capacidade em ambos os recursos produtivos. Contudo, considerando esse novo mix de produção, o recurso produtivo 3 apresentará 17 unidades produtivas e o recurso produtivo 2 terá 0 unidades. Sendo assim, será necessário diminuir duas unidades do produto D para aumentar uma unidade do produto B o que, por sua vez, não é possível visto que o valor de N é 1, conforme obtido no Passo 7. A heurística se encerra selecionando o mix de produção $80A + 39D + 14B + 1C$ com um ganho de \$4.027,00.

3.5.3 A Aplicação da Heurística TOC-SN

Passo 1 – Identifique a(s) restrições(s) do sistema:

Dadas às capacidades disponíveis e a requeridas apresentadas na Tabela 10, pode-se afirmar que os recursos produtivos 1, 3, e 2 são os gargalos que, ordenados com base em d_q , correspondem ao seguinte $CR = \{1, 3, 2\}$.

Passo 2 – Decisão de como explorar a(s) restrições(s) do sistema:

a) Identificando a sequência de produção considerando BN_1 :

Conforme demonstrado na Tabela 11, a sequência de produção a ser seguida é A , D , C , e B , visto o valor de R_i obtido para cada produto.

b) Verificando se o BN_1 é o gargalo dominante:

O algoritmo *B-Greedy* foi aplicado visando identificar o gargalo dominante. Contudo, não foi possível identificá-lo, pois sempre que a produção era orientada com base em um recurso produtivo, outro apresentava falta de capacidade produtiva. Tal situação é apresentada na Tabela 18.

Mix de Produção	Sequência de Produção	BN_1	Diferenças de Capacidades		
			Recurso Produtivo 1	Recurso Produtivo 3	Recurso Produtivo 2
$80A + 0B + 23C + 40D$	$A, D, C, e B.$	1	16	270	-157
$30B + 80A + 26D + 0C$	$B, A, D, e C.$	3	-242	-120	15
$80A + 40D + 13B + 40C$	$A, D, B, e C.$	2	-654	10	-611

Tabela 18 – Utilização do *B-Greedy*.

Sendo assim, considerando que a produção seja ordenada com base no recurso produtivo 2, visto que ele foi o último valor assumido por BN_1 , o algoritmo *B-Greedy-M* é utilizado visando identificar um mix de produção que proporcione diferenças de capacidades iguais ou maiores que zero. Na Tabela 19 é apresentado o mix de produção obtido com a utilização do *B-Greedy-M* e, também, as diferenças de capacidades disponíveis em cada gargalo.

Mix de Produção	Sequência de Produção	Diferenças de Capacidades		
		Recurso Produtivo 1	Recurso Produtivo 3	Recurso Produtivo 2
$80A + 40D + 13B + 1C$	$A, D, B, e C.$	48	10	13

Tabela 19 – Utilização do *B-Greedy-M*.

c) Assuma o ganho total obtido como S_1 :

A primeira solução obtida para esse problema corresponde ao mix de produção $80A + 40D + 13B + 1C$ com um ganho total de \$4.028,00.

d) Verifique a possibilidade de melhorar a solução obtida:

- i. Considerando o mix de produção $80A + 40D + 13B + 1C$ e a sequência de produção A, D, B e C , o último produto que apresentou a produção igual à demanda foi o produto D . Consequentemente, a demanda desse produto é

reduzida uma unidade e o algoritmo *B-Greedy-M* é utilizado com o objetivo de definir o novo mix de produção, conforme apresentado na Tabela 20.

Redução na Demanda do Produto D	Mix de Produção	Ganho
1	$80A + 39D + 14B + 1C$	\$4.027,00
2	$80A + 38D + 15B + 1C$	\$4.026,00
3	$80A + 37D + 15B + 2C$	\$4.025,00
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
40	$80A + 0D + 30B + 3C$	\$3.442,00

Tabela 20 – Identificando a solução S_2 .

O mix de produção $80A + 39D + 14B + 1C$ apresentou o maior ganho. Consequentemente, o valor de \$4.027,00 é selecionado como S_2 .

- ii. O RA_i para cada produto é apresentado na coluna 4 da Tabela 21.

Produto	Recurso Produtivo 1 R_i	Recurso Produtivo 3 R_i	Recurso Produtivo 2 R_i	RA_i
A	2,48	1,72	2,69	6,89
B	0,93	1,86	1,30	4,09
C	1,44	1,62	0,00	3,07
D	2,25	1,69	1,80	5,74

Tabela 21 – O valor de RA_i .

Com base nesses novos valores de RA_i a nova sequência de produção corresponde a produzir A , D , B , e C que, por sua vez, é idêntica a sequência de atual. Sendo assim, a S_3 é igual à zero.

- iii. Considerando o mix de produção $80A + 40D + 13B + 1C$, obtido com base no recurso produtivo 2, o produto que apresenta o maior valor de R_i é o A . Sendo assim, a sua demanda é reduzida uma unidade por vez e o *B-Greedy-M* é aplicado visando identificar o mix de produção e seu respectivo ganho. Tal procedimento é apresentado na Tabela 22.

Redução na Demanda do Produto A	Mix de Produção	Ganho
1	$79A + 40D + 14B + 2C$	\$4.047,70
2	$78A + 40D + 14B + 3C$	\$4.041,40
3	$77A + 40D + 15B + 4C$	\$4.035,10
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
80	$0A + 40D + 30B + 35C$	\$2.770,00

Tabela 22 – Identificação da solução S_4 .

O mix de produção $79A + 40D + 14B + 2C$ proporciona o maior ganho. Sendo assim, \$4.047,70 é selecionado como S_4 .

- iv. Para esse problema não foi identificado um gargalo dominante. Sendo assim, os produtos são classificados de maneira decrescente com base no R_i calculado considerando o primeiro gargalo do conjunto CR , ou seja, o recurso produtivo 1. Consequentemente, com a utilização do *B-Greedy-M* e considerando a sequência de produção A , D , C , e B , o mix de produção $80A + 40D + 13C + 0B$ é obtido. O produto D é o último produto com a demanda atendida, logo ele é selecionado para que a sua demanda seja reduzida uma unidade por vez e, consequentemente, identificado o mix de produção, conforme apresentado na Tabela 23.

Redução na Demanda do Produto D	Mix de Produção	Ganho
0	$80A + 40D + 13C + 0B$	\$4.002,00
1	$80A + 39D + 14C + 0B$	\$4.001,00
2	$80A + 38D + 15C + 0B$	\$4.000,00
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
40	$80A + 0D + 40C + 6B$	\$3.780,00

Tabela 23 – Identificação da solução S_5 .

A S_5 corresponderá ganho total de \$4.002,00 proporcionado pelo mix de produção $80A + 40D + 13C + 0B$.

- v. A heurística TOC-SN identificou o mix de produção $79A + 40D + 14B + 2C$ com um ganho total de \$4.047,70, isto é, a S_4 como a solução final.

Resumidamente, os resultados, ou seja, os mixes de produção e os ganhos totais obtidos pela utilização da TOC-h, TOC-AK, TOC-SN e da P. L. I. são apresentados na Tabela 24.

Técnica ou Heurística	Ganho Total	Mix de Produção
P. L. I.	\$4.047,70	$79A + 40D + 14B + 2C$
TOC-h	\$4.028,00	$80A + 40D + 13B + 1C$
TOC-AK	\$4.027,00	$80A + 39D + 14B + 1C$
TOC-SN	\$4.047,70	$79A + 40D + 14B + 2C$

Tabela 24 – Soluções obtidas.

Nesse sentido, apesar do problema A , B , C , e D apresentar dificuldade na identificação do gargalo dominante, considerando o ganho total como principal objetivo, a TOC-h apresentou um melhor desempenho do que a TOC-AK, pois, de certa forma, a primeira orientou a prioridade dos produtos com base no recurso produtivo 2 e a segunda determinou a sequência de produção com base no recurso produtivo 1. Entretanto, ambas heurísticas apresentaram um desempenho inferior a TOC-SN que, orientando a sequência de produção com base no recurso produtivo 2 e realizando uma busca na vizinhança diferenciada, apresentou um desempenho idêntico à da P. L. I.. Considerando a TOC-SN, é importante frisar que a obtenção desse ganho só foi possível pela utilização de uma busca na vizinhança, *Passo 2.d.iii*, diferente da utilizada na TOC-h, que prioriza a redução de algumas unidades do produto que apresentar o maior R_i visando aumentar algumas unidades dos demais produtos. Demonstrar e utilizar essa busca na vizinhança, juntamente com as outras realizadas no *Passo*

2, conforme destacado na seção *Objetivo Principal da Pesquisa*⁵⁰, consiste no cumprimento de um dos objetivos secundários deste trabalho.

⁵⁰ Para maiores informações referentes ao objetivo principal da pesquisa consulte a página 24.

4. Experimentação Computacional

“Não devemos admitir mais causas para as coisas naturais do que as que são verdadeiras e suficientes para explicar suas aparências”. – Sir Isaac Newton (Físico e matemático inglês, 1643 a 1727) em Principia - Princípios matemáticos de filosofia natural (Livro III).

4.1 Conjunto de Problemas

Os dados utilizados neste trabalho, referentes aos problemas nos quais as heurísticas e a P. L. I. são utilizadas para definir os mixes de produção e, conseqüentemente, o ganho total, são oriundos de duas fontes: (a) exemplos apresentados em artigos publicados em periódicos ou em livros; e (b) gerados aleatoriamente. Quanto a essa segunda fonte é importante destacar que para tal processo foi utilizada a função *RandBetween*, do software⁵¹ *Microsoft Office Excel*[®], do conjunto de programas *Microsoft Office Standard 2007*[®], versão 12.0.6545.5004 (SP2), observando os seguintes apontamentos a respeito dos valores de:

- **Consumo de recursos pelos produtos:** $\{t_{ij} \in \mathbb{R}^+ \mid 0 \leq t_{ij} \leq 200\}$;
- **Preços de venda:** $\{P_i \in \mathbb{R}^+ \mid 0 < P_i < 100\}$;
- **Custo das matérias primas:** $\{c_i \in \mathbb{R}^+ \mid 0 < c_i < P_i\}$;
- **Demanda de mercado:** $\{D_i \in \mathbb{R}^+ \mid 1 \leq D_i \leq 200\}$; e
- **Capacidade produtiva disponível para cada recurso produtivo:** inicialmente tais valores deveriam ser superiores a capacidade necessária para atender a demanda de mercado. Posteriormente, conforme o número de recursos gargalo em

⁵¹ Essa versão do *Microsoft Office*[®] e, tão logo, do *Microsoft Office Excel*[®] foi selecionada por estar disponível para utilização aos alunos do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia de Produção, da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP, e, principalmente, por estar devidamente licenciada a esse departamento.

cada problema, alguns desses recursos seriam ajustados para apresentar capacidade inferior à necessária para atender a demanda de mercado.

Com base nesses dados, os problemas foram agrupados, conforme o número de produtos, recursos e gargalos em duas classes, denominadas problemas de pequeno e médio porte e problemas de grande porte. De maneira mais pormenorizada, tais classes foram delimitadas conforme apresentado na Tabela 25.

Classes	Produtos		Recursos		Recursos Gargalos		% Recursos Gargalos	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Problemas de pequeno porte e médio porte	2	8	4	8	1	4	25	100
Problemas de grande porte	100	100	60	100	6	100	10	100

Tabela 25 – Classes dos problemas.

Nesse sentido, as três heurísticas e, também, a P. L. I. foram utilizadas na definição do mix de produção para 100 problemas de pequeno e médio porte e 50 problemas de grande porte, visando à obtenção do maior ganho possível. Considerando os parâmetros apresentados na Tabela 25, as características dos problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte são expostas na Tabela 26.

Problema	Produtos (<i>i</i>)	Valores de Recursos (<i>j</i>)	Gargalos (<i>q</i>)	% <i>q</i>	Origem do Problema
1	2	4	1	25,00	Goldratt (1991, p. 62)
2	2	4	1	25,00	Luebbe & Finch (1992, p. 1474)
3	4	4	4	100,00	Luebbe & Finch (1992, p. 1476)
4	4	4	3	75,00	Luebbe & Finch (1992, p. 1477)
5	2	4	1	25,00	Lee & Plenert (1993, p. 52)
6	3	4	1	25,00	Lee & Plenert (1993, p. 54)
7	3	4	1	25,00	
8	3	4	1	25,00	Lee & Plenert (1993, p. 55)
9	3	4	1	25,00	
10	5	4	1	25,00	Patterson (1992, p. 81)
11	3	4	2	50,00	Aleatório
12	3	4	3	75,00	Aleatório
13	3	4	4	100,00	Aleatório
14	3	5	2	40,00	Aleatório
15	3	5	3	60,00	Aleatório
16	3	5	4	80,00	Aleatório
17	3	6	2	33,33	Aleatório
18	3	6	3	50,00	Aleatório
19	3	6	4	66,67	Aleatório
20	3	7	2	28,57	Aleatório
21	3	7	3	42,86	Aleatório
22	3	7	4	57,14	Aleatório
23	3	8	2	25,00	Aleatório
24	3	8	3	37,50	Aleatório
25	3	8	4	50,00	Aleatório
26	4	4	2	50,00	Aleatório
27	4	4	3	75,00	Aleatório
28	4	4	4	100,00	Aleatório
29	4	5	2	40,00	Aleatório
30	4	5	3	60,00	Aleatório
31	4	5	4	80,00	Aleatório
32	4	6	2	33,33	Aleatório
33	4	6	3	50,00	Aleatório
34	4	6	4	66,67	Aleatório
35	4	7	2	28,57	Aleatório
36	4	7	3	42,86	Aleatório
37	4	7	4	57,14	Aleatório
38	4	8	2	25,00	Aleatório
39	4	8	3	37,50	Aleatório
40	4	8	4	50,00	Aleatório
41	5	4	2	50,00	Aleatório
42	5	4	3	75,00	Aryanezhad & Komijan (2004, p. 4222)
43	5	4	4	100,00	
44	5	5	2	40,00	Aleatório
45	5	5	3	60,00	Aleatório
46	5	5	4	80,00	Aleatório
47	5	6	2	33,33	Fredendall & Lea (1997, p. 1540)
48	5	6	3	50,00	
49	5	6	4	66,67	Aleatório
50	5	7	2	28,57	Aleatório

Tabela 26 – Problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte.

De modo semelhante, ainda considerando os parâmetros expostos na Tabela 26, as características dos problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte são apresentadas na Tabela 27.

Problemas	Produtos (<i>i</i>)	Valores de Recursos (<i>j</i>)	Gargalos (<i>q</i>)	% <i>q</i>	Origem do Problema
51	5	7	3	42,86	Aleatório
52	5	7	4	57,14	Aleatório
53	5	8	2	25,00	Aleatório
54	5	8	3	37,50	Aleatório
55	5	8	4	50,00	Aleatório
56	6	4	2	50,00	Aleatório
57	6	4	3	75,00	Aleatório
58	6	4	4	100,00	Aleatório
59	6	5	2	40,00	Aleatório
60	6	5	3	60,00	Aleatório
61	6	5	4	80,00	Aleatório
62	6	6	2	33,33	Aleatório
63	6	6	3	50,00	Aleatório
64	6	6	4	66,67	Aleatório
65	6	7	2	28,57	Aleatório
66	6	7	3	42,86	Aleatório
67	6	7	4	57,14	Aleatório
68	6	8	2	25,00	Aleatório
69	6	8	3	37,50	Aleatório
70	6	8	4	50,00	Aleatório
71	7	4	2	50,00	Aleatório
72	7	4	3	75,00	Aleatório
73	7	4	4	100,00	Aleatório
74	7	5	2	40,00	Aleatório
75	7	5	3	60,00	Aleatório
76	7	5	4	80,00	Aleatório
77	7	6	2	33,33	Aleatório
78	7	6	3	50,00	Aleatório
79	7	6	4	66,67	Aleatório
80	7	7	2	28,57	Aleatório
81	7	7	3	42,86	Aleatório
82	7	7	4	57,14	Aleatório
83	7	8	2	25,00	Aleatório
84	7	8	3	37,50	Aleatório
85	7	8	4	50,00	Aleatório
86	8	4	2	50,00	Aleatório
87	8	4	3	75,00	Aleatório
88	8	4	4	100,00	Aleatório
89	8	5	2	40,00	Aleatório
90	8	5	3	60,00	Aleatório
91	8	5	4	80,00	Aleatório
92	8	6	2	33,33	Aleatório
93	8	6	3	50,00	Aleatório
94	8	6	4	66,67	Aleatório
95	8	7	2	28,57	Aleatório
96	8	7	3	42,86	Aleatório
97	8	7	4	57,14	Aleatório
98	8	8	2	25,00	Aleatório
99	8	8	3	37,50	Aleatório
100	8	8	4	50,00	Aleatório

Tabela 27 – Problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte.

De forma similar, também considerando os parâmetros expostos na Tabela 25, as características dos 50 problemas de grande porte são apresentadas na Tabela 28.

Problemas	Produtos (i)	Valores de Recursos (j)	Gargalos (q)	%q	Origem do Problema
1	100	60	6	10	Aleatório
2	100	60	12	20	Aleatório
3	100	60	18	30	Aleatório
4	100	60	24	40	Aleatório
5	100	60	30	50	Aleatório
6	100	60	36	60	Aleatório
7	100	60	42	70	Aleatório
8	100	60	48	80	Aleatório
9	100	60	54	90	Aleatório
10	100	60	60	100	Aleatório
11	100	70	7	10	Aleatório
12	100	70	14	20	Aleatório
13	100	70	21	30	Aleatório
14	100	70	28	40	Aleatório
15	100	70	35	50	Aleatório
16	100	70	42	60	Aleatório
17	100	70	49	70	Aleatório
18	100	70	56	80	Aleatório
19	100	70	63	90	Aleatório
20	100	70	70	100	Aleatório
21	100	80	8	10	Aleatório
22	100	80	16	20	Aleatório
23	100	80	24	30	Aleatório
24	100	80	32	40	Aleatório
25	100	80	40	50	Aleatório
26	100	80	48	60	Aleatório
27	100	80	56	70	Aleatório
28	100	80	64	80	Aleatório
29	100	80	72	90	Aleatório
30	100	80	80	100	Aleatório
31	100	90	9	10	Aleatório
32	100	90	18	20	Aleatório
33	100	90	27	30	Aleatório
34	100	90	36	40	Aleatório
35	100	90	45	50	Aleatório
36	100	90	54	60	Aleatório
37	100	90	63	70	Aleatório
38	100	90	72	80	Aleatório
39	100	90	81	90	Aleatório
40	100	90	90	100	Aleatório
41	100	100	10	10	Aleatório
42	100	100	20	20	Aleatório
43	100	100	30	30	Aleatório
44	100	100	40	40	Aleatório
45	100	100	50	50	Aleatório
46	100	100	60	60	Aleatório
47	100	100	70	70	Aleatório
48	100	100	80	80	Aleatório
49	100	100	90	90	Aleatório
50	100	100	100	100	Aleatório

Tabela 28 – Problemas de grande porte.

É válido salientar que em ambas as classes, conforme apresentado nas Tabela 26 e Tabela 27, os problemas foram divididos em classes menores, ou seja, nos problemas de pequeno porte, para cada variação no número de produtos existem três problemas com o mesmo número de recursos produtivos que, por sua vez, apresentam de 2 até 4 recursos gargalos. Por outro lado, nos problemas de grande porte, os mesmos foram divididos primeiramente pelo número de recursos produtivos e, posteriormente, pelo percentual de recursos gargalos. Tais subdivisões foram realizadas visando apresentar a capacidade das heurísticas construtivas na definição do mix de produção.

4.2 Software e Hardware

Todas as heurísticas foram implementadas em *Visual Basic for Applications – VBA*⁵², uma adaptação da linguagem *Visual Basic* para os programas que compreendem o *Microsoft Office*[®] como, por exemplo, o *Microsoft Office Excel*[®] visando estender as suas funcionalidades já existentes. A versão utilizada do *Microsoft Office Excel*[®] compreende a já apresentada na seção 4.1. Para tanto, foi desenvolvido e acrescentado na faixa de opções⁵³ um suplemento, ou seja, um conjunto de aplicativos, denominado *Mix de Produção – Vinicius*, que permitisse ao usuário, mediante uma interface gráfica, a utilização de um aplicativo contendo as heurísticas TOC-h, TOC-AK, e TOC-SN. Tal suplemento é exposto na Figura 11.

⁵² Para maiores informações a respeito do VBA consulte os capítulos 1 a 19 de Shepherd (2004).

⁵³ No *Microsoft Office Excel 2007*, a faixa de opções compreende aos menus apresentados na parte superior do programa.

Exemplo utilizado na Tese - Microsoft Excel

Produção com Restrição
Cálculo do Mix de Produção

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2			N°. de Produtos	N°. de Recursos	N°. de Gargalos				
3		Composição	4	4	3				
4		Produtos	1° Recurso	2° Recurso	3° Recurso	4° Recurso	5° Recurso	6° Recurso	7° Recurso
5		A	13	12	18,8	0			
6		B	28	20	14	18			
7		C	18	0	16	22			
8		D	12	15	16	12			
9									
10									
11									
12									
13		Capacidade Disponível	1950	1830	2355	2400			
14		Capacidade Requerida	1760	1545	2352	776	0	0	0
15		Diferença de Capacidade	190	285	3	1624	0	0	0
16		Lucro Obtido:	4001						
17		*Preencher campos em amarelo							
18									
19									
20									

Figura 11 – Suplemento desenvolvido.

Por sua vez, o aplicativo desenvolvido, denominado *Produção com Restrição*, é apresentado na Figura 12.

Definição de Mix de Produção - Versão 1.2

Dados de Entrada

Cadastrar o número de Produtos e Recursos
 Digite ou selecione o número de recurso produtivos utilizados.

 Digite ou selecione o número de produtos fabricados.

Cadastrar o Consumo dos Recursos Produtos pelos Produtos
 Selecione os dados do consumo de recurso pelos produtos na planilha. Considerando que Colunas são os Recursos e as Linhas são os Produtos. Não selecione os rótulos ou informações de texto. Selecione no máximo Oito colunas e Oito linhas.

Cadastrar as informações referentes aos Recursos e Produtos
 Capacidade dos Recursos | Demanda (Unitário) | Preço de Venda (Unitário) | Custo do Produtos (Unitário) | Nome dos Produtos

1° Recurso 5° Recurso
 2° Recurso 6° Recurso
 3° Recurso 7° Recurso
 4° Recurso 8° Recurso

Interface
 Portuguese

Métodos
 Escolha os métodos que serão utilizados para fazer a comparação:
☐ Frendendall e Lea
☐ Sobreiro e Nagano
☐ Aryanezhad e Komijan
☐ Barnard

Resultados
 Selecione a célula onde os resultados serão registrados. Obs.: Selecione apenas uma célula.

Opções
☐ Mostrar a barra de progresso

Ajuda Sair Calcular

Desenvolvido por Vinicius Amorim Sobreiro.

Figura 12 – Aplicativo para definição do mix de produção.

De maneira geral, tal aplicativo possibilita que o usuário selecione os dados numéricos referentes às características do problema diretamente de uma planilha, solicite a definição do mix de produção com base em todas as heurísticas construtivas e registre os resultados obtidos em um determinado local na planilha selecionada pelo usuário. É válido destacar que a utilização desse aplicativo fica restrita aos problemas de pequeno porte, ou seja, problemas com oito produtos e oito recursos. Para os problemas de grande porte, as heurísticas foram utilizadas sem o auxílio da interface gráfica, pois neles há uma necessidade de se cadastrar um grande número de variáveis como, por exemplo, no problema de grande porte número 50, apresentado na Tabela 28, aonde existem 10.000 variáveis referentes ao consumo de recursos produtivos pelos produtos.

Por outro lado, a utilização da P. L. I. foi realizada mediante o aplicativo *Solver*[®], desenvolvido pela *Frontline Systems*⁵⁴ e incorporado desde fevereiro de 1991 ao *Microsoft Office Excel*[®], que, por sua vez, possibilita obter um valor máximo ou mínimo para uma fórmula considerando várias restrições. Para tal realização, de acordo com Fylstra, Lasdon, Watson, & Waren (1998, p. 30), o *Solver*[®] pode utilizar o método *Gradação Reduzida Generalizada - GRG*⁵⁵, o *Simplex*⁵⁶, e o *Branch e Bound*⁵⁷, conforme a opção selecionada pelo usuário. Nesse sentido, considerando que o problema de definição de mix de produção é um problema linear, o *Simplex* foi utilizado para definir os valores de ganhos totais proporcionados pela definição do mix de produção. Consequentemente, visando assegurar exatidão nos resultados obtidos e delimitação do tempo máximo de procura pelo valor máximo de ganho total, o *Solver*[®] foi condicionado, mediante a utilização de suas opções, a não utilizar mais do 24 horas de execução e apresentar uma precisão quanto às restrições e aos números inteiros de 1×10^{-6} . O *Solver*[®] é apresentado na Figura 13.

⁵⁴ Para maiores informações consulte <http://www.solver.com/>.

⁵⁵ Tal método é apresentado em Lasdon, Waren, Jain, & Ratner (1976).

⁵⁶ Para uma discussão ampla a respeito do *Simplex* consulte o capítulo 3 de Dantzig & Thapa (1997) ou o mesmo capítulo em Eiselt & Sandblom (2007).

⁵⁷ Maiores informações a respeito do método *Branch e Bound* poderão ser encontradas na seção 9.3 de Winston (2003).

Figura 13 – Aplicativo *Solver*[®].

No tocante aos aspectos de hardware, todas as heurísticas e a P. L. I. foram simuladas em computador com processador *Intel[®] Pentium[®] Dual T3400*, 2.17 GHz, com 4 GB de memória ram.

4.3 Resultados Obtidos

Visando realizar uma comparação entre as três heurísticas e, posteriormente, da heurística de melhor desempenho com a P. L. I., elas foram comparadas com base no ganho obtido por cada mix de produção e, também, sob o aspecto do tempo de processamento necessário para definição desse mix de produção, visto a necessidade de se obter boas soluções em um razoável tempo de processamento.

Considerando esse contexto, conforme utilizado por Framinan, Nagano, & Moccellini (2010, pp. 1055-1056) em seu trabalho para realizar comparação de desempenho entre diversas heurísticas, o Desvio Relativo Percentual Médio - DRPM foi utilizado para procurar relações de semelhanças ou disparidades entre as heurísticas. Assim, ainda com base nos mesmos autores, o Desvio Relativo Percentual – DRP pode ser obtido conforme apresentado na Expressão 9, a saber:

$$DRP(h) = (f(h) - f^*)/f^* \times 100 \quad (9)$$

Aonde:

$DRP(h)$ representa o Desvio Relativo Percentual da heurística h ;

$f(h)$ representa o valor da função objetivo quando a heurística h é utilizada; e

f^* corresponde ao melhor valor conhecido ou obtido.

Consequentemente, o DRPM consiste na média dos DRP para uma determinada instância ou classe de problemas. Considerando as duas classes de problemas, apresentadas na Tabela 25, os resultados obtidos pelas heurísticas para os problemas de pequeno e médio porte são apresentados na próxima seção.

4.3.1 Problemas de Pequeno e Médio Porte

Para os problemas de pequeno e médio porte, os resultados referentes aos ganhos obtidos pelas heurísticas são aduzidos na Tabela 29 e Tabela 30, considerando o DRP e o DRPM como principal medida de análise de desempenho. Por outro lado, observando o tempo de processamento como parâmetro de comparação, os resultados obtidos são expostos na Tabela 31 e Tabela 32.

Problema	Gargalos (q)	Ganho			DRP		
		TOC-h	TOC-AK	TOC-SN	TOC-h	TOC-AK	TOC-SN
1	1	6.300,00	6.300,00	6.300,00	0,00	0,00	0,00
2	1	6.300,00	6.300,00	6.300,00	0,00	0,00	0,00
3	4	6.600,00	6.588,00	6.600,00	0,00	-0,18	0,00
4	3	9.110,00	9.110,00	9.110,00	0,00	0,00	0,00
5	1	6.300,00	6.300,00	6.300,00	0,00	0,00	0,00
6	1	6.345,00	6.310,00	6.345,00	0,00	-0,55	0,00
7	1	6.444,00	6.420,00	6.444,00	0,00	-0,37	0,00
8	1	6.475,00	6.460,00	6.480,00	-0,08	-0,31	0,00
9	1	6.775,00	6.760,00	6.775,00	0,00	-0,22	0,00
10	1	22.938,00	22.938,00	22.938,00	0,00	0,00	0,00
11	2	8.242,00	8.242,00	8.242,00	0,00	0,00	0,00
12	3	34.324,00	34.323,00	34.324,00	0,00	0,00	0,00
13	4	44.777,00	44.777,00	44.777,00	0,00	0,00	0,00
14	2	332,00	332,00	332,00	0,00	0,00	0,00
15	3	2.216,00	2.216,00	2.216,00	0,00	0,00	0,00
16	4	3.698,17	3.696,54	3.700,65	-0,07	-0,11	0,00
17	2	4.480,00	4.480,00	5.293,00	-15,36	-15,36	0,00
18	3	5.850,00	5.850,00	5.850,00	0,00	0,00	0,00
19	4	1.324,00	2.746,00	2.908,00	-54,47	-5,57	0,00
20	2	2.565,00	2.565,00	2.566,00	-0,04	-0,04	0,00
21	3	6.178,00	4.986,00	6.178,00	0,00	-19,29	0,00
22	4	1.469,00	1.469,00	1.415,00	0,00	0,00	-3,68
23	2	1.500,00	1.510,50	1.510,50	-0,70	0,00	0,00
24	3	10.278,30	10.833,30	10.833,30	-5,12	0,00	0,00
25	4	4.427,00	4.404,00	4.586,00	-3,47	-3,97	0,00
26	2	19.436,70	19.436,70	19.436,70	0,00	0,00	0,00
27	3	5.998,00	6.095,00	6.018,00	-1,59	0,00	-1,26
28	4	6.549,30	6.549,30	6.549,30	0,00	0,00	0,00
29	2	20.553,00	20.553,00	20.553,00	0,00	0,00	0,00
30	3	6.586,40	6.763,40	6.767,40	-2,67	-0,06	0,00
31	4	3.642,10	3.642,10	3.642,10	0,00	0,00	0,00
32	2	9.611,00	9.608,00	9.611,00	0,00	-0,03	0,00
33	3	3.434,90	3.156,00	3.434,90	0,00	-8,12	0,00
34	4	12.076,80	12.076,80	12.076,80	0,00	0,00	0,00
35	2	4.100,30	4.100,30	4.100,30	0,00	0,00	0,00
36	3	3.798,20	3.798,30	3.802,10	-0,10	-0,10	0,00
37	4	9.235,00	9.210,00	9.235,00	0,00	-0,27	0,00
38	2	9.401,20	9.390,80	9.405,20	-0,04	-0,15	0,00
39	3	23.315,40	23.419,40	24.707,40	-5,63	-5,21	0,00
40	4	10.038,00	10.038,00	10.038,00	0,00	0,00	0,00
41	2	4.700,00	4.700,00	4.700,00	0,00	0,00	0,00
42	3	12.090,00	12.160,00	12.160,00	-0,58	0,00	0,00
43	4	14.553,00	14.553,00	14.001,00	0,00	0,00	-3,79
44	2	10.236,00	10.236,00	10.236,00	0,00	0,00	0,00
45	3	21.914,00	21.914,00	22.328,00	-1,85	-1,85	0,00
46	4	28.764,00	27.020,00	27.134,00	0,00	-6,06	-5,67
47	2	2.230,00	2.220,00	2.230,00	0,00	-0,45	0,00
48	3	12.578,92	12.578,92	12.803,24	-1,75	-1,75	0,00
49	4	10.062,10	10.062,10	10.062,10	0,00	0,00	0,00
50	2	10.310,43	10.310,43	10.310,43	0,00	0,00	0,00
Média	-	-	-	-	-1,87	-1,40	-0,29

Tabela 29 – Resultados obtidos para os problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte em termos de DRP.

Problema	Gargalos (q)	Ganho			DRP		
		TOC-h	TOC-AK	TOC-SN	TOC-h	TOC-AK	TOC-SN
51	3	7.418,58	7.393,12	7.418,58	0,00	-0,34	0,00
52	4	5.196,92	5.196,92	6.075,52	-14,46	-14,46	0,00
53	2	6.963,91	6.963,91	6.963,91	0,00	0,00	0,00
54	3	7.812,80	6.736,54	7.812,80	0,00	-13,78	0,00
55	4	6.049,13	6.046,37	6.049,69	-0,01	-0,05	0,00
56	2	17.427,52	17.427,52	17.427,52	0,00	0,00	0,00
57	3	36.674,26	41.104,16	41.104,16	-10,78	0,00	0,00
58	4	17.180,00	17.180,00	17.180,00	0,00	0,00	0,00
59	2	4.774,00	4.750,90	4.776,00	-0,04	-0,53	0,00
60	3	7.188,20	7.186,20	7.188,20	0,00	-0,03	0,00
61	4	28.200,60	28.200,60	28.200,60	0,00	0,00	0,00
62	2	12.962,21	12.962,21	12.962,21	0,00	0,00	0,00
63	3	12.058,11	12.058,11	12.058,11	0,00	0,00	0,00
64	4	25.142,61	42.141,16	40.387,79	-40,34	0,00	-4,16
65	2	21.407,15	21.407,15	21.407,15	0,00	0,00	0,00
66	3	3.773,62	3.934,88	4.152,92	-9,13	-5,25	0,00
67	4	4.643,34	4.246,39	4.283,44	0,00	-8,55	-7,75
68	2	34.444,72	35.612,02	36.714,30	-6,18	-3,00	0,00
69	3	17.109,95	18.970,25	18.538,85	-9,81	0,00	-2,27
70	4	35.222,50	22.078,40	37.823,40	-6,88	-41,63	0,00
71	2	27.703,60	27.703,60	27.703,60	0,00	0,00	0,00
72	3	25.821,10	40.984,30	34.851,40	-37,00	0,00	-14,96
73	4	38.863,20	38.863,20	38.863,20	0,00	0,00	0,00
74	2	14.193,80	13.006,20	14.193,80	0,00	-8,37	0,00
75	3	41.670,60	41.670,60	41.670,60	0,00	0,00	0,00
76	4	37.430,00	37.430,00	37.430,00	0,00	0,00	0,00
77	2	22.105,50	22.105,50	22.105,50	0,00	0,00	0,00
78	3	66.266,50	66.266,50	66.266,50	0,00	0,00	0,00
79	4	4.228,50	4.228,50	12.171,60	-65,26	-65,26	0,00
80	2	53.375,30	53.375,30	54.072,30	-1,29	-1,29	0,00
81	3	32.617,40	32.617,40	32.617,40	0,00	0,00	0,00
82	4	24.620,30	27.160,20	26.912,90	-9,35	0,00	-0,91
83	2	28.926,20	31.579,80	31.579,80	-8,40	0,00	0,00
84	3	34.880,90	38.247,50	39.798,20	-12,36	-3,90	0,00
85	4	37.165,80	30.849,00	37.162,70	0,00	-17,00	-0,01
86	2	32.119,60	32.119,60	32.119,60	0,00	0,00	0,00
87	3	27.894,30	27.885,30	27.897,80	-0,01	-0,04	0,00
88	4	57.732,50	57.732,50	59.177,30	-2,44	-2,44	0,00
89	2	58.044,40	58.044,40	57.903,20	0,00	0,00	-0,24
90	3	20.368,60	17.925,20	19.268,50	0,00	-12,00	-5,40
91	4	26.013,00	25.358,50	33.159,20	-21,55	-23,52	0,00
92	2	30.685,90	30.685,90	30.685,90	0,00	0,00	0,00
93	3	49.292,00	49.285,10	49.285,10	0,00	-0,01	-0,01
94	4	39.745,00	48.542,40	45.183,00	-18,12	0,00	-6,92
95	2	40.473,60	36.519,00	40.473,60	0,00	-9,77	0,00
96	3	45.361,70	44.969,30	45.361,70	0,00	-0,87	0,00
97	4	20.936,00	20.892,20	20.936,00	0,00	-0,21	0,00
98	2	26.094,00	26.094,00	26.094,00	0,00	0,00	0,00
99	3	26.504,40	26.107,20	29.559,80	-10,34	-11,68	0,00
100	4	28.844,60	29.478,40	29.478,40	-2,15	0,00	0,00
Média	-	-	-	-	-5,72	-4,88	-0,85

Tabela 30 – Resultados obtidos para os problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte em termos de DRP.

Problema	Gargalos (q)	Tempo de Processamento		
		TOC-h	TOC-AK	TOC-SN
1	1	00:00:00	00:00:00	00:00:00
2	1	00:00:00	00:00:00	00:00:00
3	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
4	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
5	1	00:00:00	00:00:00	00:00:00
6	1	00:00:00	00:00:00	00:00:00
7	1	00:00:00	00:00:00	00:00:00
8	1	00:00:00	00:00:00	00:00:00
9	1	00:00:00	00:00:00	00:00:00
10	1	00:00:00	00:00:00	00:00:00
11	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
12	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
13	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
14	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
15	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
16	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
17	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
18	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
19	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
20	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
21	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
22	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
23	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
24	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
25	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
26	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
27	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
28	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
29	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
30	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
31	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
32	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
33	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
34	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
35	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
36	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
37	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
38	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
39	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
40	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
41	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
42	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
43	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
44	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
45	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
46	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
47	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
48	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
49	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
50	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
Total	-	00:00:00	00:00:00	00:00:00
Média	-	00:00:00	00:00:00	00:00:00

Tabela 31 – Tempo de processamento para os problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte.

Problema	Gargalos (q)	Tempo de Processamento		
		TOC-h	TOC-AK	TOC-SN
51	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
52	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
53	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
54	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
55	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
56	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
57	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
58	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
59	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
60	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
61	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
62	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
63	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
64	4	00:00:00	00:00:01	00:00:00
65	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
66	3	00:00:01	00:00:00	00:00:00
67	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
68	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
69	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
70	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
71	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
72	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
73	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
74	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
75	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
76	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
77	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
78	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
79	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
80	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
81	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
82	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
83	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
84	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
85	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
86	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
87	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
88	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
89	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
90	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
91	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
92	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
93	3	00:00:00	00:00:00	00:00:01
94	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
95	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
96	3	00:00:00	00:00:00	00:00:01
97	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
98	2	00:00:00	00:00:00	00:00:00
99	3	00:00:00	00:00:00	00:00:00
100	4	00:00:00	00:00:00	00:00:00
Total	-	00:00:01	00:00:01	00:00:02
Média	-	00:00:00	00:00:00	00:00:00

Tabela 32 – Tempo de processamento para os problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 29 e Tabela 30, considerando o DRPM, a heurística TOC-SN apresentou o melhor desempenho em relação à TOC-h e TOC-AK, pois de maneira geral a mesma demonstrou obter melhores soluções ou soluções muito próximas dessas, visto principalmente a sua capacidade de explorar soluções adjacentes em relação à solução inicial. A TOC-AK apresentou um melhor resultado que a TOC-h, visto a sua característica de não identificar o gargalo dominante e de realizar uma análise da ordem de produção dos produtos para cada mix de produção definido com base em cada recurso gargalo existente.

No tocante ao tempo de processamento, todas as heurísticas apresentaram um bom desempenho, visto que na maioria dos casos não foi gasto nem um segundo para resolver os problemas de pequeno e médio porte. Além disso, é válido destacar que a linguagem⁵⁸ utilizada para implementar as heurísticas não possibilita operações com milissegundos, pois sempre arredonda os milissegundos para segundos. Sendo assim, nos problemas de pequeno e médio porte, as diferenças de tempo de processamento não são significativas. Entretanto, para os problemas de pequeno e médio porte, considerando as quantidades de gargalos existentes em cada problema, os resultados apresentados anteriormente podem ser agrupados pelo número de gargalos, visando comparar o desempenho das heurísticas em diferentes instâncias, conforme apresentado na Tabela 33.

Número de Gargalos	Heurísticas		
	TOC-h	TOC-AK	TOC-SN
1	-0,0096 ^A (00:00:00) ^B	-0,1818 (00:00:00)	0,0000 (00:00:00)
2	-1,0684 (00:00:00)	-1,2995 (00:00:00)	-0,0081 (00:00:00)
3	-3,5852 (00:00:01)	-2,7951 (00:00:00)	-0,8518 (00:00:02)
4	-8,5784 (00:00:00)	-6,9134 (00:00:01)	-1,8752 (00:00:00)
Média	-3,3104 (00:00:00)	-2,7975 (00:00:00)	-0,6838 (00:00:01)

Tabela 33 – Resultados agrupados pelo número de gargalos obtidos pelas heurísticas para problemas de pequeno e médio porte em termos de DRPM e tempo de processamento.

^A Desvio Relativo Percentual Médio para os problemas dessa instância.

^B Tempo total para processar todos os problemas dessa instância.

⁵⁸ Para maiores informações sobre software e hardware utilizados neste trabalho consulte a seção 4.2.

No tocante ao DRPM obtidos pelas heurísticas, os mesmos resultados apresentados na Tabela 33 podem também ser apresentados em gráficos, conforme demonstrado na Figura 14.

Figura 14 – Resultados obtidos pelas heurísticas para problemas de pequeno e médio porte em termos de DRPM.

Consequentemente, o tempo total de processamento utilizado por cada heurística para resolver todos os problemas de uma determinada instância para os problemas de pequeno e médio porte são apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Tempo total de processamento utilizado pelas heurísticas em problemas de pequeno e médio porte agrupados pelo número de gargalos.

Com base na Figura 15 é importante destacar que algum problema com três gargalos apresenta uma elevada dificuldade na identificação do gargalo dominante. Assim, tanto a TOC-h quanto a TOC-SN despendem muito tempo na realização de processo. De maneira mais específica, a TOC-h e a TOC-SN realizaram um número de troca de gargalos dominante igual ao número de elementos contidos no conjunto *CR*. Entretanto, após realizar todas essas trocas e perceber que não identificou o gargalo dominante, a TOC-SN aplicou o *B-Greedy-M* com o objetivo de definir um mix de produção como solução inicial, por isso ela utiliza mais tempo que a TOC-h. Por outro lado, como a TOC-AK não visa identificar o gargalo dominante, o tempo de processamento aumenta conforme a existência de um maior número de gargalos, pois ela cria um mix de produção para cada gargalo.

Com base nesses resultados, para os problemas de pequeno e médio porte, a heurística TOC-SN apresentou um melhor resultado que a TOC-h e a TOC-AK. Sendo assim, os resultados obtidos pela heurística TOC-SN são comparados aos da P. L. I., conforme apresentados na Tabela 34 e Tabela 35.

Problema	Gargalos (q)	Ganho		DRP	Tempo de Processamento	
		TOC-SN	P. L. I.	TOC-SN	TOC-SN	P. L. I.
1	1	6.300,00	6.300,00	0,00	00:00:00	00:00:00
2	1	6.300,00	6.300,00	0,00	00:00:00	00:00:00
3	4	6.600,00	6.600,00	0,00	00:00:00	00:00:00
4	3	9.110,00	9.110,00	0,00	00:00:00	00:00:00
5	1	6.300,00	6.300,00	0,00	00:00:00	00:00:00
6	1	6.345,00	6.345,00	0,00	00:00:00	00:00:00
7	1	6.444,00	6.444,00	0,00	00:00:00	00:00:00
8	1	6.480,00	6.480,00	0,00	00:00:00	00:00:00
9	1	6.775,00	6.775,00	0,00	00:00:00	00:00:00
10	1	22.938,00	22.938,00	0,00	00:00:00	00:00:00
11	2	8.242,00	8.242,00	0,00	00:00:00	00:00:00
12	3	34.324,00	34.327,00	-0,01	00:00:00	00:00:01
13	4	44.777,00	44.777,00	0,00	00:00:00	00:00:00
14	2	332,00	332,00	0,00	00:00:00	00:00:00
15	3	2.216,00	2.216,00	0,00	00:00:00	00:00:00
16	4	3.700,65	3.700,65	0,00	00:00:00	00:00:00
17	2	5.293,00	5.293,00	0,00	00:00:00	00:00:00
18	3	5.850,00	5.850,00	0,00	00:00:00	00:00:00
19	4	2.908,00	2.970,00	-2,09	00:00:00	00:00:00
20	2	2.566,00	2.566,00	0,00	00:00:00	00:00:01
21	3	6.178,00	6.178,00	0,00	00:00:00	00:00:00
22	4	1.415,00	1.537,00	-7,94	00:00:00	00:00:00
23	2	1.510,50	1.510,50	0,00	00:00:00	00:00:01
24	3	10.833,30	10.833,30	0,00	00:00:00	00:00:00
25	4	4.586,00	4.586,00	0,00	00:00:00	00:00:00
26	2	19.436,70	19.436,70	0,00	00:00:00	00:00:01
27	3	6.018,00	6.095,00	-1,26	00:00:00	00:00:00
28	4	6.549,30	6.549,30	0,00	00:00:00	00:00:00
29	2	20.553,00	20.553,00	0,00	00:00:00	00:00:01
30	3	6.767,40	6.779,40	-0,18	00:00:00	00:00:00
31	4	3.642,10	3.642,10	0,00	00:00:00	00:00:00
32	2	9.611,00	9.611,00	0,00	00:00:00	00:00:01
33	3	3.434,90	4.113,90	-16,51	00:00:00	00:00:00
34	4	12.076,80	12.076,80	0,00	00:00:00	00:00:00
35	2	4.100,30	4.100,30	0,00	00:00:00	00:00:00
36	3	3.802,10	3.802,10	0,00	00:00:00	00:00:00
37	4	9.235,00	9.235,00	0,00	00:00:00	00:00:00
38	2	9.405,20	9.405,20	0,00	00:00:00	00:00:01
39	3	24.707,40	24.883,40	-0,71	00:00:00	00:00:00
40	4	10.038,00	10.038,00	0,00	00:00:00	00:00:00
41	2	4.700,00	4.700,00	0,00	00:00:00	00:00:01
42	3	12.160,00	12.160,00	0,00	00:00:00	00:00:00
43	4	14.001,00	14.553,00	-3,79	00:00:00	00:00:00
44	2	10.236,00	10.236,00	0,00	00:00:00	00:00:01
45	3	22.328,00	22.341,00	-0,06	00:00:00	00:00:00
46	4	27.134,00	36.949,00	-26,56	00:00:00	00:00:00
47	2	2.230,00	2.230,00	0,00	00:00:00	00:00:01
48	3	12.803,24	13.270,18	-3,52	00:00:00	00:00:00
49	4	10.062,10	10.062,10	0,00	00:00:00	00:00:00
50	2	10.310,43	10.315,53	-0,05	00:00:00	00:00:01
Total	-	493.665,42	505.648,46	-	00:00:00	00:00:11
Média	-	-	-	-1,25	00:00:00	00:00:00

Tabela 34 – Comparação do desempenho da TOC-SN com a P. L. I. para os problemas 1 a 50 de pequeno e médio porte.

Problema	Gargalos (q)	Ganho		DRP	Tempo de Processamento	
		TOC-SN	P. L. I.	TOC-SN	TOC-SN	P. L. I.
51	3	7.418,58	8.819,38	-15,88	00:00:00	00:00:00
52	4	6.075,52	6.507,02	-6,63	00:00:00	00:00:00
53	2	6.963,91	6.963,91	0,00	00:00:00	00:00:00
54	3	7.812,80	7.812,80	0,00	00:00:00	00:00:00
55	4	6.049,69	6.049,69	0,00	00:00:00	00:00:00
56	2	17.427,52	17.427,52	0,00	00:00:00	00:00:00
57	3	41.104,16	41.104,16	0,00	00:00:00	00:00:00
58	4	17.180,00	17.180,00	0,00	00:00:00	00:00:00
59	2	4.776,00	4.776,00	0,00	00:00:00	00:00:00
60	3	7.188,20	7.188,20	0,00	00:00:00	00:00:00
61	4	28.200,60	28.200,60	0,00	00:00:00	00:00:00
62	2	12.962,21	12.962,21	0,00	00:00:00	00:00:00
63	3	12.058,11	12.058,11	0,00	00:00:00	00:00:00
64	4	40.387,79	42.147,13	-4,17	00:00:00	00:00:01
65	2	21.407,15	21.407,15	0,00	00:00:00	00:00:00
66	3	4.152,92	4.411,07	-5,85	00:00:00	00:00:01
67	4	4.283,44	6.970,37	-38,55	00:00:00	00:00:00
68	2	36.714,30	37.012,44	-0,81	00:00:00	00:00:00
69	3	18.538,85	18.982,05	-2,33	00:00:00	00:00:00
70	4	37.823,40	37.823,40	0,00	00:00:00	00:00:00
71	2	27.703,60	27.703,60	0,00	00:00:00	00:00:00
72	3	34.851,40	44.503,40	-21,69	00:00:00	00:00:00
73	4	38.863,20	38.868,20	-0,01	00:00:00	00:00:01
74	2	14.193,80	14.193,80	0,00	00:00:00	00:00:00
75	3	41.670,60	41.670,60	0,00	00:00:00	00:00:01
76	4	37.430,00	38.071,80	-1,69	00:00:00	00:00:00
77	2	22.105,50	22.105,50	0,00	00:00:00	00:00:00
78	3	66.266,50	66.266,50	0,00	00:00:00	00:00:01
79	4	12.171,60	12.608,10	-3,46	00:00:00	00:00:00
80	2	54.072,30	54.072,30	0,00	00:00:00	00:00:00
81	3	32.617,40	32.617,40	0,00	00:00:00	00:00:00
82	4	26.912,90	27.201,10	-1,06	00:00:00	00:00:00
83	2	31.579,80	34.777,00	-9,19	00:00:00	00:00:01
84	3	39.798,20	39.798,20	0,00	00:00:00	00:00:00
85	4	37.162,70	37.165,80	-0,01	00:00:00	00:00:00
86	2	32.119,60	32.119,60	0,00	00:00:00	00:00:01
87	3	27.897,80	27.899,20	-0,01	00:00:00	00:00:00
88	4	59.177,30	59.184,90	-0,01	00:00:00	00:00:01
89	2	57.903,20	58.044,40	-0,24	00:00:00	00:00:00
90	3	19.268,50	20.374,60	-5,43	00:00:00	00:00:00
91	4	33.159,20	36.884,30	-10,10	00:00:00	00:00:00
92	2	30.685,90	30.685,90	0,00	00:00:00	00:00:00
93	3	49.285,10	49.294,30	-0,02	00:00:01	00:00:01
94	4	45.183,00	51.051,80	-11,50	00:00:00	00:00:00
95	2	40.473,60	42.059,80	-3,77	00:00:00	00:00:01
96	3	45.361,70	45.361,70	0,00	00:00:01	00:00:00
97	4	20.936,00	20.936,00	0,00	00:00:00	00:00:01
98	2	26.094,00	26.094,00	0,00	00:00:00	00:00:00
99	3	29.559,80	30.763,00	-3,91	00:00:00	00:00:00
100	4	29.478,40	29.564,90	-0,29	00:00:00	00:00:00
Total	-	1.402.507,75	1.437.744,91	-	00:00:02	00:00:11
Média	-	-	-	-2,93	00:00:00	00:00:00

Tabela 35 – Comparação do desempenho da TOC-SN com a P. L. I. para os problemas 51 a 100 de pequeno e médio porte.

Além disso, considerando que os problemas estejam agrupados pelos números de gargalos, os resultados do DRPM da TOC-SN em relação à P. L. I. são apresentados na Tabela 36, a saber:

Número de Gargalos	DRPM	Tempo de Processamento	
	TOC-SN	TOC-SN	P. L. I.
1	0,0000 ^A	00:00:00 ^B	00:00:00 ^B
2	-0,4688	00:00:00	00:00:13
3	-2,4955	00:00:02	00:00:05
4	-3,8021	00:00:00	00:00:04
Total	-	00:00:02	00:00:22
Média	-1,6916	00:00:01	00:00:11

Tabela 36 – Resultados obtidos pela TOC-SN em comparação à P. L. I. para problemas de pequeno e médio porte em termos de DRPM e tempo de processamento.

^A Desvio Relativo Percentual Médio para os problemas dessa instância.

^B Tempo total para processar todos os problemas dessa instância.

De acordo com os resultados demonstrado na Tabela 36, para problemas de pequeno e médio porte, a TOC-SN apresentou um bom desempenho em relação à P. L. I., pois conseguiu reduzir o tempo de processamento em aproximadamente 90,91%, enquanto, em média, ocorreu uma perda na qualidade da solução de aproximadamente 1,69%. É importante destacar que com o aumento do número de gargalos houve uma redução mais expressiva na qualidade da solução, embora o tempo de processamento não tenha apresentado a mesma tendência, pois os problemas apresentaram maior dificuldade, conforme apresentados na Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 – Resultados obtidos pela TOC-SN em comparação à P. L. I. para problemas de pequeno e médio porte em termos de DRPM agrupados pelo número de gargalos.

Figura 17 – Tempo total de processamento utilizado pela TOC-SN e P. L. I. em problemas de pequeno e médio porte agrupados pelo número de gargalos.

Ainda no tocante ao desempenho da TOC-SN, Linhares (2009, p. 128) aponta que um dos principais problemas ou falhas das heurísticas desenvolvidas para os problemas de definição de mix de produção, apesar de sua eficiência na solução de problemas mais complexos, é a dificuldade de obtenção das soluções ótimas para problemas com apenas um gargalo. Entretanto, conforme exposto na Tabela 36, Figura 16 e Figura 17, a TOC-SN não apresentou essa dificuldade, pois conseguiu encontrar todas as soluções ótimas para esses problemas mais simples.

Considerando as duas classes de problemas, apresentadas na Tabela 25, os resultados obtidos pelas heurísticas para os problemas de grande porte são apresentados na próxima seção.

4.3.2 Problemas de Grande Porte

Os resultados referentes aos ganhos obtidos pelas heurísticas são expostos na Tabela 37, para os problemas de grande porte, considerando o DRP e o DRPM como principal medida de análise de desempenho. Em contrapartida, considerando o tempo de processamento como parâmetro de comparação, os resultados obtidos são expostos na Tabela 38.

Problema	%q	Ganho			DRP		
		TOC-h	TOC-AK	TOC-SN	TOC-h	TOC-AK	TOC-SN
1	10	94.218,20	202.064,35	188.191,16	-53,37	0,00	-6,87
2	20	501.493,89	574.321,04	571.514,12	-12,68	0,00	-0,49
3	30	358.270,02	548.733,64	518.530,39	-34,71	0,00	-5,50
4	40	429.664,44	497.068,39	636.782,03	-32,53	-21,94	0,00
5	50	428.510,08	608.827,79	612.871,85	-30,08	-0,66	0,00
6	60	487.744,96	522.818,26	552.138,86	-11,66	-5,31	0,00
7	70	519.832,43	544.442,05	647.786,84	-19,75	-15,95	0,00
8	80	573.769,35	473.566,80	675.160,87	-15,02	-29,86	0,00
9	90	376.692,65	433.463,26	511.109,09	-26,30	-15,19	0,00
10	100	347.043,66	641.380,92	714.558,19	-51,43	-10,24	0,00
11	10	235.997,45	384.476,38	363.136,78	-38,62	0,00	-5,55
12	20	640.501,34	564.810,87	659.256,36	-2,84	-14,33	0,00
13	30	482.448,33	385.205,08	483.756,05	-0,27	-20,37	0,00
14	40	381.380,17	431.960,60	467.162,24	-18,36	-7,54	0,00
15	50	459.927,40	570.362,80	579.229,19	-20,60	-1,53	0,00
16	60	429.259,08	404.330,97	580.703,49	-26,08	-30,37	0,00
17	70	240.633,26	338.380,26	351.296,64	-31,50	-3,68	0,00
18	80	543.940,54	516.529,88	544.161,23	-0,04	-5,08	0,00
19	90	297.635,98	399.026,15	457.087,16	-34,88	-12,70	0,00
20	100	491.860,17	374.905,60	557.356,07	-11,75	-32,73	0,00
21	10	71.946,44	137.179,57	142.990,44	-49,68	-4,06	0,00
22	20	373.110,01	490.465,16	426.927,42	-23,93	0,00	-12,95
23	30	313.679,69	344.652,44	361.044,36	-13,12	-4,54	0,00
24	40	538.371,13	574.098,17	670.437,52	-19,70	-14,37	0,00
25	50	361.619,76	397.807,47	491.809,30	-26,47	-19,11	0,00
26	60	378.526,56	513.131,76	518.359,08	-26,98	-1,01	0,00
27	70	269.801,29	298.015,92	350.629,45	-23,05	-15,01	0,00
28	80	299.638,87	464.805,11	489.914,26	-38,84	-5,13	0,00
29	90	469.581,55	467.013,42	572.213,07	-17,94	-18,38	0,00
30	100	305.033,14	286.245,10	309.719,46	-1,51	-7,58	0,00
31	10	653.452,28	720.431,53	699.458,66	-9,30	0,00	-2,91
32	20	271.245,83	354.126,39	356.866,82	-23,99	-0,77	0,00
33	30	455.053,03	623.408,69	638.347,70	-28,71	-2,34	0,00
34	40	493.976,89	526.317,01	616.434,71	-19,87	-14,62	0,00
35	50	412.896,96	494.475,17	425.977,71	-16,50	0,00	-13,85
36	60	636.718,57	703.151,84	702.772,82	-9,45	0,00	-0,05
37	70	446.820,44	444.211,02	506.348,77	-11,76	-12,27	0,00
38	80	461.186,90	472.557,97	614.634,18	-24,97	-23,12	0,00
39	90	480.270,53	527.766,08	641.789,92	-25,17	-17,77	0,00
40	100	335.222,58	582.476,27	563.349,53	-42,45	0,00	-3,28
41	10	400.962,06	418.292,81	436.897,37	-8,23	-4,26	0,00
42	20	272.742,58	239.518,72	321.895,74	-15,27	-25,59	0,00
43	30	389.870,02	433.000,69	527.390,41	-26,08	-17,90	0,00
44	40	257.256,23	248.803,51	280.820,63	-8,39	-11,40	0,00
45	50	426.534,61	478.343,30	490.263,14	-13,00	-2,43	0,00
46	60	256.877,50	248.490,97	324.594,22	-20,86	-23,45	0,00
47	70	231.837,18	219.500,55	247.626,72	-6,38	-11,36	0,00
48	80	659.077,50	662.904,02	682.292,57	-3,40	-2,84	0,00
49	90	467.829,30	597.880,30	674.054,82	-30,59	-11,30	0,00
50	100	495.293,34	539.309,78	646.238,89	-23,36	-16,55	0,00
Média	-	-	-	-	-21,63	-10,29	-1,03

Tabela 37 – Resultados obtidos para os problemas 1 a 50 de grande porte em termos de DRP.

Problema	%q	Tempo de Processamento		
		TOC-h	TOC-AK	TOC-SN
1	10	00:00:00	00:00:01	00:00:01
2	20	00:00:01	00:00:05	00:00:01
3	30	00:00:18	00:00:08	00:00:03
4	40	00:00:02	00:00:12	00:00:04
5	50	00:00:03	00:00:46	00:00:05
6	60	00:00:05	00:00:16	00:00:06
7	70	00:00:06	00:00:19	00:00:07
8	80	00:00:09	00:00:20	00:00:08
9	90	00:00:10	00:00:26	00:00:06
10	100	00:00:13	00:00:29	00:00:07
11	10	00:00:00	00:00:03	00:00:01
12	20	00:00:01	00:00:15	00:00:03
13	30	00:00:02	00:00:06	00:00:03
14	40	00:00:03	00:00:13	00:00:04
15	50	00:00:05	00:00:47	00:00:04
16	60	00:00:06	00:00:17	00:00:03
17	70	00:00:08	00:01:17	00:00:06
18	80	00:00:11	00:00:22	00:00:04
19	90	00:00:14	00:00:32	00:00:11
20	100	00:00:15	00:00:32	00:00:07
21	10	00:00:00	00:00:03	00:00:01
22	20	00:00:01	00:00:21	00:00:03
23	30	00:00:02	00:00:10	00:00:02
24	40	00:00:24	00:00:28	00:00:05
25	50	00:00:05	00:00:15	00:00:04
26	60	00:01:01	00:00:18	00:00:05
27	70	00:00:11	00:00:28	00:00:06
28	80	00:00:14	00:00:39	00:00:10
29	90	00:00:18	00:00:39	00:00:14
30	100	00:00:23	00:00:46	00:00:11
31	10	00:00:01	00:00:19	00:00:02
32	20	00:00:01	00:00:12	00:00:03
33	30	00:00:03	00:00:09	00:00:05
34	40	00:00:05	00:00:13	00:00:04
35	50	00:00:05	00:00:12	00:00:04
36	60	00:00:11	00:00:25	00:00:08
37	70	00:00:14	00:00:29	00:00:04
38	80	00:00:19	00:00:38	00:00:13
39	90	00:00:25	00:00:46	00:00:11
40	100	00:00:26	00:00:51	00:00:19
41	10	00:00:00	00:00:03	00:00:01
42	20	00:00:01	00:00:05	00:00:03
43	30	00:00:04	00:00:11	00:00:03
44	40	00:00:06	00:00:15	00:00:07
45	50	00:00:09	00:00:20	00:00:06
46	60	00:00:11	00:00:33	00:00:07
47	70	00:00:16	00:00:32	00:00:13
48	80	00:01:06	00:01:44	00:00:16
49	90	00:00:29	00:02:02	00:00:17
50	100	00:00:39	00:01:03	00:00:18
Total	-	00:09:42	00:22:35	00:05:19
Média	-	00:00:12	00:00:27	00:00:06

Tabela 38 – Tempo de processamento para os problemas 1 a 50 de grande porte.

Da mesma maneira que nos problemas de pequeno e médio porte, a TOC-SN apresentou um melhor desempenho que a TOC-h e a TOC-AK, tanto no que diz respeito ao DRPM e ao tempo de processamento utilizado, pois a mesma conseguiu apresentar os melhores resultados na maioria dos problemas utilizando um menor tempo de processamento. Essa tendência fica mais evidente quando os problemas de grande porte estão agrupados pelo percentual de gargalos, conforme apresentado na Tabela 39.

% de Gargalos	Heurísticas		
	TOC-h	TOC-AK	TOC-SN
10	-31,8395 ^A (00:00:01) ^B	-1,6644 (00:00:29)	-3,0654 (00:00:06)
20	-2,6682 (00:00:05)	-0,0814 (00:00:58)	-0,1237 (00:00:13)
30	-7,0783 (00:00:29)	-0,0903 (00:00:44)	-1,1008 (00:00:16)
40	-19,7687 (00:00:40)	-13,9732 (00:01:21)	0,0000 (00:00:24)
50	-21,3293 (00:00:27)	-4,7471 (00:02:20)	-2,7705 (00:00:23)
60	-19,0056 (00:01:34)	-12,0273 (00:01:49)	-0,0108 (00:00:29)
70	-18,4878 (00:00:55)	-11,6532 (00:03:05)	0,0000 (00:00:36)
80	-16,4529 (00:01:59)	-13,2038 (00:03:43)	0,0000 (00:00:51)
90	-26,9762 (00:01:36)	-15,0692 (00:04:25)	0,0000 (00:00:59)
100	-26,1006 (00:01:56)	-13,4203 (00:03:41)	-0,6567 (00:01:02)
Média	-18,9707 (00:00:58)	-8,5930 (00:02:15)	-0,7728 (00:00:32)

Tabela 39 – Resultados agrupados por percentual de gargalos obtidos pelas heurísticas para problemas de grande porte em termos de DRPM e tempo de processamento.

^A Desvio Relativo Percentual Médio para os problemas dessa instância.

^B Tempo total para processar todos os problemas dessa instância.

Considerando os resultados expostos na Tabela 39, a heurística TOC-AK apresentou um resultado melhor do que a heurística TOC-h, em termos de DRPM. Contudo, tal melhoria é resultante da utilização de uma quantidade maior do tempo de processamento. As Figura 18 e Figura 19 são representativas desses apontamentos.

Figura 18 – Resultados obtidos pelas heurísticas para problemas de grande porte em termos de DRPM.

Tendo em conta os resultados, em termos de DRPM, das heurísticas para os problemas de grande porte indicados na Figura 18, a TOC-SN apresenta um padrão de constância no DRPM, apesar do aumento no percentual de gargalos apresentados pelos problemas. Por outro lado, tanto a TOC-h e TOC-AK não apresentam constância nos DRPM. Contudo, quando observado o tempo de processamento total utilizado pelas heurísticas na resolução dos problemas agrupados pelo percentual de gargalos, elas apresentaram um aumento no tempo total de processamento conforme o aumento no percentual de gargalo nos problemas. A Figura 19 é representativa desse apontamento.

Figura 19 – Tempo total de processamento utilizado pelas heurísticas em problemas de grande porte agrupados pelo percentual de gargalos.

Apesar de todas as heurísticas apresentarem uma relação de aumento entre o tempo total de processamento e o percentual de gargalos, a TOC-SN quase não apresentou oscilações nessa relação em comparação com as outras duas heurísticas. Com base nesse contexto, em termos de DRPM e tempo de processamento, os resultados obtidos pela TOC-SN foram comparados com os resultados obtidos pela P. L. I., conforme demonstrado na Tabela 40. É importante destacar que foi definido um tempo máximo de 24 horas para realização desse processo de procura da solução ótima, visto que tal processo de busca pela solução ótima pode ser um processo moroso, ou seja, caso a técnica de P. L. I. utilizasse 24 horas para encontrar a solução ótima e não a encontrasse a melhor solução encontrada até o momento seria adotada como tal valor.

Problema	% de Gargalos (%q)	Ganho		DRP	Tempo de Processamento	
		TOC-SN	P. L. I.	TOC-SN	TOC-SN	P. L. I.
1	10	188.191,16	267.204,57	-29,5704	00:00:01	00:03:52
2	20	571.514,12	741.822,06	-22,9581	00:00:01	00:12:15
3	30	518.530,39	660.362,80	-21,4780	00:00:03	00:21:16
4	40	636.782,03	684.949,92	-7,0323	00:00:04	00:05:47
5	50	612.871,85	742.189,04	-17,4238	00:00:05	00:28:07
6	60	552.138,86	679.844,36	-18,7845	00:00:06	00:03:29
7	70	647.786,84	719.874,90	-10,0140	00:00:07	00:04:35
8	80	675.160,87	781.326,08	-13,5878	00:00:08	00:07:01
9	90	511.109,09	630.304,09	-18,9107	00:00:06	00:14:09
10	100	714.558,19	741.290,29	-3,6062	00:00:07	00:18:05
11	10	363.136,78	457.787,28	-20,6757	00:00:01	00:25:15
12	20	659.256,36	774.319,21	-14,8599	00:00:03	00:10:47
13	30	483.756,05	680.034,21	-28,8630	00:00:03	00:06:12
14	40	467.162,24	587.126,01	-20,4324	00:00:04	00:05:32
15	50	579.229,19	682.472,95	-15,1279	00:00:04	00:06:09
16	60	580.703,49	672.652,12	-13,6696	00:00:03	00:11:37
17	70	351.296,64	416.088,57	-15,5717	00:00:06	00:21:07
18	80	544.161,23	641.790,12	-15,2120	00:00:04	00:09:20
19	90	457.087,16	524.049,81	-12,7779	00:00:11	00:03:33
20	100	557.356,07	638.597,51	-12,7219	00:00:07	00:02:36
21	10	142.990,44	314.638,14	-54,5540	00:00:01	00:00:12
22	20	426.927,42	559.679,41	-23,7193	00:00:03	00:02:46
23	30	361.044,36	435.385,13	-17,0747	00:00:02	00:01:08
24	40	670.437,52	765.655,07	-12,4361	00:00:05	00:01:22
25	50	491.809,30	614.426,66	-19,9564	00:00:04	00:10:49
26	60	518.359,08	626.150,22	-17,2149	00:00:05	00:13:56
27	70	350.629,45	439.352,70	-20,1941	00:00:06	00:02:33
28	80	489.914,26	619.119,30	-20,8692	00:00:10	02:19:46
29	90	572.213,07	660.311,03	-13,3419	00:00:14	00:01:43
30	100	309.719,46	435.936,37	-28,9531	00:00:11	00:01:59
31	10	699.458,66	857.706,99	-18,4502	00:00:02	00:02:15
32	20	356.866,82	458.736,54	-22,2066	00:00:03	00:00:16
33	30	638.347,70	735.214,87	-13,1754	00:00:05	00:02:00
34	40	616.434,71	686.188,57	-10,1654	00:00:04	00:01:00
35	50	425.977,71	611.552,21	-30,3448	00:00:04	00:00:19
36	60	702.772,82	823.668,31	-14,6777	00:00:08	00:01:31
37	70	506.348,77	667.274,09	-24,1168	00:00:04	00:01:04
38	80	614.634,18	740.461,72	-16,9931	00:00:13	00:04:18
39	90	641.789,92	704.662,16	-8,9223	00:00:11	00:23:07
40	100	563.349,53	637.756,88	-11,6670	00:00:19	00:53:12
41	10	436.897,37	576.207,98	-24,1771	00:00:01	00:00:49
42	20	321.895,74	376.493,57	-14,5017	00:00:03	00:03:34
43	30	527.390,41	622.031,93	-15,2149	00:00:03	00:03:18
44	40	280.820,63	329.068,86	-14,6620	00:00:07	00:03:27
45	50	490.263,14	620.181,76	-20,9485	00:00:06	00:02:05
46	60	324.594,22	354.199,17	-8,3583	00:00:07	02:11:03
47	70	247.626,72	306.486,71	-19,2047	00:00:13	00:30:45
48	80	682.292,57	702.877,68	-2,9287	00:00:16	00:22:12
49	90	674.054,82	705.375,62	-4,4403	00:00:17	24:00:00
50	100	646.238,89	708.691,85	-8,8124	00:00:18	00:08:49
Total	-	25.403.888,30	30.419.577,40	-	00:05:19	35:32:02
Média	-	-	-	-17,31	00:00:06	00:42:38

Tabela 40 – Comparação do desempenho da TOC-SN com a P. L. I. para os problemas de grande porte.

A heurística TOC-SN demonstrou um bom desempenho nos problemas de grande porte quando comparada com a P. L. I., pois apresentou uma redução significativa na média do tempo de processamento, apesar do DRPM de aproximadamente 17,31%, conforme demonstrado na Tabela 40 e Tabela 41.

% de Gargalos	DRPM	Tempo Total de Processamento	
	TOC-SN	TOC-SN	P. L. I.
10	-29,4855	00:00:06	00:32:23
20	-19,6491	00:00:13	00:29:38
30	-19,1612	00:00:16	00:33:54
40	-12,9456	00:00:24	00:17:08
50	-20,7603	00:00:23	00:47:29
60	-14,5410	00:00:29	02:41:36
70	-17,8203	00:00:36	01:00:04
80	-13,9182	00:00:51	03:02:37
90	-11,6786	00:00:59	24:42:32
100	-13,1521	00:01:02	01:24:41
Total	-	00:05:19	35:32:02
Média	-17,3112	00:00:32	03:33:12

Tabela 41 – Resultados obtidos pela TOC-SN em comparação à P. L. I. para problemas grande porte em termos de DRPM e tempo de processamento.

De maneira prática, a TOC-SN pode auxiliar os gestores na definição de mix de produção em situações aonde há restrições de recurso produtivo e a definição do mix de produção precisa ser deliberada rapidamente. Um bom exemplo dessa situação ocorreu no problema 49, apresentado na Tabela 40 e responsável pelo pico exposto na Figura 21, pois a TOC-SN apresentou uma solução com um DRP de aproximadamente 4,44% em relação à melhor solução obtida pela P. L. I., depois de 24 horas de processamento, em apenas 17 segundos. Além disso, com base na Figura 20, é importante destacar que a TOC-SN apresentou uma tendência de redução do DRPM com o aumento do percentual de gargalos nos problemas. Provavelmente, essa tendência é explicada pela premissa de que em um sistema, aonde existe inter-relação entre os elementos que o compõem, seu desempenho é determinado por poucos elementos, como muito bem advoga Goldratt, (2010, pp. 3-4). Assim, se a TOC-SN conseguir identificar um desses elementos responsável pela maior parte do

desempenho, possivelmente apresentará um bom resultado mesmo que o percentual de gargalos aumente.

Figura 20 – Resultados obtidos pela TOC-SN em comparação à P. L. I. para problemas grande porte em termos de DRPM agrupados pelo percentual de gargalos.

Figura 21 – Tempo total de processamento utilizado pela TOC-SN e P. L. I. em problemas de grande porte agrupados pelo percentual de gargalos.

5. Considerações Finais

“Não tenho nada mais que oferecer do que sangue, (...) lágrimas e suor.” – Winston Churchill (Primeiro ministro do Reino Unido), em Discursos que mudaram o mundo.

Um dos problemas mais recorrentes na área da programação de produção é a definição do mix de produção, ou seja, definir quais produtos e as respectivas quantidades serão produzidas quando não há recursos produtivos suficientes para elaboração de todos os produtos e uma demanda de mercado em potencial (Hsu & Chung, 1998, pp. 36-37; Köksal, 2004, p. 5012). Apesar de ser muito bem conhecido e estudado na literatura especializada, esse problema é de difícil solução. Sendo assim, a partir do trabalho *Computerized shop floor scheduling*, de Goldratt (1988), a respeito de TOC e OPT, alguns autores propuseram heurísticas construtivas baseadas na TOC para fazer frente a esse tipo de situação. Em poucas palavras, a TOC é uma filosofia de gerenciamento da produção que tem como objetivo o foco e a gestão dos recursos gargalos do sistema (Onwubolu & Mutingi, 2001, p. 21). De maneira geral, as heurísticas baseadas na TOC tendem em um primeiro momento identificar os gargalos existentes e, posteriormente, gerenciá-los da melhor maneira possível.

Entre essas heurísticas se destacam a TOC-h, proposta por Fredendall & Lea, (1997, p. 1537), e a TOC-AK, sugerida por Aryanezhad & Komijan, (2004, p. 4227) como sucessora da primeira. De maneira resumida, a TOC-h tem como propósito identificar o gargalo dominante, isto é, o primeiro recurso que apresenta falta de capacidade no processo produtivo, desenvolver um mix de produção ou uma solução inicial com base nesse gargalo dominante, e tentar melhorar essa solução inicial com base em uma procura na vizinhança. Por outro lado, a TOC-AK tem como objetivo criar um mix de produção para cada gargalo existente e,

consequentemente, avaliar as principais diferenças existentes entre eles afim de reconhecer o melhor mix de produção.

A TOC-h e a TOC-AK apresentam bons desempenhos em problemas considerados de pequeno e médio porte, ou seja, com poucos gargalos, conforme muito bem destaca Onwubolu (2001, p. 2066). Contudo, quando os problemas têm múltiplos gargalos, essas heurísticas apresentam dificuldades em encontrar boas soluções em um razoável tempo de processamento. Com base nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho foi propor e analisar uma heurística construtiva, denominada TOC-SN, baseada na TOC e no problema da mochila, para auxiliar na definição de mix de produção, visando à obtenção de melhores soluções quando comparadas com as heurísticas TOC-h e TOC-AK.

Para tanto, a TOC-SN utiliza um algoritmo guloso, denominado de *B-Greedy*, desenvolvido para fazer frente ao problema da mochila, e uma versão modificada do mesmo, denominada de *B-Greedy-M*, para identificar o gargalo dominante e, tão logo, definir uma solução inicial, ou seja, um mix de produção. Com base nessa solução inicial, a TOC-SN realiza uma procura na vizinhança com o objetivo de melhorá-la.

Nesse sentido, com o objetivo de verificar o desempenho da TOC-SN em relação à TOC-h e a TOC-AK, em termos de DRPM e do tempo de processamento, uma experimentação computacional foi realizada. Para tanto, as heurísticas foram testadas na resolução de dois conjuntos de problemas, diferenciados pelo número de variáveis envolvidas em problemas de pequeno e médio porte e problemas de grande porte.

A TOC-SN apresentou um melhor desempenho que a TOC-h e a TOC-AK tanto nos problemas de pequeno e médio como, também, nos de grande porte, em termos de DRPM e tempo de processamento. De certa forma, esse bom desempenho é resultante da capacidade dos algoritmos *B-Greedy* e *B-Greedy-M* em gerar a solução inicial de maneira muito rápida o que, por sua vez, proporciona que a TOC-SN despenda mais tempo na realização da busca na

vizinhança. Além disso, ainda visando testar o desempenho, a TOC-SN foi testada na resolução dos mesmos conjuntos de dados em relação à P. L. I. Consequentemente, foi observado que ela demonstrou uma redução significativa no tempo de processamento sem denotar uma perda expressiva na qualidade das soluções obtidas o que, por sua vez, possibilita concluir que a heurística proposta é muito mais eficiente que as heurísticas existentes o que, em suma, destaca sua importância na definição de mix de produção.

Por fim, deve ser destacado que, na definição do mix de produção, a TOC-SN não observa a existência de flutuações estatísticas, o tamanho dos lotes, e datas de entrega ou de diferentes datas de entregas para cada produto o que, por sua vez, em uma situação prática, pode ser considerado um aspecto fundamental para os gestores, vista a possibilidade de aplicação de penalidades como, por exemplo, multas (Gupta & Boyd, 2008, pp. 1000-1001; Ray, Sarkar, & Sanyal, 2010, p. 308). É válido destacar que, por uma questão de delimitação da amplitude deste trabalho, a TOC-SN não foi comparada com heurísticas ou meta-heurísticas que não fossem construtivas como, por exemplo, *simulated annealing*, busca tabu, algoritmos genéticos, e algoritmos meméticos. Além disso, como muita bem salienta Lea & Fredendall (2002, p. 280) e Köksal (2004, p. 5012), os sistemas gerenciais de apuração dos custos dos produtos influenciam na definição do mix de produção, entretanto, a heurística proposta não faz consideração nenhuma a respeito da sua apuração. Assim, vale registrar ou indicar como área de pesquisa para trabalhos futuros a melhoria da TOC-SN ou o desenvolvimento de novas heurísticas construtivas que permitam fazer tais considerações e, também, a sua utilização em outros tipos de problemas que são resolvidos de maneira ótima com base na P. L. I

Referência Bibliográfica

- Aryanezhad, M. B., & Komijan, A. R. (2004). An improved algorithm for optimizing product mix under the theory of constraints. *International Journal of Production Research*, 42(20), pp. 4221-4233.
- Aryanezhad, M. B., Badri, S. A., & Komijan, A. R. (2010). Threshold-based method for elevating the system's constraint under theory of constraints. *International Journal of Production Research*, 48(17), pp. 5075-5087.
- Bakke, N., & Hellberg, R. (1991). Relevance lost? A critical discussion of different cost accounting principles in connection with decision making for both short and long term production scheduling. *International Journal of Production Economics*, 24, pp. 1-18.
- Bayou, M., & Reinstein, A. (2005). Analyzing the product-mix decision by using a fuzzy hierarchical model. *Managerial Finance*, 31(3), pp. 35-48.
- Bhattacharya, A., Vasant, P., Sarkar, B., & Mukherjee, S. K. (2008). A fully fuzzified, intelligente theory-of-constraints product-mix decision. *International Journal of Production Research*, 46(3), pp. 789-815.
- Boyd, L., & Gupta, M. (2004). Constraints Management: What is the theory? *International Journal of Operations & Production Management*, 24(4), pp. 350-371.
- Brucker, P. (2007). *Scheduling Algorithms* (5° ed.). New York: Springer.
- Corbett, T. (2005). *Bússola Financeira: O processo decisório da Teoria das Restrições*. São Paulo, São Paulo, Brasil: Nobel.
- Cormen, T. H., Leiserson, E. C., & Rivest, L. R. (2000). *Introduction to Algorithms*. New York, New York: McGraw-Hill.

- Croci, F., & Pozzetti, A. (2000). OPT scheduling performances: a case study. *Production Planning & Control*, 11(1), pp. 82-89.
- Dantzig, G. B. (April de 1957). Discrete-Variable Extremum Problems. *Operations Research*, 5(2), pp. 266-277.
- Dantzig, G. B., & Thapa, M.-D. (1997). *Linear programming 1: introduction*. New York: Springer-Verlag New York.
- Dettmer, H. W. (1997). *Goldratt's theory of constraints: a systems approach to continuous improvement*. Milwaukee, Wisconsin: Quality Press.
- Eco, U. (2006). *Como se faz uma tese* (20 ed.). (G. C. Souza, Trad.) São Paulo, São Paulo, Brasil: Perspectiva.
- Eiselt, H., & Sandblom, C.-L. (2007). *Linear Programming and its Applications*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ferreira, A. B. (2004). Novo Dicionário Eletrônico Aurélio versão 5.0. Positivo.
- Finch, B. J., & Luebbe, R. L. (2000). Response to 'Theory of constraints and linear programming: a re-examination'. *International Journal of Production Research*, 38(6), pp. 1465-1466.
- Framinan, J. M., Nagano, M. S., & Moccasin, J. V. (2010). An efficient heuristic for total flowtime minimisation in no-wait flowshops. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(9-12), pp. 1049-1057.
- Fredendall, L. D., & Lea, B. R. (1997). Improving the product mix heuristic in the theory of constraints. *International Journal of Production Research*, 35(6), pp. 1535-1544.
- Fylstra, D., Lasdon, L., Watson, J., & Waren, A. (1998). Design and Use of the Microsoft Excel Solver. *Interfaces*, 28(5), pp. 29-55.
- Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness* (1 ed.). San Francisco, United States: W. H. Freeman.

- Goldbarg, M. C., & Luna, H. P. (2005). *Otimização combinatória e programação linear* (2^a ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier.
- Goldratt, E. M. (March de 1988). Computerized shop floor scheduling. *International Journal of Production Research*, 26(3), pp. 443-455.
- Goldratt, E. M. (1991). *A síndrome do palheiro: garimpando informações num oceano de dados* (2 ed.). (C. Fullmann, Trad.) São Paulo, São Paulo, Brasil: Educator.
- Goldratt, E. M. (2006). *A meta na prática*. (M. L. Cumo, Trad.) São Paulo, São Paulo, Brasil: Nobel.
- Goldratt, E. M. (2010). Introduction to TOC - My Perspective. In: J. F. Cox III, & J. G. Schleier Jr., *Theory of Constraints: Handbook* (pp. 3-9). New York: McGraw-Hill.
- Goldratt, E. M., & Cox, J. (2006). *A meta: um processo de melhoria contínua* (2 ed.). São Paulo, São Paulo, Brasil: Nobel.
- Gupta, M. (2003). Constraints management - recent advances and practices. *International Journal Product Research*, 41(4), pp. 647-659.
- Gupta, M. C., & Boyd, L. H. (2008). Theory of constraints: a theory for operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, 28(10), pp. 991-1012.
- Gupta, M. C., Baxendale, S. J., & Raju, P. S. (2002). Integrating ABM/TOC approaches for performance improvement: a framework and application. *International Journal of Production Research*, 40(14), pp. 3225-3251.
- Gupta, M., & Snyder, D. (2009). Comparing TOC with MRP and JIT: a literature review. *International Journal of Production Research*, 47(13), pp. 3705-3739.
- Gupta, M., Ko, H.-J., & Min, H. (2002). TOC-based performance measures and five focusing steps in a job-shop manufacturing environment. *International Journal Product Research*, 40(4), pp. 907-930.

- Herman, M., & Goldratt, R. (2010). Less Is More - Applying the Flow Concepts to Sales. In: J. F. Cox III, & J. G. Schleier Jr., *Theory of Constraints: Handbook* (pp. 587-601). New York: McGraw - Hill.
- Hicks, C., & Pongcharoen, P. (2009). Applying different control approaches for resources with high and low utilisation: a case study of the production of complex products with stochastic processing times. *International Journal of Technology Management*, 48(2), pp. 202-218.
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2001). *Introduction to operations research* (7^a ed.). New York, New York, United States: McGraw-Hill.
- Hoare, C. A. (July de 1961). Algorithm 64: Quicksort. *Communications of the ACM*, p. 321.
- Hoare, C. A. (1962). Quicksort. *The Computer Journal*, 5(1), pp. 10-16.
- Houaiss, A., Franco, F., & Villar, M. S. (2001). Dicionário Eletrônico Houaiss da Língua Portuguesa.
- Hsiao, Y.-C., Lin, Y., & Huang, Y.-K. (2010). Optimal multi-stage logistic and inventory policies with production bottleneck in a serial supply chain. *International Journal of Production Economics*, 124(2), pp. 408-413.
- Hsu, T.-C., & Chung, S.-H. (1998). The TOC-based algorithm for solving product mix problems. *Production Planning & Control*, 9(1), pp. 36-46.
- Kee, R., & Schmidt, C. (2000). A comparative analysis of utilizing activity-based costing and the theory of constraints for making product-mix decisions. *International Journal Production Economics*, 63, pp. 1-17.
- Kellerer, H., Pferschy, U., & Pisinger, D. (2004). *Knapsack Problems* (1 ed.). Berlin: Springer.
- Köksal, G. (2004). Selecting quality improvement projects and product mix together in manufacturing: an improvement of a theory of constraints-based approach by

- incorporating quality loss. *International Journal Product Research*, 42(23), pp. 5009-5029.
- Kothari, C. R. (2004). *Research Methodology* (2 ed.). New Delhi, Daryaganj, India: New Age International.
- Krauth, J., & Warschat, J. (1989). An optimal production-mix model. *European Journal of Operational Research*, 42, pp. 142-151.
- Lasdon, L., Waren, A., Jain, A., & Ratner, M. (1976). *Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code For Nonlinear Programming*. Technical Report, Stanford University, Systems Optimization Laboratory - Department of Operations Research.
- Lea, B.-R. (2007). Management accounting in ERP integrated MRP and TOC environments. *Industrial Management & Data Systems*, 107(8), pp. 1188-1211.
- Lea, B.-R., & Fredendall, L. (2002). The impact of management accounting, product structure, product mix algorithm, and planning horizon on manufacturing performance. *International Journal Production Economics*, 79(3), pp. 279-299.
- Lee, T. N., & Plenert, G. (1993). Optimizing Theory of Constraints when new product alternatives exist. *Production and Inventory Management Journal*, 34(3), pp. 51-57.
- Lembke, R. T. (2009). Theory of constraints at UniCo: analysing The Goal as a fictional case study. *International Journal of Production Research*, 47(7), pp. 1815-1834.
- Linhares, A. (2009). Theory of constraints and the combinatorial complexity of the product-mix decision. *International Journal Production Economics*(121), pp. 121-129.
- Luebbe, R., & Finch, B. (1992). Theory of constraints and linear programming: a comparison. *International Journal of Production Research*, 30(6), pp. 1471-1478.
- Mabin, V. J., & Balderstone, S. J. (2003). The performance of the theory of constraints methodology: Analysis and discussion of sucessful TOC applications. *International Journal of Operations & Production Management*, 23(6), pp. 568-595.

- Mabin, V. J., & Gibson, J. (1998). Synergies from spreadsheet LP used with the theory of constraints - a case study. *Journal of the Operational Research Society*, 49, pp. 918-927.
- Maday, J. C. (1994). Proper use of constraint management. *Production and Inventory Management Journal*, 35(1), p. 84.
- Marczyk, G., DeMatteo, D., & Festinger, D. (2005). *Essentials of Research Design and Methodology*. Hoboken, New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons.
- Martello, S., & Toth, P. (1990). *Knapsack problems: algorithms and computer implementations* (1 ed.). Guildford, Great Britain: John Wiley & Sons.
- Miltenburg, J. (1997). Comparing JIT, MRP and TOC, and embedding TOC into MRP. *International Journal Production Research*, 35(4), pp. 1147-1169.
- Onwubolu, G. C. (2001). Tabu search-based algorithm for the TOC product mix decision. *International Journal of Production Research*, 39(10), pp. 2065-2076.
- Onwubolu, G. C., & Mutingi, M. (2001 a). A genetic algorithm approach to the theory of constraints product mix problems. *Production Planning & Control*, 12(1), pp. 21-27.
- Onwubolu, G. C., & Mutingi, M. (2001 b). Optimizing the multiple constrained resources product mix problem using genetic algorithms. *International Journal Production Research*, 39(9), pp. 1897-1919.
- Patterson, M. C. (1992). The Product-Mix Decision: A Comparison of Theory of Constraints and Labor-Based Management Accounting. *Production and Inventory Management Journal*, 33(3), pp. 80-85.
- Pinedo, M. L. (2008). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems* (3^a ed.). New York, New York: Springer.

- Pisinger, D., & Toth, P. (1998). Knapsack Problems. In: D. Z. Du, & P. M. Pardalos, *Handbook of Combinatorial Optimization* (1^a ed., Vol. I, pp. 299-428). Boston: Kluwer Academic Publisher.
- Plenert, G. (1993). Optimizing theory of constraints when multiple constrained resources exist. *European Journal of Operational Research*, 70, pp. 126-133.
- Polya, G. (1995). *A arte de resolver problemas: um novo aspecto do método matemático*. (H. L. Araújo, Trad.) Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Interciência.
- Posnack, A. J. (1994). Theory of Constraints: Improper Applications Yield Improper Conclusions. *Production and Inventory Management Journal*, 35(1), pp. 85-86.
- Rahman, S. U. (1998). Theory of Constraints: A review of the philosophy and its applications. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(4), 336-355.
- Ray, A., Sarkar, B., & Sanyal, S. (2010). The TOC-Based Algorithm for Solving Multiple Constraint Resources. *IEEE Transaction on Engineering Management*, 57(2), pp. 301-309.
- Rentes, A. F., & Souza, F. B. (1997). Os processos de raciocínio da Teoria das Restrições como ferramentas para um processo de melhoria contínua focalizada. *XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção e III Congresso Internacional de Engenharia Industrial - ENEGEP* (pp. 1-7). Gramados: ENEGEP.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2006). *Metodologia de Pesquisa* (3^a ed.). São Paulo, São Paulo, Brasil: McGraw-Hill.
- Schildt, H. (2004). *C++: Fundamentos e Prática*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Alta Books.
- Shephed, R. (2004). *Excel VBA Programação de Macros*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Alta Books.

- Silver, E. A. (2004). An overview of heuristic solution methods. *Journal of the Operational Research Society*, 55, pp. 936-956.
- Silver, E., Victor, R., Vidal, V., & Werra, D. (September de 1980). A tutorial on heuristic methods. *European Journal of Operational Research*, 5(3), pp. 153-162.
- Slack, N., Chambers, S., & Johnston, R. (2007). *Operations Management* (5 ed.). Madrid, Spain: Pearson.
- Souza, F. B. (1997). *Fundamentos de teoria das restrições e uma aplicação em uma metodologia de integração de empresa*. Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, Engenharia Mecânica, São Carlos.
- Souza, F. B., & Manfrinato, J. W. (2007). Theory of Constraints and Linear Programming: a conceptual analysis. *XIII International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, (pp. 1-10). Foz do Iguaçu.
- Souza, F. B., & Pires, S. R. (2010). Theory of constraints contributions to outbound logistics. *Management Research Review*, 33(7), pp. 683 - 700.
- Spencer, M. S. (1994). Economic theory, cost accounting and theory of constraints: an examination of relationships and problems. *International Journal of Production Economics*, 32(2), pp. 299-308.
- Steele, D. C., Philipoom, R. P., Malhotra, K. M., & Fry, T. D. (2005). Comparisons between drum–buffer–rope and material requirements planning: a case study. *International Journal of Production Research*, 43(15), pp. 3181-3208.
- Tsai, W. H., Lai, C. W., & Chang, J. C. (August de 2007). An algorithm for optimizing joint products decision based on the Theory of Constraints. *International Journal of Production Research*, 45(15), pp. 3421-3437.
- Tsai, W.-H., Kuo, L., Lin, T. W., Kuo, Y.-C., & Shen, Y.-S. (November de 2010). Price elasticity of demand and capacity expansion features in an enhanced ABC product-

- mix decision model. *International Journal of Production Research*, 48(21), pp. 6387–6416.
- Verma, R. (1997). Management Science, Theory of Constraints/Optimized Production Technology and Local Optimization. *Omega*, 25(2), pp. 189 - 200.
- Wang, J. Q., Sun, S. D., & Yang, H. A. (August de 2009). Theory of constraints product mix optimisation based on immune algorithm. *International Journal of Production Research*, 47(43), pp. 4521-4543.
- Watson, K., Blackstone, J., & Gardiner, S. (2007). The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. *Journal of Operations Management*, 25, pp. 387 - 402.
- Winston, W. L. (2003). *Operations Research: Applications and Algorithms* (4 ed.). California/Belmont, United States: Duxbury Press.
- Zanakis, S. H., & Evans, J. R. (October de 1981). Heuristic "Optimization": Why, When, and How to Use It. *Interfaces*, 11(5), pp. 84-91.

Apêndice - A

Na realização de classificações de valores, de maneira crescente ou decrescente, em qualquer uma das heurísticas apresentadas neste trabalho foi utilizado o algoritmo *Quicksort Recursivo* de C. A. R. Hoare⁵⁹, pois, conforme sugere Schildt, (2004, pp. 107-108), o mesmo apresenta um desempenho mais satisfatório que os demais como, por exemplo, o *Bubblesort* ou *Mergesort*. O pseudocódigo do *Quicksort Recursivo* é apresentado na Figura 22.

```
1. Quicksort (Conjunto[], Inicio, Fim)
2.   If Fim > Inicio then
3.     i = Inicio
4.     j = Final
5.     Pivo = Conjunto[(Inicio + Fim)/2]
6.     While i <= j
7.       While Conjunto[i] < Pivo
8.         i = i + 1
9.       Wend
10.      While Pivo < Conjunto[j]
11.        j = j - 1
12.      Wend
13.      If i <= j then
14.        Aux = Conjunto[i]
15.        Conjunto[i] = Conjunto[j]
16.        Conjunto[j] = Aux
17.        i = i + 1
18.        j = j + 1
19.      End if
20.    Wend
21.    Quicksort(Conjunto[], Inicio, j)
22.    Quicksort(Conjunto[], i, Fim)
23.  End if
```

Figura 22 – Algoritmo *Quicksort Recursivo*.

Fonte: Adaptado de Cormen, Leiserson, & Rivest, (2000, p. 154) e Schildt, (2004, p. 108).

⁵⁹ Para maiores informações consulte:

Hoare, C. A. R. (July de 1961). Algorithm 64: Quicksort. *Communications of the ACM*, p. 321.

Hoare, C. A. R. (1962). Quicksort. *The Computer Journal*, 5(1), pp. 10-16.

Aonde:

Conjunto[] conjunto com os dados numéricos a serem ordenados;

Inicio posição do primeiro elemento do conjunto;

Fim posição do último elemento do conjunto;

i, j índices de posição; e

Aux variável auxiliar para realizar a troca do *Conjunto*[*i*] com o *Conjunto*[*j*].

Índice Remissivo

A

A Meta, 54, 67, 68

Alex Rogo, 67

APICS, 52, 66, 69

Aryanezhad & Komijan, 36, 37, 50, 97, 130, 164

Aryanezhad, Badri, & Komijan, 51, 57

B

Bayou & Reinstein, 75

B-Greedy, 87, 88, 103, 104, 107, 108, 122, 123, 165, 166

B-Greedy-M, 103, 104, 105, 106, 107, 109, 110, 111, 123,
124, 125, 148, 165, 166

Bhattacharya, Vasant, Sarkar, & Mukherjee, 50, 57, 75

Bounded knapsack problem, 84, 85, 87

Boyd & Gupta, 47, 53, 58, 60

Branch e bound, 136

Bubblesort, 179

C

C. A. R. Hoare, 179

Contabilidade de custos, 69, 74

Contabilidade de ganho, 71, 74

Corbett, 60, 61, 62, 69, 72, 73

Cormen, Leiserson, & Rivest, 36, 83, 180

Corrente Crítica, 73

Critical Chain Project Management, xxiii, 73

Croci & Pozzetti, 47, 53

D

Dantzig & Thapa, 136

D-dimensionad problem, 85

Desvio relativo percentual, xxiii, xxvi, 137

Desvio relativo percentual médio, xxiii, 137

Dettmer, 60, 61, 62, 64

Dr. Eliyahu M. Goldratt, 37, 58, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72,
74

E

Eco, 90

Eiselt & Sandblom, 136

F

Ferreira, 63

Finch & Luebbe, 59

Fluxo de caixa, 71

Framinan, Nagano, & Moccellini, 137

Fredendall & Lea, xiii, 34, 36, 37, 50, 55, 93, 106, 130,
164

Frontline Systems, 135

Fylstra, Lasdon, Watson, & Waren, 136

G

Gastos operacionais, 71

Goldbarg & Luna, 36

Goldratt, 37, 42, 45, 46, 48, 49, 52, 60, 62, 64, 71, 76, 80,
130, 162, 164

Goldratt & Cox, 63

Gradação reduzida generalizada, 136

Greedy, 83, 84, 87

Gupta & Boyd, 47, 54, 61, 166

Gupta & Snyder, 48, 54, 59

Gupta M, 53

Gupta M., 47

Gupta, Baxendale, & Raju, 47, 52, 53

Gupta, Ko, & Min, 47, 50, 53, 56, 69

H

Herman & Goldratt, 60

Hicks & Pongcharoen, 48, 54

Hillier & Lieberman, 33, 77

HistCite, 45

Houaiss, Franco, & Villar, 33, 40, 58

Hsiao, Lin, & Huang, 48, 55

Hsu & Chung, 36, 50, 81, 164

I

Inventário, 71

ISI Web of Knowledge – Science, 43, 45

It's not luck, 72

J

Jeff Cox, 67

Journal Citation Reports, 43, 45

K

Kee & Schmidt, 54

Kellerer, Pferschy, & Pisinger, 82, 83, 84

Knapsack problem, xv, 35

Köksal, 50, 57, 72, 164, 167

Kothari, 90

Krauth & Warschat, 39

L

Lasdon, Waren, Jain, & Ratner, 136

Lea, 39, 75

Lea & Fredendall, 50, 56, 58, 69, 75, 167

Lead time, 69

Lee & Plenert, 36, 130

Lembke, 48, 54

Linhares, 34, 35, 154

Lucro líquido, 71

Luebbe & Finch, 36, 43, 45, 49, 51, 55, 69, 130

M

Mabin & Balderstone, 60

Mabin & Gibson, 50, 56, 78

Maday, 64

Makespan, xxv

Marczyk, DeMatteo, & Festinger, 90

Martello & Toth, 82

Meleton, 58

Mergesort, 179

Microsoft office, 133

Microsoft office excel, 56, 128, 133, 135

Miltenburg, 47, 52, 53, 54

Mix de produção, vii, xiii, xxv, xxvii, 34, 35, 36, 37, 38, 39,
40, 42, 55, 56, 57, 59, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82,
84, 85, 88, 91, 103, 104, 106, 108, 109, 110, 111, 112,
115, 116, 117, 119, 121, 123, 124, 125, 126, 129, 135,
136, 137, 146, 148, 161, 164, 165, 166, 167

Multidimensional knapsack problem, 85

Multiple knapsack problem with identical capacities, 85

N

Nível de produção, 71

O

Onwubolu, 50, 56, 75, 165

Onwubolu & Mutingi, 50, 56, 62, 164

OPT, 65, 66, 164

Overhead, 70

P

P. L. I, 167

P. L. I., 42, 43, 55, 78, 88, 113, 126, 127, 128, 129, 137,
149, 150, 151, 152, 153, 159, 160, 161, 162, 163, 166
Programação linear inteira, 77, 107

Patterson, 34, 36, 130

Pinedo, 35

Pisinger & Toth, 82

Plenert, 36, 37

Polya, 36

Posnack, 81

Problema da mochila, 35, 82, 84, 85, 87, 88, 165

Processos de raciocínio, 72, 73

Programação da produção, 66, 67

Programação linear inteira, 77

Q

Quadratic knapsack problem, 85

Quicksort recursivo, 94, 179, 180

R

Rahman, 47, 52, 53, 54, 60

Ray, Sarkar, & Sanyal, 51, 57, 166

Relaxamento do problema linear, 86

Rentes & Souza, 73

Retorno sobre o investimento, 71

Robert E. Fox, 66

Rucksack problem, 35

S

Sampieri, Collado, & Lucio, 90

Schildt, 179, 180

Shepherd, 133

Silver, 36

Silver et al., 36

Simplex, 136

Slack, Chambers, & Johnston, 34

Solver, 135, 136

Souza, 63

Souza & Manfrinato, 72

Souza & Pires, 74

Spencer, 60

Steele, Philipoom, Malhotra, & Fry, 47, 54

T

Tambor, pulmão, e corda, 67, 68

Teoria das Restrições, *xiii*, 37, 58

The Race, 66, 68

Theory of constraints, *xv*

Theory of Constraints, *xv*, 37, 58

Theory of Scheduling, 35

TOC, *xiii*, *xv*, 37, 38, 40, 42, 43, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 62, 63, 65, 67, 68, 69, 71, 73, 74, 79, 80, 81, 82, 84, 88, 164, 165

TOC-AK, *xiii*, *xv*, *xxv*, *xxvii*, 37, 38, 91, 97, 98, 102, 126, 134, 139, 141, 143, 145, 146, 148, 149, 155, 156, 157, 158, 164, 165, 166

TOC-h, *xiii*, *xv*, *xxv*, 37, 38, 91, 93, 97, 103, 113, 126, 127, 134, 139, 141, 143, 145, 146, 148, 155, 156, 157, 158, 164, 165, 166

TOC-SN, *xiii*, *xv*, *xxv*, 38, 103, 104, 107, 109, 112, 126, 127, 134, 139, 141, 143, 145, 146, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 165, 166, 167

Tsai, Lai, & Chang, 50, 57

U

Unbounded knapsack problem, 85

V

VBA

Visual basic for applications, 133

Verma, 50, 55, 58, 72

Visual basic for applications, 133

W

Wang, Sun, & Yang, 33, 48, 51, 55, 57, 75

Watson, Blackstone, & Gardiner, 47, 54, 58, 63, 65, 69, 72, 74

Weighted Shortest Processing Time first, 35

Winston, 136

Z

Zanakis & Evans, 36