

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DEBORA JAENSCH

PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE PARA A
TOMADA DE DECISÃO NO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO:
DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO

CURITIBA

2015

DEBORA JAENSCH

PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE PARA A
TOMADA DE DECISÃO NO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO:
DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia
de Produção, no Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção, Universidade
Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Neida Maria Patias
Volpi

CURITIBA
2015

J22p

Jaensch, Debora

Proposta de utilização do modelo de transporte para a tomada de decisão no planejamento da produção : desenvolvimento de um aplicativo/ Debora Jaensch. – Curitiba, 2015.

87 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2015.

Orientador: Neida Maria Patias Volpi .

Bibliografia: p. 83-85.

1. Planejamento da produção. 2. Programação linear. 3. Pesquisa operacional. I. Universidade Federal do Paraná. II. Volpi, Neida Maria Patias. III. Título.

CDD: 658.5038

TERMO DE APROVAÇÃO

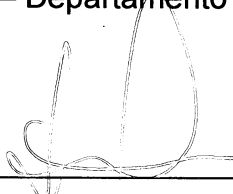
DEBORA JAENSCH

PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE PARA A
TOMADA DE DECISÃO NO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO:
DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO

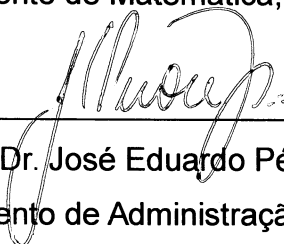
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Professora Dra. Neida Maria Patias Volpi
Orientadora – Departamento de Engenharia de Produção,
UFPR



Professora Dra. Simone Aparecida Miloca
Departamento de Matemática, UNIOESTE



Professor Dr. José Eduardo Pécora Junior
Departamento de Administração Geral e Aplicada, UFPR



Professora Dra. Izabel Cristina Zattar
Departamento de Engenharia de Produção, UFPR

RESUMO

A proposta deste trabalho é o uso do modelo de transporte como técnica para o planejamento da produção. Um bom plano de produção é aquele que atende as demandas dentro do prazo, respeita a capacidade dos recursos disponíveis e minimiza os custos de produção. Este trabalho busca através da Pesquisa Operacional, adaptar o modelo do transporte ao planejamento da produção além de gerar um aplicativo que sirva de suporte aos tomadores de decisão, fornecendo informações para análise de diferentes cenários do sistema produtivo. Esse aplicativo trabalha com um horizonte de planejamento e custos diferenciados por período e modo de produção, permite estoque e *backlogging*, avaliar alterações no planejamento no caso de mudanças na capacidade ou demanda, além de ter fácil utilização, possibilitando assim o gerenciamento fornecendo informações ao usuário.

Palavras-chave: Planejamento da Produção; Programação Linear Inteira; Modelo de Transporte.

ABSTRACT

The proposal of this paper is the use of transportation model as a technique for production planning. A good production plan is one that attend to demands on time, respects the capacity of available resources and minimizes production costs. This paper uses the Operational Research to adapt the transportation model to production planning, and also to generate an application that serves as a support to decision makers, providing information to analyze different scenarios of the production system. This application works with a planning horizon and differentiated costs by period and mode of production, allow inventory and backlogging, measure changes of the plan in cases where capacity or demand changes, in addition to ease of use, allowing management by providing information to the user.

Keywords: Production Planning; Integer Linear Programming; Transportation Model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Técnicas diversas de controle agrupadas segundo áreas do saber.	20
FIGURA 2 - Ferramentas da Pesquisa Operacional.	22
FIGURA 3 - Estrutura do Problema do Transporte.....	27
FIGURA 4 - Fases do estudo da Pesquisa Operacional.	42
FIGURA 5 - Fluxo do Aplicativo.....	52
FIGURA 6 - Formulário Entrada de Dados.....	54

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Quadro de Soluções.....	28
QUADRO 2 - Quadro de Custos.	28
QUADRO 3 - Forma Tabular Geral do Problema do Transporte Balanceado..	29
QUADRO 4 - Analogia entre modelos do transporte e planejamento da produção.	43
QUADRO 5 - Quadro de planejamento da produção para único item.....	44
QUADRO 6 - Interpretação das variáveis x_{ij}	44
QUADRO 7 - Apresentação Matriz de Resultados.....	46
QUADRO 8 - Quadro de planejamento da produção para vários itens e vários recursos.....	47
QUADRO 9 - Matriz de Uso.	49
QUADRO 10 - Vetores Capacidade.	50
QUADRO 11 - Instruções Entrada de Dados.....	54
QUADRO 12 - Demanda.....	54
QUADRO 13 - Instruções Demanda.....	54
QUADRO 14 – Capacidade.....	55
QUADRO 15 - Instruções Capacidade.....	55
QUADRO 16 - Matriz Custos de Produção.	56
QUADRO 17 - Instruções Matriz Custos de Produção.....	56
QUADRO 18 - Matriz Custos de Estoque.	57
QUADRO 19 - Instruções Matriz Custos de Estoque.	57
QUADRO 20 - Matriz Custos de Atraso.	58
QUADRO 21 - Instruções Matriz Custos de Atraso.....	58
QUADRO 22 - Matriz de Uso Recurso 1.	59
QUADRO 23 - Instruções Matriz de Uso Recurso 1.....	59
QUADRO 24 - Instruções para Executar Lingo.	60
QUADRO 25 - Demanda primeiro cenário.	62
QUADRO 26 - Capacidade primeiro cenário.....	62
QUADRO 27 - Matriz Custos de Produção primeiro cenário.....	63
QUADRO 28 - Matriz Custos de Estoque primeiro cenário.....	64
QUADRO 29 - Matriz Custos de Atraso primeiro cenário.....	66

QUADRO 30 - Matriz de Uso Recurso 1 primeiro cenário.	67
QUADRO 31 - Matriz de Uso Recurso 2 primeiro cenário.	68
QUADRO 32 - Matriz de Uso Recurso 3 primeiro cenário.	69
QUADRO 33 - Matriz de Uso Recurso 4 primeiro cenário.	70
QUADRO 34 - Matriz de Uso Recurso 5 primeiro cenário.	71
QUADRO 35 - Planejamento primeiro cenário.	72
QUADRO 36 - Demanda segundo cenário.....	76
QUADRO 37 - Capacidade segundo cenário.	76
QUADRO 38 - Matriz Custos de Produção segundo cenário.	77
QUADRO 39 - Matriz Custos de Estoque segundo cenário.	77
QUADRO 40 - Matriz Custos de Atraso segundo cenário.	78
QUADRO 41 - Matriz de Uso Recurso 1 segundo cenário.....	78
QUADRO 42 - Matriz de Uso Recurso 2 segundo cenário.....	79
QUADRO 43 - Matriz de Uso Recurso 3 segundo cenário.....	79
QUADRO 44 - Matriz de Uso Recurso 4 segundo cenário.....	79
QUADRO 45 - Matriz de Uso Recurso 5 segundo cenário.....	79
QUADRO 46 - Planejamento segundo cenário.	80

LISTA DE SIGLAS

APS	<i>Advanced Planning System</i>
AG	Algoritmo Genético
EDI	<i>Eletronic Data Interchange</i>
ERP	<i>Enterprise Resources Planning</i>
ICR	Índice Crítico
IFA	Índice de Falta
IFD	Índice de Folga
IPI	Índice de Prioridade
JIT	<i>Just in Time</i>
MDE	Menor Data de Entrega
MSM	<i>Modified Silver-Meal</i>
MRP II	<i>Manufacturing Resources Planning</i>
MRP	<i>Materials Requirements Planning</i>
MTP	Menor Tempo de Processamento
OPT	<i>Optimized Production Technology</i>
PCP	Planejamento e Controle de Produção
PEPS	Primeira a Entrar, Primeira a Sair
PMP	Plano Mestre de Produção
PI	Programação Inteira
PL	Programação Linear
PO	Pesquisa Operacional
TQC	Controle de Qualidade Total

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	13
1.4 ORGANIZAÇÃO DO CONTEÚDO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)	15
2.1.1 Técnicas de Planejamento e Controle de Produção	18
2.2 PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO	20
2.3 PESQUISA OPERACIONAL	21
2.3.1 Programação Linear Inteira	22
2.3.1.1 Modelo do Transporte	26
2.3.1.2 Modelo de Planejamento da Produção	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
4 MODELO MATEMÁTICO	43
5 APLICATIVO PLAN_PRO	51
5.1 FUNÇÕES E USO DO APLICATIVO	52
6 INTERPRETAÇÃO DO APLICATIVO PLAN_PRO: UMA ANÁLISE DE CENÁRIOS	61
6.1 PRIMEIRO CENÁRIO	61
6.2 SEGUNDO CENÁRIO	73
7 CONCLUSÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICES	86

1 INTRODUÇÃO

A área temática escolhida para o desenvolvimento do trabalho é o modelo de transporte e seu uso como técnica para o planejamento da produção.

“Problemas na área de produção em geral são decompostos hierarquicamente em três níveis: estratégico, tático e operacional.” (ARENALES *et al.*, 2007, p. 205). O mais alto dos níveis é o estratégico, onde as decisões são de longo prazo e altos investimentos estão envolvidos. O nível tático aborda o planejamento de atividades, formado por dois subníveis: planejamento agregado da produção e planejamento de quantidades de produção. O nível operacional envolve as atividades diárias, a sequência de processamento das tarefas e quando será processada cada uma dessas tarefas.

Para Arenales *et al.* (2007) geralmente um bom plano de produção é aquele que atende as demandas dentro do prazo, respeita a capacidade dos recursos disponíveis e minimiza os custos de produção. A Pesquisa Operacional (PO) busca através da modelagem matemática e da sua otimização, encontrar a melhor solução para o problema proposto.

De acordo com Andrade (2002), a Pesquisa Operacional com um enfoque mais clássico, é definida como a arte de aplicar técnicas de modelagem a problemas de decisão, por meio de métodos matemáticos e estatísticos buscando encontrar a solução ótima de maneira sistêmica. Já dentro de um enfoque atual a PO leva em consideração as interações com o ambiente interno e externo para a formulação da modelagem de um problema. Pretende-se no trabalho utilizar o enfoque atual da Pesquisa Operacional, tendo em vista que quanto mais próximo da realidade for o modelo, melhor ele irá atender as necessidades do problema.

O problema de transporte clássico refere-se à distribuição dos produtos das indústrias ao mercado consumidor, de maneira que o custo total seja o menor possível, além de respeitar os limites de oferta e atender às demandas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do trabalho é propor o uso do modelo de transporte como ferramenta de apoio à decisão para problemas de planejamento da produção.

1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo principal é desdobrado nos seguintes objetivos específicos:

- Adaptar o modelo do transporte ao Planejamento da Produção;
- Desenvolver aplicativo;
- Testar a robustez do aplicativo em diferentes cenários.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dentre os modelos de PO, o modelo do transporte foi escolhido como método para resolução de problemas de produção porque é possível, através de uma adaptação que será proposta, utilizá-lo no planejamento da produção, com uma apresentação visual diferenciada, uma matriz de custos e uma matriz de decisão, servindo como ferramenta de apoio à decisão, e suporte à gestão da produção, ou seja, este trabalho procura além de resolver um problema, satisfazer uma necessidade de mercado. Além disso, é encontrado na bibliografia o uso do modelo do transporte para o planejamento de produção, porém não é encontrado o uso do modelo para vários itens e vários recursos, o que este trabalho se propõe a fazer.

A partir do contexto acima se pode apresentar a pergunta de pesquisa: como utilizar o modelo de transporte para solucionar problemas de planejamento e controle da produção com horizonte de planejamento de médio prazo?

A hipótese levantada neste trabalho é de que o modelo do transporte, em virtude da forma com que é elaborado, proporcione uma análise simplificada e com outra visão do planejamento e controle da produção e suas várias situações.

O método utilizado para o desenvolvimento deste estudo é a modelagem porque descreve matematicamente um sistema produtivo, especificamente modelos de programação matemática determinísticos, através da programação linear inteira, seguindo o modelo proposto por Belfiore e Fávero (2013) e semelhante ao de outros autores para desenvolvimento de trabalhos de Pesquisa Operacional.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho está limitado ao planejamento agregado da produção, com horizonte de planejamento de médio prazo, e com foco nas micro e pequenas empresas tanto as que produzem por encomenda quanto as que produzem para estoque. O planejamento agregado não considera a sequência das atividades do processo de produção.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO CONTEÚDO

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: o primeiro capítulo faz introdução ao tema, o segundo capítulo apresenta a revisão de literatura dos conceitos necessários para o bom entendimento deste estudo, o terceiro capítulo apresenta qual o método utilizado no desenvolvimento do trabalho, o quarto capítulo apresenta o modelo matemático, o quinto capítulo apresenta o

aplicativo, o sexto capítulo mostra a análise de cenários, ou seja, como se comporta o aplicativo em diferentes situações e por fim o sétimo capítulo apresenta as conclusões.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesse capítulo será apresentada uma revisão preliminar dos conceitos indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)

Corrêa *et al.* (2007) empresta conceitos econômicos ao dizer que uma empresa existe para reproduzir o seu capital, o que em situação de competitividade acirrada se traduz em “ser competitivo” que os autores definem como ser capaz de superar a concorrência naqueles aspectos de desempenho que os nichos de mercado visados mais valorizam. Os aspectos de desempenho são: custo percebido pelo cliente; velocidade de entrega; confiabilidade de entrega; flexibilidade das saídas; qualidade dos produtos; e serviços prestados ao cliente. Todos esses aspectos são influenciados pelas decisões de planejamento e controle de produção, e têm um impacto estratégico na competitividade da organização.

“Planejamento e Controle diz respeito à conciliação entre o que o mercado requer e o que as operações podem fornecer.” (SLACK *et al.*, 2009, p. 283).

O crescimento das indústrias de produção de bens de consumo trouxe consigo a necessidade de um planejamento e controle de atividades mais elaborado do que o apenas baseado na experiência do executor, o aumento da variedade de produtos e de sua complexidade exige uma ferramenta que sirva de suporte aos planejadores da produção. De acordo com Lutosa *et al.* (2008) dessa evolução surgiram o MRP (*Materials Requirements Planning*), o MRP II (*Manufacturing Resources Planning*), o ERP (*Enterprise Resources Planning*), e atualmente o APS (*Advanced Planning System*).

“O PCP é responsável pela coordenação e aplicação dos recursos produtivos de modo a atender da melhor forma possível aos planos

estabelecidos nos níveis estratégico, tático e operacional.” (LUTOSA *et al.*, 2008, p. 7).

De acordo com Lutosa *et al.* (2008, p. 10) o PCP atua nos três níveis hierárquicos da organização, estratégico, tático e operacional, que são associados aos horizontes de tempo de planejamento, longo prazo, médio prazo e curto prazo, respectivamente. Tubino (2009, p. 1) explica que a longo prazo os sistemas produtivos montam um Plano de Produção, o qual a partir da previsão da demanda consegue prever a capacidade de produção necessária para atender seus clientes. A médio prazo é elaborado o Plano-mestre de Produção onde é planejado o uso da capacidade instalada para atender os pedidos em carteira e a previsão de vendas de médio prazo. A curto prazo é executada a Programação da Produção para produzir os bens e entregá-los aos clientes.

O departamento da organização responsável pelo planejamento e controle da produção, também chamado de PCP, para desempenhar a sua função interage com diversas áreas do sistema produtivo, que gera um complexo fluxo de informações.

Tubino (2009) divide em quatro as funções básicas do PCP, são elas: Planejamento Estratégico da Produção, Planejamento Mestre da Produção, Programação da Produção e Acompanhamento e Controle da Produção. De acordo com o autor normalmente a previsão da demanda é uma atividade pela qual o departamento de Marketing ou Vendas é responsável, no entanto em empresas de pequeno e médio porte onde não existem departamentos específicos ou bem definidos, os responsáveis pelo planejamento e controle da produção são também responsáveis pela previsão da demanda.

A previsão da demanda é uma das principais informações utilizadas no processo de planejamento, permite que ações relativas à capacidade, fluxo de caixa, vendas, produção e estoque, mão de obra e compras sejam planejadas de acordo com a necessidade.

O Planejamento Estratégico da Produção gera a partir da estratégia competitiva da organização o Plano de Produção, que trabalha em longo prazo e segundo Tubino (2009, p. 3) tem como objetivo adequar os recursos produtivos à demanda esperada, procurando atingir critérios estratégicos de desempenho (custo, qualidade, confiabilidade, pontualidade e flexibilidade). A

análise de cenários durante essa etapa auxilia na decisão entre fabricar internamente ou terceirizar, do nível de capacidade com o qual a empresa deve operar, e qual o momento de alteração dessa capacidade, essas decisões estão fortemente ligadas à estratégia de estoques da organização e a flexibilidade de suprimento.

O planejamento agregado da produção é considerado por alguns autores como parte do planejamento estratégico e por outros do planejamento tático. Independente da sua classificação, o planejamento agregado é importante para o planejamento e controle da produção pois de acordo com Gaither e Frazier (2002), desenvolve planos de produção com objetivo de determinar níveis de produção em unidades agregadas ao longo de um horizonte de tempo de médio prazo, faz referência a estoque agregado, utilidades, modificações de instalações e contratos de fornecimentos de materiais.

O Planejamento-mestre da Produção conforme Lutosa *et al.* (2008, p. 130) tem como objetivo determinar quando e quanto deverá ser feito de cada produto, considerando informações de estoques de produtos acabados, pedidos em carteira, previsão de vendas, *lead time* de produção e o tamanho dos lotes. Diferente do Planejamento Estratégico da produção que trabalha com o horizonte de tempo de longo prazo e famílias de produtos, o Planejamento-mestre da Produção trabalha a médio prazo com os produtos finais especificados. Nessa etapa é feita a análise e validação da capacidade, onde se verifica a viabilidade do Plano Mestre de Produção (PMP) e se sim autorizado o seu prosseguimento.

“A Programação da Produção estabelece a curto prazo quanto e quando comprar, fabricar ou montar de cada item necessário à composição dos produtos finais” (TUBINO, 2009, p. 4). Com base nessas definições são emitidas Ordens de Compra, Ordens de Fabricação e Ordens de Montagem e ainda de acordo com Tubino (2009, p. 4) o PCP faz o sequenciamento das ordens emitidas de forma a otimizar os recursos utilizados.

O Acompanhamento e Controle da Produção ajudam a garantir o cumprimento da Programação da Produção, através de análise dos dados coletados, normalmente por processos automatizados. Essa atividade segundo Tubino (2009, p. 163) fornece uma ligação entre o planejamento e a execução

das atividades operacionais, identifica os desvios e sua proporção e fornece subsídios para que os responsáveis pelas ações corretivas possam agir. Quanto mais eficientes forem as ações corretivas, menores serão os desvios e conseqüentemente o tempo e as despesas gastos com essas ações.

2.1.1 Técnicas de Planejamento e Controle de Produção

Corrêa *et. al* (2007) cita as três principais técnicas e lógicas, mais usadas ao longo dos últimos 20 anos com a finalidade de planejamento e controle de produção: os sistemas MRP II/ ERP, os sistemas *Just in Time*, e os sistemas de programação com capacidade finita, que utilizam as técnicas de simulação em computador.

Os autores ainda apresentam várias técnicas específicas para cada etapa do planejamento e controle de produção:

- Para o Planejamento Estratégico da Produção Tubino (2009) divide em duas categorias, técnicas matemáticas e técnicas informais de tentativa e erro, Lutosa *et al.* (2008) que chama essa atividade de Planejamento Agregado apresenta as técnicas intuitiva e gráfica e programação matemática, que apesar de não ter o mesmo nome, têm os mesmos princípios que as apresentadas por Tubino;
- Para o Planejamento-mestre da Produção Lutosa *et al.* (2008) e Tubino (2009) definem como técnica as planilhas de cálculo;
- Para o Planejamento das Necessidades de Materiais, no caso de sistemas de produção em lotes, os autores citam o MRP e suas evoluções MRP II, ERP e ERP II. Essa etapa é considerada por Tubino (2009) com sendo uma das atividades da Programação da Produção.
- Para Programação da Produção Lutosa *et al.* (2008) apresenta as regras de sequenciamento Primeira a Entrar, Primeira a Sair (PEPS), Menor Tempo de Processamento (MTP), Menor Data Entrega (MDE), o algoritmo de Moore para programação em uma

única máquina, o algoritmo LPT para máquinas em paralelo e o algoritmo de Johnson para duas máquinas em série. Tubino (2008) que divide essa atividade em administração dos estoques, sequenciamento e emissão e liberação de ordens acrescenta às regras de sequenciamento o Índice de Prioridade (IPI), o Índice Crítico (ICR), o Índice de Folga (IFD) e o Índice de Falta (IFA), expõe como técnica para sequenciamento o sistema *Advanced Planning and Scheduling* (APS), para administração de estoques apresenta fórmulas para calcular o tamanho dos lotes de reposição e o tamanho dos estoques de segurança de forma a minimizar os custos;

- Por fim para o Acompanhamento e Controle de Produção Lutosa *et al.* (2008) apresenta técnicas para controle, todas elas são perfeitamente aplicáveis para auxiliar no controle da gestão empresarial e também dos processos produtivos, entretanto algumas técnicas são mais adequadas para determinadas atividades do que outras (FIGURA 1). Tubino (2009) apresenta como técnica de controle de estoques o modelo baseado no ponto de pedido, nas revisões periódicas, e o modelo baseado no MRP, para acompanhamento e controle da produção o autor destaca o controle sob a ótica do Controle de Qualidade Total (TQC), o ciclo PDCA que é o método de gerenciamento da qualidade proposto pelo TQC, e o plano de ação 5W1H como apoio ao desenvolvimento de medidas de desempenho para avaliação dos processos produtivos.

Em se tratando de técnicas utilizadas atualmente pelas indústrias Tubino (2009, p. 80) menciona a visão moderna de gestão da cadeia de suprimentos, que busca a redução de tempos e custos do processo de reposição e envolve o relacionamento de longo prazo com fornecedores. Esta nova forma de pensar e trabalhar é chamada de PCP conjunto e utiliza a ferramenta Intercâmbio Eletrônico de Dados (EDI) para a troca de documentos.

A Pesquisa Operacional está inserida nos modelos matemáticos dos métodos quantitativos, como é a técnica utilizada neste trabalho seu conceito e modelos serão aprofundados nos subcapítulos a seguir. De acordo com

Vollmann et. al (2006), essa abordagem é substancialmente mais sofisticada do que a prática encontrada na maioria das firmas.

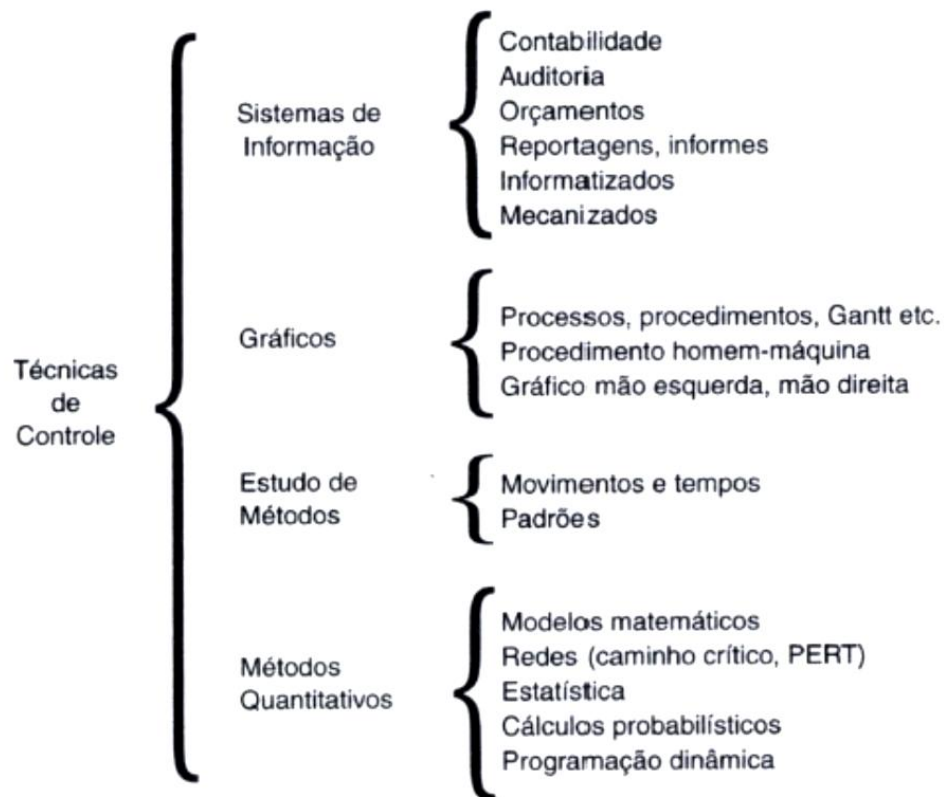


FIGURA 1 - Técnicas diversas de controle agrupadas segundo áreas do saber.
 FONTE: Lutosa *et al.* (2008).

2.2 PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO

Simon (1965) define o processo decisório como processo de pensamento e ação que culminará em uma escolha, ou seja, seleciona cursos alternativos de ações ou aceita ou rejeita uma ação específica.

Corrêa *et. al* (2007, pg. 2) afirma que os sistemas de administração da produção para cumprirem seu papel de suportar o cumprimento dos objetivos estratégicos da organização, devem servir como apoio ao tomador de decisões para:

- Planejar necessidades futuras de capacidade produtiva da organização;
- Planejar a compra de materiais;

- Planejar os níveis adequados de estoque de matéria-prima, e produto acabado no momento certo;
- Programar atividades de produção que garantam a correta utilização dos recursos;
- Ser capaz de saber e informar a situação dos recursos e ordens;
- Ser capaz de prometer e cumprir os menores prazos possíveis;
- Ser capaz de reagir de forma eficaz.

2.3 PESQUISA OPERACIONAL

Segundo Belfiore e Fávero (2013) a Pesquisa Operacional surgiu durante a segunda guerra mundial para solucionar problemas de logística tática e estratégia militar. Com a disseminação da Pesquisa Operacional essa técnica vem sendo utilizada para otimizar processos em vários segmentos. De acordo com Hillier e Lieberman (2010) a Pesquisa Operacional utiliza o método científico para investigar problemas empresariais, onde o problema é observado e os dados coletados para então construir-se um modelo matemático. Andrade (2009), explica que a abordagem atual, das últimas décadas, de problemas de pesquisa operacional considera o enfoque qualitativo da pesquisa operacional, que é o reconhecimento de que a abordagem quantitativa dos problemas fornece uma estrutura de raciocínio e análise que nos permite desenvolver a visão sistêmica do processo, essa abordagem serve de suporte aos tomadores de decisões.

Belfiore e Fávero (2013) propõe uma classificação da Pesquisa Operacional: modelos determinísticos, modelos estocásticos e outras técnicas (FIGURA 2).

Este trabalho utiliza modelos determinísticos de programação linear inteira para elaboração da proposta, os conceitos são apresentados a seguir.

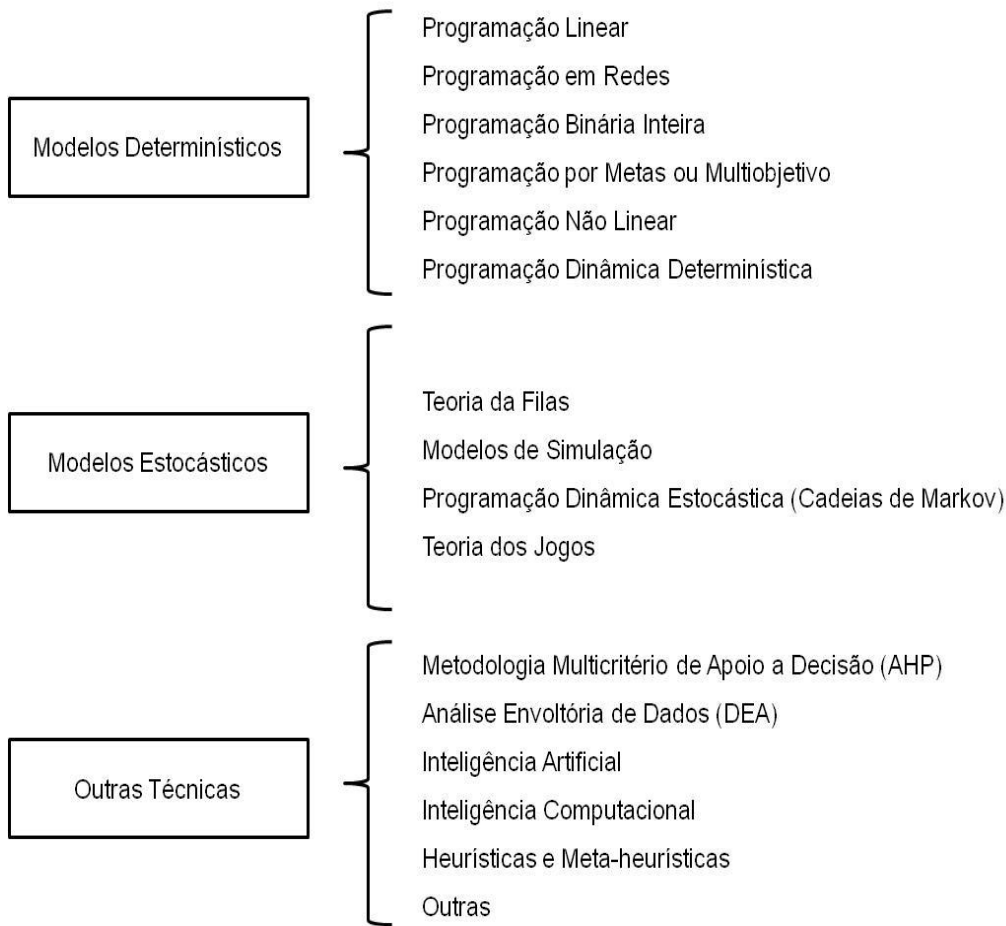


FIGURA 2 - Ferramentas da Pesquisa Operacional.
 FONTE: Belfiore e Fávero (2013).

2.3.1 Programação Linear Inteira

A Programação Linear (PL) trata de problemas onde uma função linear deve ser otimizada (maximizada ou minimizada) e as variáveis estão sujeitas a restrições lineares de igualdade e desigualdade (MURTY, 1985, p. 1).

De acordo com Colin (2007) e Dantzig e Thapa (1997), de modo geral a programação linear trata do problema de alocação ótima (onde não há outra solução melhor do que a oferecida) de recursos escassos (recursos de existência finita) para a realização de atividades. Essa ferramenta utiliza um modelo geral para resolver problemas de otimização, que contempla: as variáveis de decisão, os parâmetros, a função-objetivo, as restrições e um modelo que representa o problema real utilizando funções lineares. Existem soluções viáveis, inviáveis e ótimas.

Nos modelos de otimização linear são admitidas algumas hipóteses às quais as grandezas envolvidas devem obedecer. Para Taha (2008) essas propriedades são a proporcionalidade, a aditividade e a certeza. Para Arenales *et. al* (2007) são a aditividade, a proporcionalidade e o fracionamento. E por fim, para Colin (2007) as suposições são a divisibilidade, a aditividade, a proporcionalidade e a certeza. A proporcionalidade indica que a contribuição de cada variável de decisão é diretamente proporcional ao valor da variável. A aditividade pressupõe que o todo é igual à soma das partes. A certeza indica que todos os parâmetros utilizados nos modelos são conhecidos com certeza. E o fracionamento ou divisibilidade indica que são aceitáveis valores fracionários para as variáveis.

Murty (1985) apresenta duas abordagens para formulação de um problema de programação linear: a abordagem direta e a abordagem *input-output* (entrada-saída). A abordagem direta é dividida em dois passos, o primeiro passo é preparar uma lista de todas as variáveis de decisão, cada variável de decisão tem uma grandeza associada a ela, o segundo passo é escrever as restrições e a função objetivo do problema, ao escrever as restrições deve-se satisfazer algumas suposições, a proporcionalidade, a aditividade e a continuidade da variação (equivalente à certeza e o fracionamento ou divisibilidade apresentados pelos outros autores). Na abordagem *input-output* é primeiramente preparada a lista das possíveis atividades e itens que definem as restrições, cada atividade tem uma unidade de medida, o que ajuda a definir as variáveis do problema, um item é um recurso com disponibilidade limitada, cada item define uma restrição, e a lista de itens deve incluir um item que determina a função objetivo (normalmente o custo, considerado entrada se usado para realização de uma atividade e saída se for resultado de uma atividade), os dados são organizados em uma tabela para formular o problema.

Dantzig e Thapa (1997) apresentam a definição matemática de programação linear na forma padrão que busca encontrar valores de $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$ de modo a minimizar a função z satisfazendo:

- Os parâmetros podem ser controlados até certo ponto com algum custo, nesse caso é interessante saber quais os efeitos e quanto custariam essas mudanças;
- Mesmo que os parâmetros não sejam controláveis, seus valores podem ser apenas aproximados, o que torna importante saber para até que variação de seus valores a solução continua sendo ótima. Se a solução for extremamente sensível pode ser necessário buscar por melhores estimativas.

A programação inteira (PI) é também conhecida como programação combinatória e otimização discreta.

De acordo com Arenales et. al (2007) a programação inteira pode ser subdividida em: Programação (linear) inteira mista (problema com variáveis inteiras e reais), programação (linear) inteira pura (onde todas as variáveis são inteiras) e programação 0-1 ou programação binária (se todas as variáveis assumem valores 0 ou 1). Murty (1985) diz que problemas de programação inteira são formulados como problemas de programação linear adicionando restrições de que algumas ou todas as variáveis de decisão podem assumir apenas valores inteiros, o autor divide esses problemas nas duas classes: programação inteira pura e programação inteira mista, e as subdivide em problemas binários e problemas gerais de variáveis de decisão inteiras não negativas.

Para Colin (2007) teoricamente um problema de PI pode ser visto como um problema de PL mais a restrição de que as variáveis devem ser inteiras, sendo assim a relaxação de PL de um problema de PI é o problema de PI com omissão das restrições que dizem que as variáveis devem ser inteiras. Com isso temos que para problemas de maximização $o(\text{valor ótimo da relaxação de PL de um problema de PI}) \geq (\text{valor ótimo do problema de PI})$ enquanto que para um problema de minimização, temos que $(\text{valor ótimo da relaxação de PL de um problema de PI}) \leq (\text{valor ótimo do problema de PI})$.

Nos problemas práticos, atividades e recursos, por exemplo, máquinas, navios e operadores são indivisíveis, além de demandarem decisões do tipo sim ou não, é onde surge a necessidade de utilizar a programação linear inteira.

Existem diversas técnicas de solução de modelos de programação inteira, que podem ser encontradas em Hillier e Lieberman (2010), tais como *Branch-and-Bound* e técnicas de planos de corte.

2.3.1.1 Modelo do Transporte

O modelo dos transportes é um modelo de programação linear e “tem por objetivo minimizar o custo total do transporte necessário para abastecer n centros consumidores (destinos), a partir de m centros fornecedores (origens),” (PUCCINI, 1976, pg. 42).

Sendo as variáveis:

- c_{ij} - custo unitário de transporte da origem i para o destino j ;
- a_i - quantidade disponível na origem i ;
- b_j - quantidade requerida no destino j ;
- x_{ij} - quantidade a ser transportada da origem i para o destino j ;

A função objetivo (3) consiste em achar os valores de x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$ e $j = 1, 2, \dots, n$) que minimize o custo total do transporte:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \text{ e } (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

Onde as m restrições de oferta, uma de cada origem, garante que a quantidade que sai da origem i tem que ser menor ou igual à quantidade a_i

disponível naquela origem (4), as n restrições de demanda, uma de cada destino, garante que a quantidade que chega a cada destino j tem de ser igual à quantidade b_j requerida por aquele destino (5).

A adaptação do modelo do transporte para que esse solucione problemas de planejamento e controle da produção é apresentada no decorrer deste trabalho.

Dantzig e Thapa (1997) apresentam a estrutura do problema de transporte que é explorada para calcular uma solução básica inicial facilmente, e melhorar a solução até que a solução ótima seja encontrada (FIGURA 3).

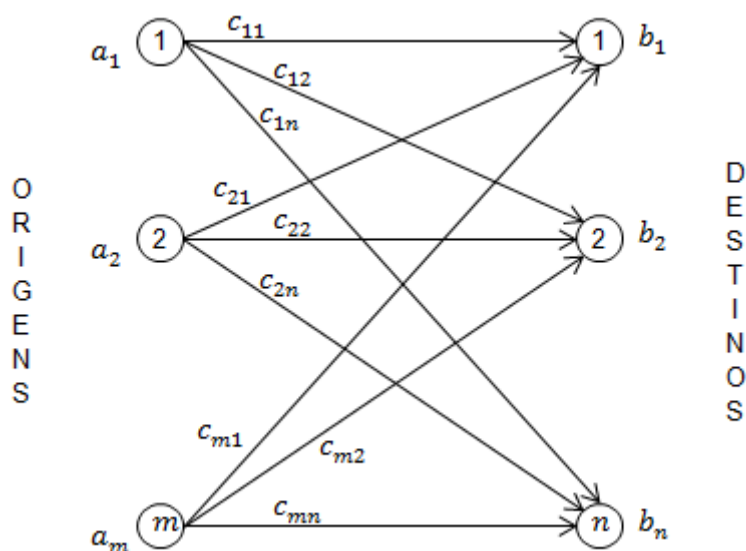


FIGURA 3 - Estrutura do Problema do Transporte.
FONTE: Dantzig e Thapa (1997).

Puccini (1976), assim como os outros autores citados, apresenta a forma de solucionar os problemas do transporte. Inicialmente o modelo é representado através de um quadro, o quadro de soluções (QUADRO 1), ou a matriz de decisão.

Além desse quadro, é elaborado também o quadro de custos (QUADRO 2), ou matriz de custos.

Puccini (1976) diz que problemas de programação linear, mesmo que não envolva o transporte de mercadorias, onde os recursos disponíveis e as quantidades necessárias destes recursos são expressos em termos de um só

tipo de unidade, podem ser resolvidos pelo algoritmo do transporte, encontrado em Belfiore e Favero (2013), desde que tenham o aspecto do modelo do transporte apresentado em (3) – (6).

		Destinos					
		1	2	3	...	n	Oferta
Origens	1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1n}	a_1
	2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2n}	a_2
	3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	...	x_{3n}	a_3

	m	x_{m1}	x_{m2}	x_{m3}	...	x_{mn}	a_m
	Demanda	b_1	b_2	b_3	...	b_n	

QUADRO 1 - Quadro de Soluções.

FONTE: Puccini (1976).

		Destinos					
		1	2	3	...	n	Oferta
Origens	1	c_{11}	c_{12}	c_{13}	...	c_{1n}	a_1
	2	c_{21}	c_{22}	c_{23}	...	c_{2n}	a_2
	3	c_{31}	c_{32}	c_{33}	...	c_{3n}	a_3

	m	c_{m1}	c_{m2}	c_{m3}	...	c_{mn}	a_m
	Demanda	b_1	b_2	b_3	...	b_n	

QUADRO 2 - Quadro de Custos.

FONTE: Puccini (1976).

Admite-se a igualdade entre a oferta total e a demanda total (7):

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (7)$$

Nos casos em que a oferta total é diferente da demanda total, para manter o equilíbrio cria-se uma origem ou destino fictício, um destino quando a oferta é maior que a demanda, e nesse caso o que for para o destino fictício será na verdade estocado, e uma origem quando a oferta é menor que a

demanda, e nesse caso a demanda atendida pela origem fictícia na verdade não será atendida.

Belfiore e Fávero (2013) representam os dois quadros propostos por Puccini (1976) em um único quadro (QUADRO 3).

		Consumidor					Capacidade
		1	2	...	n		
Fornecedor	1	x_{11} c_{11}	x_{12} c_{12}	...	x_{1n} c_{1n}	Cf_1	
	2	x_{21} c_{21}	x_{22} c_{22}	...	x_{2n} c_{2n}	Cf_2	
	
	m	x_{m1} c_{m1}	x_{m2} c_{m2}	...	x_{mn} c_{mn}	Cf_m	
	Demanda	d_1	d_2	...	d_n		

QUADRO 3 - Forma Tabular Geral do Problema do Transporte Balanceado.
 FONTE: Belfiore e Favero (2013).

2.3.1.2 Modelo de Planejamento da Produção

Arenales *et. al* (2007) apresenta os principais modelos de planejamento de produção, conhecidos também como modelos de dimensionamento de lotes (*lot sizing*), horizonte de planejamento finito e dividido em períodos e demanda de cada item variando ao longo do horizonte de planejamento são características comuns entre os modelos. Para todos os modelos são considerados os seguintes parâmetros:

d_{it} = demanda do item i no período t ;

b_i = tempo para produzir uma unidade do item i , em horas;

C_t = capacidade de produção em horas de uma máquina ou instalação no período t ;

sp_i = tempo de preparação de máquina para processar o item i , em horas;

s_i = custo de preparação do item i ;

h_i = custo unitário de estoque do item i por período;

I_{i0} = estoque inicial do item i ;

n = número de itens finais;

T = número de períodos do horizonte de planejamento;

São consideradas também as seguintes variáveis:

x_{it} = quantidade do item i produzida no período t (tamanho do lote);

I_{it} = estoque do item i no fim do período t ;

$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{se o item } i \text{ é produzido no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

O modelo mais simples é o de um único item sem restrição de capacidade:

$$\min \sum_{t=1}^T (sy_t + hI_t) \quad (8)$$

$$I_t = I_{t-1} + x_t - d_t, \quad t = 1, \dots, T, \quad I_0 = I_T = 0 \quad (9)$$

$$x_t \leq \left(\sum_{\tau=t}^T d_\tau \right) y_t, \quad t = 1, \dots, T, \quad (10)$$

$$x \in R_+^T, \quad I \in R_+^T, \quad y \in B^T \quad (11)$$

A função objetivo minimiza o custo total de preparação e estoque (8). As restrições representam o balanceamento do estoque em cada período (9), garantem que a produção em cada período seja limitada superiormente pela demanda acumulada e que o tamanho do lote seja positivo, somente se houver produção no período ($y_t = 1$) (10). A restrição (11) indica o tipo das variáveis.

Esse modelo é limitado pois, por ser para um único item e sem restrição de capacidade, não representa a realidade dos problemas de produção.

Em casos que a demanda pode ser atendida com atraso, o que só tem sentido se houver restrição de capacidade, modifica-se o modelo incluindo uma penalidade δ por unidade de demanda não atendida no período t :

I_t^+ = estoque no fim do período t

I_t^- = falta (demanda não atendida) no período t

$$\min \sum_{t=1}^T (sy_t + hI_t^+ + \delta I_t^-) \quad (12)$$

$$I_t^+ - I_t^- = I_{t-1}^+ - I_{t-1}^- + x_t - d_t, \quad t = 1, \dots, T, \quad I_0^+ = I_0^- = 0 \quad (13)$$

$$x_t \leq \left(\sum_{\tau=t}^T d_\tau \right) y_t, \quad t = 1, \dots, T, \quad (14)$$

$$(sp \cdot y_t + bx_t) \leq C_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (15)$$

$$x \in R_+^T, \quad I^+ \in R_+^T, \quad I^- \in R_+^T, \quad y \in B^T \quad (16)$$

A função objetivo minimiza o custo total de preparação, estoque e demanda não atendida (12), a restrição (13) leva em consideração a demanda não atendida, e a (14), associa a quantidade x_t com a variável de decisão de produção y_t , a restrição (15) limita a produção à capacidade disponível no período considerando o tempo de preparação, a restrição (16) define as variáveis.

Esse modelo permite o não atendimento da demanda no período, representado pela variável I_t^- . Se a variável de estoque I não for livre, o modelo responde com infactibilidade se a capacidade não for suficiente para atender a demanda do período.

O modelo para múltiplos itens e restrição de capacidade é:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (s_i y_{it} + h_i I_{it}) \quad (17)$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + x_{it} - d_{it}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n (sp_i y_{it} + b_i x_{it}) \leq C_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (19)$$

$$x_{it} \leq M_{it} y_{it}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (20)$$

$$M_{it} = \min \left\{ \frac{C_t - sp_i}{b_i}, \sum_{\tau=t}^T d_{i\tau} \right\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (21)$$

$$x \in R_+^{nT}, \quad I \in R_+^{nT}, \quad y \in B^{nT} \quad (22)$$

A função objetivo minimiza o custo total de preparação e estoque (17), as restrições correspondem ao balanceamento do estoque de cada item i em

cada período t (18), a limitação, em cada período t , do tempo total de preparação e produção pela capacidade disponível (19), que $x_{it} = 0$ somente se $y_{it} = 0$ (20). M_{it} é o mínimo entre a capacidade restante no período t se i é produzido nesse período e a demanda acumulada do período t ao período T (21).

Esses modelos consideram apenas um recurso produtivo.

Para múltiplos níveis, ou seja, quando um item final utiliza itens componentes, a produção requer vários recursos, são considerados os parâmetros adicionais:

d_{it} = demanda independente do item i (final ou componente) no período t ;

r_{ij} = número de itens i necessários para produzir uma unidade do item j ;

S_i = conjunto de sucessores imediatos do item i , ou seja, o conjunto dos próximos componentes a serem montados;

K = número de recursos;

R_k = conjunto de índices de itens que usam o recurso k ;

b_{ki} = capacidade necessária do recurso k para produzir uma unidade do item i ;

C_{kt} = capacidade do recurso k disponível no período t ;

O modelo matemático é:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (s_i y_{it} + h_i I_{it}) \quad (23)$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + x_{it} - \sum_{j \in S_i} r_{ij} x_{jt} - d_{it}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^n (sp_i y_{it} + b_{ki} x_{it}) \leq C_{kt}, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$x_{it} \leq M_{it} y_{it}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (26)$$

$$M_{it} = \min \left\{ \left(\min_{k: i \in R_k} \frac{C_{kt} - sp_i}{b_{ki}} \right), \sum_{\tau=j}^T d_{it} \right\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (27)$$

$$x \in R_+^{nT}, \quad I \in R_+^{nT}, \quad y \in B^{nT} \quad (28)$$

A função objetivo assim como as anteriores minimiza o custo total de preparação e estoque (23). A restrição (24) corresponde ao balanceamento de estoque de cada item em cada período, onde a somatória do lado direito corresponde à demanda dependente. A restrição (25) mostra que em cada período t e para cada recurso k , o tempo total de preparação e produção é limitado pela capacidade disponível C_{kt} . A restrição (26) garante que $x_{it} = 0$ somente se $y_{it} = 0$. M_{it} corresponde a máxima quantidade de produção do item i no período t (27).

Esse modelo com múltiplos níveis é normalmente utilizado quando um item componente é utilizado na produção de um item final, o item componente também pode ser um item final.

Por fim o modelo mais complexo apresentado pelo autor é o para múltiplos itens, com restrição de capacidade e preservação de preparação, isto é, o estado de preparação do último item produzido no período $t - 1$ é mantido no início do período t para continuar a produção desse item, esse modelo se faz necessário quando os tempos e custos de preparação são elevados:

$$w_{it} = \begin{cases} 1 & \text{se o estado de preparação para o produto } i \text{ continua do período } t - 1 \\ & \text{ao período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$q_{tk} = \begin{cases} 1 & \text{se não existe preparação de itens em } t, \text{ que utilizam o recurso } k, \text{ dado} \\ & \text{que a preparação de um item específico ocorreu em } t - 1 \text{ e é mantida} \\ & \text{até } t + 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A diferença entre as duas últimas variáveis é que a variável w_{it} relaciona a preparação do produto i no período t ao período anterior $t - 1$, já a variável q_{tk} relaciona o estado de preparação no período t ao período $t - 2$ considerando que o estado de preparação possa ser mantido no período $t - 1$.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (s_i y_{it} + h_i I_{it}) \quad (29)$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + x_{it} - d_{it}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (30)$$

$$\sum_{i \in R_k} (sp_i y_{it} + b_{ki} x_{it}) \leq C_{kt}, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T \quad (31)$$

$$\sum_{i \in R_k} w_{it} \leq 1, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 2, \dots, T \quad (32)$$

$$w_{it} \leq y_{i,t-1} + w_{i,t-1}, \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 2, \dots, T \quad (33)$$

$$w_{i,t+1} + w_{it} \leq 1 + q_{tk}, \quad k = 1, \dots, K, \quad i \in R_k, \quad t = 1, \dots, T - 1 \quad (34)$$

$$y_{it} + q_{tk} \leq 1, \quad k = 1, \dots, K, \quad i \in R_k, \quad t = 1, \dots, T \quad (35)$$

$$x_{it} \leq M_{it}(y_{it} + w_{it}), \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (36)$$

$$q_{tk} \geq 0, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T - 1, \quad (q_{1k} = q_{Tk} = 0) \quad (37)$$

$$w_{it} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, T \quad (w_{it} = 0) \quad (38)$$

$$x \in R_+^{nT}, \quad I \in R_+^{nT}, \quad y \in B^{nT} \quad (39)$$

As equações (29), (30) e (31) são equivalentes as do modelo anterior (23), (24) e (25). A restrição (32) garante que para cada recurso k no máximo uma preparação é preservada de um período para o próximo. A restrição (33) garante que não existe uma preparação preservada no período t ($w_{it} = 0$) somente se o item i não foi preparado em $t - 1$ ($y_{i,t-1} = 0$) e a preparação não foi preservada do período $t - 2$ ao período $t - 1$ ($w_{i,t-1} = 0$). A restrição (34) estabelece que uma preparação possa ser mantida por dois períodos consecutivos t e $t + 1$, ou seja, $q_{tk} = 1$ se $w_{it} = 1$ e $w_{i,t+1} = 1$, a variável q_{tk} foi relaxada pois a restrição (35) garante que ela é binária, a restrição (35) garante que isso é possível se não existir preparação nesse período, ou existe decisão de produção e custo associado ($y_{it} = 1$) ou existe manutenção da preparação ($q_{tk} = 1$). A restrição (36) garante que a produção do item i no período t pode ocorrer se o item estiver preparado no período t ($y_{it} = 1$) ou se a preparação em $t - 1$ foi preservada ($w_{it} = 1$). A produção máxima M_{it} do item i no período t é dada pela equação (27), as equações (37), (38) e (39) indicam o tipo das variáveis.

Este modelo é utilizado para programação da produção, com horizonte de curto prazo.

Alguns trabalhos encontrados que utilizam adaptações dos modelos acima são descritos a seguir:

Munhoz e Morabito (2013) solucionam o planejamento agregado de produção de sucos concentrados congelados de laranja com uma abordagem de otimização robusta baseada em um modelo determinístico de programação linear com múltiplos produtos, estágios e períodos proposto em Munhoz e Morabito (2010).

Junqueira e Morabito (2006) propõem um modelo de otimização linear para auxiliar nas decisões do planejamento tático da produção, estocagem e transporte de sementes de milho.

Fernandes *et. al* (2013) combina o modelo de otimização de programação linear inteira com a simulação para o planejamento e controle da produção de cilindros para laminação.

Esses são somente alguns modelos para problema de produção. Na prática, em situações empresariais dificilmente utiliza-se o algoritmo Branch-and-Bound para resolver os modelos de planejamento da produção, devido a grande quantidade de variáveis mistas envolvidas. Nos artigos pesquisados observa-se a utilização de metaheurísticas, alguns são apresentados a seguir.

Wu, Shi e Akartunali (2013) propõem a formulação de programação inteira mista para modelar o problema de dimensionamento de lotes capacitado, de múltiplos níveis e com *backlogging* e conservação da preparação. Baseado na formulação do modelo é proposta uma estrutura de decomposição heurística. Os resultados computacionais mostram que a proposta fornece soluções competitivas em um tempo razoável. Os autores tem como base o modelo de programação inteira mista proposto por Billington *et al.* (1983), que foi aprimorado posteriormente por outros pesquisadores:

T = número de períodos no horizonte de planejamento;

M = número de recursos produtivos ou máquinas;

I = número de itens (componentes e/ou finais);

t = índice do período de tempo $t \in [1, T]$;

m = índice de máquinas $m \in [1, M]$;

i, j = índice dos itens $i \in [1, I]$;

$endp$ = conjunto de itens finais (itens com demanda externa, *backlogging* permitido);

$endp_i$ = conjunto de itens finais que utilizam o item componente i ;

η_i = conjunto de sucessores imediatos do item i ou seja, o conjunto dos próximos componentes a serem montados;

sc_i = custo de preparação para produzir um lote do item i ;

hc_i = custo de estoque para uma unidade do item i por período;

bc_i = custo de *backlogging* (entrega atrasada) para uma unidade do item i por período;

oc_{mt} = custo de horas extras para uma unidade de tempo da máquina m no período t ;

st_{im} = tempo de preparação da máquina m necessário para produção do item i ;

a_{im} = tempo de produção necessário para produzir uma unidade do item i na máquina m ;

gd_{it} = demanda externa do item i no período t ;

gd_{itp} = demanda externa total do item i do período t ao período p ;

r_{ij} = número de unidades do item i necessário para produzir uma unidade do sucessor item j ;

C_{mt} = capacidade disponível da máquina m no período t ;

x_{it} = número de unidades do item i produzidas no período t ;

s_{it} = estoque do item i no final do período t ;

$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{se a produção está preparada para o item } i \text{ no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

b_{it} = nível de *backlogging* para o item final i no período t ;

ot_{mt} = quantidade de horas extras usadas na máquina m no período t .

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T sc_i y_{it} + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T hc_i s_{it} + \sum_{i \in endp} \sum_{t=1}^T bc_i b_{it} + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T oc_{mt} ot_{mt} \quad (40)$$

$$x_{it} + s_{i,t-1} + b_{it} - b_{i,t-1} = gd_{it} + s_{it} \quad \forall i \in endp, t \in [1, T] \quad (41)$$

$$x_{it} + s_{i,t-1} = \sum_{j \in \eta_i} r_{ij} x_{jt} + s_{it} \quad \forall i \in [1, I] \setminus \in endp, t \in [1, T] \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^I a_{im} x_{it} + \sum_{i=1}^I st_{im} y_{it} \leq C_{mt} + ot_{mt} \quad \forall m \in [1, M], t \in [1, T] \quad (43)$$

$$x_{it} \leq \left(\sum_{j \in \text{endp}_i} r_{ij} g d_{jIT} \right) y_{it} \quad \forall i[1, I], t \in [1, T] \quad (44)$$

$$x_{it} \geq 0, s_{i0} = 0, s_{it} \geq 0, b_{it} \geq 0, b_{iT} = 0, y_{it} \in \{0,1\}, ot_{mt} \geq 0 \quad (45)$$

$$\forall i \in [0, I], t \in [0, T], m \in [1, M]$$

A função objetivo (40) minimiza o custo total de preparação, estoque, *backlogging* e horas extras no horizonte de tempo. As restrições (41) e (42) garantem que a demanda seja satisfeita em todos os períodos para itens finais e componentes, respectivamente. A restrição (43) diz respeito a capacidade. A restrição (44) que nenhuma produção do item i aconteça no período t a menos que a preparação correspondente y_{it} seja igual a 1. A restrição (45) diz respeito a não negatividade das variáveis. Horas extras estão inclusas na formulação do problema, entretanto seu custo deve ser muito grande para que só haja utilização de horas extra em caso de extrema necessidade.

Esse modelo possui a característica de *backlogging*, mais geral do que o apresentado em (12) – (16).

Mocquillon, Lenté e T-Kindt (2011) apresentam um problema de planejamento de médio prazo com recurso único na produção de shampoo e uma solução com algoritmo heurístico de duas fases, a primeira baseada em um algoritmo guloso e a segunda baseada no algoritmo de Goldberg e Tarjan (1989) para o problema de fluxo de custo mínimo, de acordo com os autores a heurística é eficiente.

Li, Chen e Cai (2007) analisam o problema de dimensionamento de lotes capacitado, com substituições e retorno de produtos, além da fabricação e remanufatura de lotes são consideradas as opções de aquisição de emergência/ terceirização. Inicialmente aplicaram um algoritmo genético para identificar quais períodos exigem setup, em seguida, desenvolveram um modelo de programação dinâmica para fornecer a solução ideal determinando quantos novos produtos são fabricados ou quantos produtos devolvidos são remanufaturados em cada um desses períodos. Os autores consideram a técnica eficiente.

Li *et. al* (2010) afirmam que quanto mais integrado o planejamento e programação de processos, maior o rendimento e produtividade do sistema de

manufatura, desenvolvem então um algoritmo híbrido, para facilitar a integração e otimização desses dois sistemas. Para melhorar o desempenho da otimização uma eficiente representação genética, operador e busca local foram desenvolvidos. O método proposto é promissor e eficaz na pesquisa.

Gaafar (2006) aplica algoritmos genéticos para dimensionamento de lotes com variação determinística ao longo do tempo com ordenação dos lotes (sequenciamento), e *backlogging*, ou seja, permite atender pedidos de períodos anteriores, isto é, atrasados. O sequenciamento de lotes requer que as ordens sejam múltiplos inteiros de uma quantidade fixa maior que um. O algoritmo genético (AG) desenvolvido utiliza um novo esquema de código “012” específico para a política de sequenciamento, o desempenho desse algoritmo é comparado a heurística modificada *Silver-Meal* (MSM), baseada na frequência de obtenção da solução ótima e na porcentagem média de desvio, e se mostra mais robusto superando a heurística MSM. Além disso, apontam as melhores condições para utilização de cada abordagem.

O trabalho que mais se assemelha ao trabalho proposto nesta dissertação encontrado durante as pesquisas foi o de Erenguc e Tufekci (1988), que utiliza o modelo do transporte para solucionar problemas de planejamento agregado, com duas fontes de produção a regular e as horas extras, o modelo permite demanda variada nos diferentes períodos, custos de estoque e atrasos, limites de estoque e atraso. Desenvolveram um algoritmo guloso para resolver o problema. Entretanto, os autores apresentam um planejamento para um único item e um único recurso, o que não o torna prático, pois é difícil encontrar hoje indústrias que tenham recursos específicos para cada item. O modelo proposto e resolvido pelos autores foi:

d_t = demanda no período t ;

a_t = custo por unidade em horário de produção regular no período t , $a_t \geq 0$;

w_t = custo por unidade em hora extra no período t , $w_t \geq a_t$;

h_t = custo de estoque por unidade no final do período t , $h_t \geq 0$;

b_t = custo de atraso por unidade no período t , $b_t > 0$;

R_t = capacidade de produção regular no período t ;

O_t = capacidade de produção hora extra no período t ;

β_t = limite superior da quantidade de unidades que podem ser atrasadas no período t , $\beta_t \geq 0$;

S_t = limite superior de estoque no final do período t , $S_t \geq 0$;

r_t = número de unidades produzidas usando o horário regular no período t ;

o_t = número de unidades produzidas usando horas extras no período t ;

I_t = estoque final no período t ;

B_t = quantidade de unidades em atraso no período t ;

Assume-se que $I_T = I_0 = B_T = B_0 = 0$, isto é $S_T = \beta_T = 0$.

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^T (a_t r_t + w_t o_t) + \sum_{t=1}^T h_t I_t + \sum_{t=1}^{T-1} b_t B_t \quad (46)$$

$$r_t + x_t = R_t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (47)$$

$$o_t + y_t = O_t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (48)$$

$$r_t + o_t + I_{t-1} + B_t - I_t - B_{t-1} = d_t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (49)$$

$$B_t + \bar{B}_t = \beta_t \quad t = 1, 2, \dots, T - 1 \quad (50)$$

$$I_t + \bar{I}_t = S_t \quad t = 1, 2, \dots, T - 1 \quad (51)$$

$$I_0 = I_T = B_0 = B_T = 0 \quad t = 1, 2, \dots, T - 1 \quad (52)$$

todas as variáveis não negativas

Onde x_t , y_t , \bar{B}_t e \bar{I}_t são as variáveis de folga associadas as restrições (47), (48), (50) e (51) respectivamente.

A restrição (49) corresponde ao balanceamento de estoque em cada período considerando a demanda não atendida. As restrições (50) e (51) limitam superiormente a quantidade de unidades que podem ser atrasadas e estocadas.

Os autores partem deste modelo e focam em um algoritmo guloso para resolução do problema.

Não foram encontrados trabalhos mais recentes sobre esse assunto, que também é o mesmo proposto nesta dissertação .

Neste capítulo foram apresentados os conceitos de planejamento da produção, pesquisa operacional, especialmente a programação linear inteira e por último o processo de tomada de decisão, esse conceitos estão interligados no trabalho proposto nesta dissertação.

Toda indústria inevitavelmente convive com o processo de tomada de decisão durante a realização de suas tarefas, este processo se torna muito mais simples se suportado por um processo formal de planejamento e controle da produção. Motivado por essa situação esse trabalho propõe que o planejamento da produção seja feito através da pesquisa operacional, de uma forma diferente da usual, pela adaptação do modelo do transporte, proporcionando uma nova interpretação e servindo como suporte aos gestores da produção, além disso, cria um aplicativo para planejamento da produção, com base nessa adaptação do modelo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Miguel *et al.* (2010), este trabalho se caracteriza como tendo uma abordagem quantitativa, ou seja, é possível mensurar variáveis da pesquisa, mais especificamente pesquisa axiomática normativa, onde estuda modelos de otimização conhecidos para o problema idealizado e propõe novos métodos para resolver esses problemas ou variações de técnicas de solução já existentes mas que produzem melhores resultados. Ainda de acordo com o autor utiliza o método de modelagem porque descreve matematicamente um sistema produtivo, especificamente modelos de programação matemática determinísticos, através da programação linear inteira.

Segundo Gil (2002) esta pesquisa tem objetivo descritivo, pois estabelece a relação entre determinadas variáveis.

O processo de tomada de decisão é crucial em qualquer organização, para garantir o sucesso esse processo precisa estar bem estruturado e contar com informações confiáveis. A Pesquisa Operacional auxilia o processo de tomada de decisão com modelos que representam a realidade. Esta pesquisa será elaborada nas seguintes fases, seguindo o modelo proposto por Belfiore e Fávero (2013) (FIGURA 4):

- 1) Definição do Problema: são definidos os objetivos e possíveis métodos de solução, além das relações com outros sistemas. Apresentado no primeiro capítulo deste trabalho;
- 2) Construção do Modelo Matemático: desenvolver o modelo que consiste de forma geral em minimizar ou maximizar uma função objetivo sujeito a determinadas restrições. No presente trabalho será um modelo de programação linear inteira mista, pois parte das variáveis de decisão é discreta e as demais são contínuas;
- 3) Solução do Modelo: solucionar o modelo através de técnicas de Pesquisa Operacional, mais especificamente através do software de otimização LINGO, pois é um software de modelagem e resolução de problemas lineares e não-lineares de otimização com uma linguagem de programação bastante simples;

- 4) Validação do Modelo: o modelo é considerado válido se representar o comportamento do sistema real com precisão aceitável. Para validação da utilização do modelo de transporte como ferramenta para planejamento e controle da produção, serão analisados os resultados para diferentes cenários para verificar se estes se mostram coerentes, se obedecem às restrições, e se é possível executá-los;
- 5) Implementação dos Resultados: a implementação deve ser controlada e acompanhada por uma equipe responsável. Como esse trabalho se trata de uma proposta, essa fase não será realizada;
- 6) Avaliação Final: verificar se o objetivo foi alcançado.

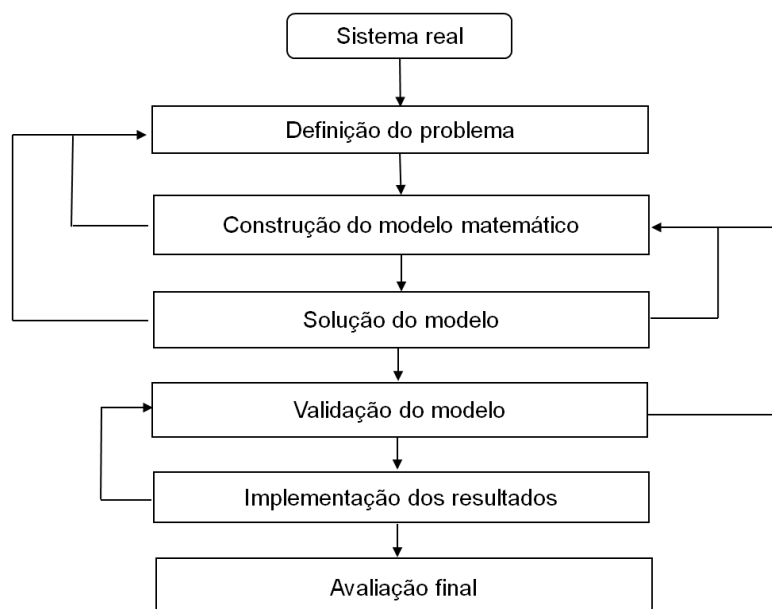


FIGURA 4 - Fases do estudo da Pesquisa Operacional.
FONTE: Belfiore e Fávero (2013).

Miguel *et al.* (2010) menciona as mesmas fases para elaboração de um estudo em Pesquisa Operacional, porém inclui a fase de avaliação final junto à de implementação dos resultados. Os autores Hillier e Lieberman (2010) e Passos (2008) apresentam as fases do estudo de forma semelhante.

4 MODELO MATEMÁTICO

Este trabalho consiste na adaptação do modelo do transporte para o planejamento da produção de médio prazo. A proposta permite flexibilidade quanto a prazos, por exemplo, entrega de pedidos atrasados e uso do estoque para atender as demandas, além de permitir a tomada de decisão em função das diferentes estratégias, avaliando o custo de cada cenário proposto. Por exemplo, em uma situação onde a capacidade disponível não atende a demanda do período, vale a pena contratar horas extras, terceirizar a demanda excedente, entregar o pedido em atraso, ou ainda estocar em períodos anteriores?

As origens e destinos no modelo do transporte são substituídos pelos períodos de planejamento do fornecedor e do cliente, respectivamente, os custos de transporte pelos custos de produção, a quantidade x_{ij} a ser transportada da origem i ao destino j é substituída pela quantidade x_{ij} produzida no período i , entregue no período j , utilizando a capacidade e o modo de produção indicados (N para normal, ou seja, com horário de produção regular, H para horas extras ou T para terceiro, ou seja, quando a produção é terceirizada por outra empresa), a demanda de cada destino passa a ser a demanda do cliente em cada período, e por fim a capacidade de cada origem ou fornecedor é substituída pela capacidade de produção disponível em cada período, sendo essa capacidade dividida em capacidade normal, horas extras e terceirização, conforme o QUADRO 4.

TRANSPORTE	PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO
m origens e m destinos	Períodos de Planejamento m
Custo de Transporte	Custo de Produção
Quantidade a ser transportada	Quantidade a ser produzida
Demanda do destino j	Demanda do cliente no período j
Capacidade de fornecimento na origem i	Capacidade de produção Normal, com Horas Extras e Terceirizada no período i

QUADRO 4 - Analogia entre modelos do transporte e planejamento da produção.

FONTE: O autor (2015).

Essa situação é facilmente visualizada no quadro proposto (QUADRO 5).

		Período					Capacidade	
		1	2	...	m			
Período	1N	x_{1N1} c_{1N1}	x_{1N2} c_{1N2}	...	x_{1Nm} c_{1Nm}	Cp_{1N}	Normal	
	1H	x_{1H1} c_{1H1}	x_{1H2} c_{1H2}	...	x_{1Hm} c_{1Hm}	Cp_{1H}	Hora Extra	
	1T	x_{1T1} c_{1T1}	x_{1T2} c_{1T2}	...	x_{1Tm} c_{1Tm}	Cp_{1T}	Terceiro	
	2N	x_{2N1} c_{2N1}	x_{2N2} c_{2N2}	...	x_{2Nm} c_{2Nm}	Cp_{2N}	Normal	
	2H	x_{2H1} c_{2H1}	x_{2H2} c_{2H2}	...	x_{2Hm} c_{2Hm}	Cp_{2H}	Hora Extra	
	2T	x_{2T1} c_{2T1}	x_{2T2} c_{2T2}	...	x_{2Tm} c_{2Tm}	Cp_{2T}	Terceiro	
	
	mN	x_{mN1} c_{mN1}	x_{mN2} c_{mN2}	...	x_{mNm} c_{mNm}	Cp_{mN}	Normal	
	mH	x_{mH1} c_{mH1}	x_{mH2} c_{mH2}	...	x_{mHm} c_{mHm}	Cp_{mH}	Hora Extra	
	mT	x_{mT1} c_{mT1}	x_{mT2} c_{mT2}	...	x_{mTm} c_{mTm}	Cp_{mT}	Terceiro	
Demanda	d_1	d_2	...	d_m				

QUADRO 5 - Quadro de planejamento da produção para único item.
 FONTE: O autor (2015).

As variáveis x_{ij} , com $i = 1N, 1H, 1T, \dots, mN, mH, mT$ e $j = 1, \dots, m$, na adaptação do modelo para planejamento da produção devem ser interpretadas da seguinte forma (QUADRO 6).

QUANDO	ENTÃO
$i < j$	Os itens x_{ij} produzidos no período i são estocados e entregues no período j
$i = j$	Os itens x_{ij} produzidos no período i são entregues no mesmo período i
$i > j$	Os itens x_{ij} produzidos no período i são entregues com atraso no período i para atender os pedidos do período j

QUADRO 6 - Interpretação das variáveis x_{ij} .
 FONTE: O autor (2015).

O modelo matemático utilizado neste trabalho foi o modelo do transporte com as devidas adaptações, a primeira adaptação do modelo do transporte

para planejamento da produção, chamado de Modelo I, foi feita para um único item e um único recurso, segue abaixo :

Sendo as variáveis:

- c_{iw} - custo unitário de produção no período i e modo de produção w ;
- c_{iwj} - custo unitário de produção no período i e modo de produção w para atender pedido do período j ;
- ce_{iwj} - custo acumulado unitário de estoque dos produtos produzidos no período i e modo de produção w e entregues em período posterior j , $i < j$;
- cb_{iwj} - custo unitário de atraso (multa) dos produtos produzidos no período i e modo de produção w e entregues no período i para atender com atraso a demanda do período j , $i > j$;
- cap_{iw} - capacidade disponível no período i e modo de produção w , em unidades de item;
- dem_j - demanda requerida no período j , em unidades de item;
- x_{iwj} - quantidade a ser produzida no período i e modo de produção w para atender a demanda do período j , conforme interpretação do QUADRO 6.

A função objetivo (53) consiste em achar os valores de x_{iwj} ($i = 1, 2, \dots, m$, $w = 1, 2, 3$ e $j = 1, 2, \dots, m$) que minimize o custo total de produção:

$$\text{Modelo I} \quad \min \sum_{i=1}^m \sum_{w=1}^3 \sum_{j=1}^m c_{iwj} x_{iwj} \quad (53)$$

Sendo que:

$$c_{iwj} = \begin{cases} c_{iw} & \text{se } i = j \\ c_{iw} + ce_{iwj} & \text{se } i < j \\ c_{iw} + cb_{iwj} & \text{se } i > j \end{cases} \quad (54)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^m x_{iwj} \leq cap_{iw} \quad (i = 1, 2, \dots, m, \quad w = 1, 2, 3) \quad (55)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{w=1}^3 x_{i w j} \geq dem_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (56)$$

$$x_{i w j} \in \mathbb{Z}^+ \quad (i = 1, 2, \dots, m, w = 1, 2, 3, j = 1, 2, \dots, m) \quad (57)$$

Onde as $3m$ restrições de (55), uma de cada período e modo de produção, garantem que a quantidade produzida no período i e modo de produção w tem que ser menor ou igual à capacidade cap_{iw} disponível naquele período e modo de produção, as m restrições de demanda, uma de cada período de entrega, garante que a quantidade entregue em cada período j tem de ser igual à demanda dem_j requerida por aquele período (56).

Esse modelo gera como resultado um quadro com o formato apresentado (QUADRO 7), onde a diagonal em cinza claro representa as quantidades produzidas e entregues no mesmo período, o triângulo superior direito em branco representa quantidades em estoque e o triângulo inferior esquerdo em cinza escuro representa o *backlogging*.

	1	2	...	m
1N				
1H				
1T				
2N				
2H				
2T				
...				
m N				
m H				
m T				

QUADRO 7 - Apresentação Matriz de Resultados
 FONTE: O autor (2015).

O modelo I considera apenas um item e um recurso, mas para atender o objetivo deste trabalho pretende-se ampliá-lo para vários itens e vários recursos, apresentado no Modelo II. Essa alteração exige o gerenciamento da capacidade, pois um recurso pode ser utilizado para produção de mais de um

item, ou seja, pode ser compartilhado, e o tempo de processamento pode variar de acordo com o item, sendo assim a capacidade não pode mais ser expressa em unidades, pois um recurso pode fazer diferentes quantidades de cada item, tendo que ser expressa em unidade de tempo (horas, minutos ou segundos) para os modos de produção normal e hora extra (que dependem dos recursos) e em unidades de item para o modo de produção terceirizado (que não depende dos recursos).

Para inclusão de novas famílias de itens a cada período foram associados novos itens representados por $f = 1, 2, \dots, F$, criando assim novas colunas, conforme (QUADRO 8).

	1				2				...	m			
	1	2	...	F	1	2	...	F	...	1	2	...	F
1N	x_{1N11}	x_{1N21}	...	x_{1NF1}	x_{1N12}	x_{1N22}	...	x_{1NF2}	...	x_{1N1m}	x_{1N2m}	...	x_{1NFm}
1H	x_{1H11}	x_{1H21}	...	x_{1HF1}	x_{1H12}	x_{1H22}	...	x_{1HF2}	...	x_{1H1m}	x_{1H2m}	...	x_{1HFm}
1T	x_{1T11}	x_{1T21}	...	x_{1TF1}	x_{1T12}	x_{1T22}	...	x_{1TF2}	...	x_{1T1m}	x_{1T2m}	...	x_{1TFm}
2N	x_{2N11}	x_{2N21}	...	x_{2NF1}	x_{2N12}	x_{2N22}	...	x_{2NF2}	...	x_{2N1m}	x_{2N2m}	...	x_{2NFm}
2H	x_{2H11}	x_{2H21}	...	x_{2HF1}	x_{2H12}	x_{2H22}	...	x_{2HF2}	...	x_{2H1m}	x_{2H2m}	...	x_{2HFm}
2T	x_{2T11}	x_{2T21}	...	x_{2TF1}	x_{2T12}	x_{2T22}	...	x_{2TF2}	...	x_{2T1m}	x_{2T2m}	...	x_{2TFm}
...
mN	x_{mN11}	x_{mN21}	...	x_{mNF1}	x_{mN12}	x_{mN22}	...	x_{mNF2}	...	x_{mN1m}	x_{mN2m}	...	x_{mNFm}
mH	x_{mH11}	x_{mH21}	...	x_{mHF1}	x_{mH12}	x_{mH22}	...	x_{mHF2}	...	x_{mH1m}	x_{mH2m}	...	x_{mHFm}
mT	x_{mT11}	x_{mT21}	...	x_{mTF1}	x_{mT12}	x_{mT22}	...	x_{mTF2}	...	x_{mT1m}	x_{mT2m}	...	x_{mTFm}

QUADRO 8 - Quadro de planejamento da produção para vários itens e vários recursos
FONTE: O autor (2015).

Ao incluir novos itens e recursos, percebe-se a necessidade da criação de um novo quadro, que foi chamado de matriz de uso (QUADRO 9), esse quadro relaciona cada família de itens com cada recurso $k = 1, 2, \dots, K$, ou seja, apresenta quantas horas de cada recurso é necessária para produzir cada item de cada família.

O Modelo II fornece uma nova interpretação das variáveis:

- c_{iwf} - custo unitário de produção no período i e modo de produção w da família de itens f ;
- c_{iwfj} - custo unitário de produção no período i e modo de produção w da família de itens f para atender demanda do período j ;

- ce_{iwfj} - custo unitário acumulado de estoque dos produtos da família de itens f produzidos no período i e modo de produção w e entregues no período j , $i < j$;
- cb_{iwfj} - custo unitário de atraso dos produtos da família de itens f produzidos no período i e modo de produção w e entregues no período i para atender com atraso a demanda do período j , $i > j$;
- cap_{iw}^k - capacidade disponível no período i e modo de produção w para o recurso k em unidades de tempo para os modos de produção normal e hora extra e em unidades de item para o modo de produção terceirizado;
- dem_{fj} - demanda requerida da família de itens f no período j em unidades de item;
- x_{iwfj} - quantidade a ser produzida da família de itens f no período i e modo de produção w para atender pedido do período j ;
- u_{if}^k - é quanto em unidades de tempo que cada família de item f utiliza do recurso k para ser produzida no período i ;

A função objetivo (58) da mesma forma que a do modelo anterior consiste em achar os valores de x_{iwfj} ($i = 1, 2, \dots, m$, $w = 1, 2, 3$, $f = 1, 2, \dots, F$ e $j = 1, 2, \dots, m$) que minimize o custo total de produção:

$$\text{Modelo II} \quad \min \sum_{i=1}^m \sum_{w=1}^3 \sum_{f=1}^F \sum_{j=1}^m c_{iwfj} x_{iwfj} \quad (58)$$

Sendo que:

$$c_{iwfj} = \begin{cases} c_{iwf} & \text{se } i = j \\ c_{iwf} + ce_{iwfj} & \text{se } i < j \\ c_{iwf} + cb_{iwfj} & \text{se } i > j \end{cases} \quad (59)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{f=1}^F u_{if}^k x_{iwfj} \leq cap_{iw}^k \quad (i = 1, 2, \dots, m; w = 1, 2, 3; k = 1, 2, \dots, K) \quad (60)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{w=1}^3 x_{i w f j} \geq dem_{f j} \quad (f = 1, 2, \dots, F; j = 1, 2, \dots, m) \quad (61)$$

$$x_{i w f j} \in \mathbb{Z}^+ \quad (i = 1, 2, \dots, m; w = 1, 2, 3; f = 1, 2, \dots, F; j = 1, 2, \dots, m) \quad (62)$$

A restrição (60) relaciona as capacidades às famílias de itens de acordo com quanto cada unidade de cada família de item f utiliza da capacidade de determinado recurso k para ser produzida. São definidos uma matriz u (QUADRO 9) e um vetor cap (QUADRO 10) para cada recurso k . A restrição (61) da mesma forma que no Modelo I, garante que a quantidade entregue em cada período j tem de atender a demanda $dem_{f j}$ requerida por aquele período para a família f .

	1				2				...	m			
	1	2	...	F	1	2	...	F	...	1	2	...	F
1N	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k	...	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k
1H	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k	...	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k
1T	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k	...	u_{11}^k	u_{12}^k	...	u_{1F}^k
2N	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k	...	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k
2H	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k	...	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k
2T	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k	...	u_{21}^k	u_{22}^k	...	u_{2F}^k
...
mN	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k	...	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k
mH	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k	...	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k
mT	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k	...	u_{m1}^k	u_{m2}^k	...	u_{mF}^k

QUADRO 9 - Matriz de Uso.

FONTE: O autor (2015).

Considera-se que o valor de $u_{i f}^k$ não depende do modo de produção e só do período i em que é produzido, pois pode haver alterações e/ou melhorias no processo de produção.

O modelo II serviu como base para a criação do aplicativo para planejamento da produção, o aplicativo suas funções são apresentados no capítulo 5.

	Recurso 1	Recurso 2	Recurso K
1N	cap_{1N}^1	cap_{1N}^2	cap_{1N}^k
1H	cap_{1H}^1	cap_{1H}^2	cap_{1H}^k
1T	cap_{1T}^1	cap_{1T}^2	cap_{1T}^k
2N	cap_{2N}^1	cap_{2N}^2	cap_{2N}^k
2H	cap_{2H}^1	cap_{2H}^2	cap_{2H}^k
2T	cap_{2T}^1	cap_{2T}^2	cap_{2T}^k
...
mN	cap_{mN}^1	cap_{mN}^2	cap_{mN}^k
mH	cap_{mH}^1	cap_{mH}^2	cap_{mH}^k
mT	cap_{mT}^1	cap_{mT}^2	cap_{mT}^k

QUADRO 10 - Vetores Capacidade.

FONTE: O autor (2015).

5 APLICATIVO PLAN_PRO

O aplicativo, chamado de PLAN_PRO, é uma ferramenta que realiza o planejamento agregado da produção. Esse aplicativo que foi baseado no Modelo II apresentado no capítulo 4, serve como suporte aos tomadores de decisões porque permite a análise dos resultados com diferentes cenários do sistema produtivo. O aplicativo é simples e de fácil utilização pois pretende atingir até empresas sem nenhum processo formal de planejamento. O aplicativo tem como características trabalhar com um horizonte de planejamento, custos diferenciados por período e modo de produção, permitir ou não estoque e/ou *backlogging*, avaliar alterações no planejamento em casos de alterações da demanda ou capacidade e possibilitar o gerenciamento fornecendo informações ao usuário.

Como o aplicativo é voltado para pequenas empresas e esse trabalho pretende apenas apresentar e validar seu funcionamento não foi uma preocupação gerar um planejamento para grande quantidade de períodos, famílias de itens e recursos, tomaram-se como base então 6 períodos, podendo esses serem anos, trimestres, bimestres, meses ou até semanas, 5 famílias de itens, e por famílias de itens entendemos os conjuntos de itens que utilizam os mesmos recursos para serem produzidos, e 5 recursos. Entretanto, para ampliá-lo segue-se a mesma linha de programação.

Para criar o aplicativo foram escolhidos os softwares Microsoft Excel e LINGO, o Excel como entrada e saída de dados foi escolhido por já ser utilizado na maioria das empresas, o LINGO como software de otimização (APÊNDICE 1), que utiliza, neste caso, o algoritmo *Branch-and-Bound* para resolução do problema. A automatização no Excel foi feita através do desenvolvedor Visual Basic.

No que diz respeito à entrada de dados, com informações fornecidas pelo usuário, por exemplo, custo de produção, custo de estoque, multa por atraso de entrega, quantidade de períodos, capacidade e demanda de cada período, são construídos uma matriz de custos, um vetor de capacidades e um vetor de demandas. Como saída de dados temos uma matriz com os resultados mostrados na (FIGURA 5).



FIGURA 5 - Fluxo do Aplicativo.
FONTE: O autor (2015).

Foram feitos testes com o Modelo I com valores hipotéticos para verificar se o resultado obtido era o esperado, como o resultado se mostrou coerente deu-se continuidade ao projeto.

Para inclusão de novos recursos foram adicionadas novas colunas para preencher a capacidade, cada coluna corresponde a um recurso. A capacidade agora deve ser preenchida em unidade de tempo e não mais em unidade, isso porque dependendo do tempo necessário para produzir um produto, um recurso pode produzir uma determinada quantidade de um produto e uma quantidade diferente de outro produto. E para relacionar as famílias de itens às capacidades dos recursos, e à quais recursos são necessários para produzir uma unidade de produto daquela família, criou-se a matriz de uso, conforme apresentado no capítulo 4, uma matriz para cada recurso.

5.1 FUNÇÕES E USO DO APLICATIVO

O aplicativo criado funciona da seguinte maneira:

1. Ao abrir o arquivo xlsx do Excel foi criado um botão para Entrada de Dados. Ao clicar no botão abre-se um formulário (FIGURA 6) com os seguintes campos de preenchimento:

- a. Períodos: o usuário escolhe em uma caixa suspensa, com números variando de 1 a 6, a quantidade de períodos que irá planejar;
- b. Família de itens: o usuário escolhe em uma caixa suspensa, com números variando de 1 a 5, a quantidade de família de itens que serão produzidas nos períodos do planejamento;
- c. Recursos: o usuário escolhe em uma caixa suspensa, com números variando de 1 a 5, a quantidade de recursos disponíveis para produção nos períodos do planejamento;
- d. Permite terceirizar?: o usuário seleciona uma das duas opções, sim ou não;
- e. Permite atraso?: o usuário seleciona uma das duas opções, sim ou não, se sim escolhe também em uma caixa suspensa, com números variando de 1 a *quantidade de períodos* – 1, a quantidade máxima de períodos que é permitido atrasar, se o não for selecionado então a caixa suspensa fica inabilitada;
- f. Permite estoque?: o usuário seleciona uma das duas opções, sim ou não, se sim escolhe também em uma caixa suspensa, com números variando de 1 a *quantidade de períodos* – 1, a quantidade máxima de períodos que é permitido estocar, se o não for selecionado então a caixa suspensa fica inabilitada.

Ao finalizar o preenchimento o usuário clica no botão ao final do formulário para inserir a demanda.

Cada tela do Excel tem também instruções de como deve ser feito o seu preenchimento. As instruções da primeira tela Entrada de dados são apresentadas na (QUADRO 11);

2. Ao clicar no botão Inserir demanda abre-se a próxima tela que gera uma planilha conforme a quantidade de períodos e famílias de itens especificadas. A seguir um exemplo da planilha gerada para 3 períodos e 2 famílias de itens (QUADRO 12). E as instruções de preenchimento para a tela da demanda no (QUADRO 13). Após preencher a demanda o usuário clica no botão Inserir Capacidade;

FIGURA 6 - Formulário Entrada de Dados.
FONTE: O autor (2015).

ENTRADA DE DADOS

Instruções de preenchimento: preencher a quantidade de períodos do planejamento (é possível definir um período como uma semana, quinze dias, um mês, um bimestre, um trimestre, etc.). Preencher a quantidade de família de itens (uma família de itens é o conjunto de itens que utilizam os mesmos processos, ou recursos, para serem produzidos). Preencher a quantidade de recursos. Escolher se existe a possibilidade de terceirização. Escolher se existe a possibilidade de entregar pedidos em atraso, se sim, por no máximo quantos períodos. Escolher se existe a possibilidade de estocar produtos, se sim, por no máximo quantos períodos. Depois de preencher todas as informações clicar em inserir demanda.

QUADRO 11 - Instruções Entrada de Dados
FONTE: O autor (2015)

Período	1		2		3	
Item	1	2	1	2	1	2
Demanda						

QUADRO 12 - Demanda
FONTE: O autor (2015).

DEMANDA

Instruções de preenchimento: inserir a demanda de cada período, escolher uma unidade (peças, kg, g, unidade, etc.) e usá-la no preenchimento de todas as matrizes.

QUADRO 13 - Instruções Demanda
FONTE: O autor (2015).

3. Ao clicar no botão Inserir Capacidade abre-se uma nova tela e uma nova planilha é gerada com base na quantidade de períodos e de recursos. A seguir um exemplo da planilha gerada para 3 períodos e 2 recursos (QUADRO 14). O número de colunas com espaço em branco para serem preenchidas é igual ao número de recursos especificado pelo usuário ao preencher o formulário, as demais colunas são preenchidas automaticamente com o valor zero.

As instruções de preenchimento para a tela da capacidade estão no (QUADRO 15).

Período	Modo	Capacidade Recurso 1	Capacidade Recurso 2	Capacidade Recurso 3	Capacidade Recurso 4	Capacidade Recurso 5
1	Normal			0	0	0
	hora extra			0	0	0
	Terceiro			0	0	0
2	Normal			0	0	0
	hora extra			0	0	0
	Terceiro			0	0	0
3	Normal			0	0	0
	hora extra			0	0	0
	Terceiro			0	0	0

QUADRO 14 – Capacidade.

FONTE: O autor (2015).

CAPACIDADE
<p>Instruções de preenchimento: a capacidade da fábrica, ou seja, as capacidades normal e hora extra são medidas em tempo, escolher uma unidade (horas, minutos, segundos, etc.) e usá-la no preenchimento de todas as matrizes. A capacidade dos terceiros é medida em unidade (peças, kg, g, unidade, etc.).</p>

QUADRO 15 - Instruções Capacidade.

FONTE: O autor (2015).

- Nos casos onde não é permitido terceirizar a linha do modo terceiro é preenchida automaticamente com zeros. O usuário preenche a capacidade dos recursos e clica no botão Inserir Custos de Produção;
4. Ao clicar no botão Inserir Custos de Produção é aberta uma nova tela, onde é gerada a Matriz Custos de Produção com base na quantidade de

períodos e famílias de itens selecionados no início. Um exemplo da matriz gerada para 3 períodos e 2 famílias de itens está no (QUADRO 16).

As instruções de preenchimento para esta tela estão (QUADRO 17).

Quando o usuário seleciona o opção de não terceirizar, a linha do modo terceiro é preenchida automaticamente com valores altos para que esse modo não seja utilizado no planejamento o mesmo acontece para as matrizes Custos de Estoque e Custos de Atraso. Após preencher a matriz de custos de produção o usuário clica no botão Inserir Custos de Estoque;

		Período de entrega	1		2		3	
Período de produção	Item	1	2	1	2	1	2	
	Modo							
1	normal							
	hora extra							
	terceiro							
2	normal							
	hora extra							
	terceiro							
3	normal							
	hora extra							
	terceiro							

QUADRO 16 - Matriz Custos de Produção.

FONTE: O autor (2015).

MATRIZ CUSTOS DE PRODUÇÃO	
Instruções de preenchimento: o custo de produção é composto por custo de matéria-prima, mão de obra e gastos gerais de fabricação (aluguel, energia elétrica, mão-de-obra indireta, etc.). É o custo de produção por unidade (escolhida no preenchimento da demanda, custo por peça, por kg, etc.).	

QUADRO 17 - Instruções Matriz Custos de Produção.

FONTE: O autor (2015).

5. Ao clicar no botão Inserir Custos de Estoque abre-se uma nova tela, e é gerada uma nova matriz que difere da matriz de custos apenas porque a diagonal e o triangulo inferior esquerdo da matriz foi preenchido

automaticamente por zeros, isso porque, conforme apresentado no capítulo anterior, representa os produtos entregues no período certo ou com atraso (QUADRO 18). Nos casos em que o estoque não é permitido o triângulo superior direito é preenchido com valores altos para que assim o estoque não seja planejado, se o estoque é permitido apenas por um determinado período menor que a quantidade de períodos planejados, então valores altos são preenchidos automaticamente nos períodos restantes do triângulo superior direito.

As instruções de preenchimento para a matriz de custos de estoque estão (QUADRO 19).

		Período de entrega		1		2		3	
Período de produção	Item	1	2	1	2	1	2	1	2
	Modo								
1	normal	0	0						
	hora extra	0	0						
	terceiro	0	0						
2	normal	0	0	0	0				
	hora extra	0	0	0	0				
	terceiro	0	0	0	0				
3	normal	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0

QUADRO 18 - Matriz Custos de Estoque.

FONTE: O autor (2015).

<p>MATRIZ CUSTOS DE ESTOQUE</p> <p>Instruções de preenchimento: é o custo de estoque por produto acabado por período.</p>
--

QUADRO 19 - Instruções Matriz Custos de Estoque.

FONTE: O autor (2015).

Ao finalizar o preenchimento o usuário clica no botão Inserir Custos de Atraso;

6. Ao clicar no botão Inserir Custos de Atraso abre-se a próxima tela e é gerada a próxima matriz (QUADRO 20), que analogamente a Matriz Custos de Estoque, tem o triângulo superior direito preenchido por

zeros, pois representa os produtos entregues no período certo ou estocados, e sendo assim, não tem custos de atraso.

As instruções de preenchimento para a Matriz Custos de Atraso são (QUADRO 21).

Nos casos em que o atraso não é permitido o triangulo inferior esquerdo é preenchido com valores altos, neste caso 1000000, para que assim o atraso não seja planejado, se o atraso é permitido apenas por um determinado período menor que a quantidade de períodos planejados, então valores altos são preenchidos automaticamente nos períodos restantes do triangulo inferior esquerdo. Após preencher os espaços em branco da Matriz de Custos de Atraso o usuário clica no botão Inserir Matriz de Uso do Recurso 1.

		Período de entrega		1		2		3	
Período de produção	Item	1	2	1	2	1	2	1	2
	Modo								
1	normal	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0
2	normal			0	0	0	0	0	0
	hora extra			0	0	0	0	0	0
	Terceiro			0	0	0	0	0	0
3	normal							0	0
	hora extra							0	0
	Terceiro							0	0

QUADRO 20 - Matriz Custos de Atraso.
FONTE: O autor (2015).

MATRIZ CUSTOS DE ATRASO	
Instruções de preenchimento: é o custo de atraso (multa, desconto no produto) por produto acabado (peça, kg, unidade, conforme preenchimento da demanda) por período.	

QUADRO 21 - Instruções Matriz Custos de Atraso.
FONTE: O autor (2015).

- Novamente ao clicar no botão uma nova tela se abre, gerando a Matriz de Uso do Recurso 1 (QUADRO 22). Nos casos onde não é permitido terceirizar, as linhas do modo terceiro de todos os períodos são

preenchidas automaticamente com zeros. Como provavelmente a utilização será a mesma para todos os períodos, independentemente de quando for produzido e entregue, essa tela também conta com um botão chamado Replicar Utilização do Recurso 1, que quando acionado replica os valores preenchidos na matriz período de produção 1 X período de entrega 1, destacada na TABELA 19 com a cor cinza, para todos os outros períodos. Nos casos em que houver alguma diferença da utilização para períodos de produção diferentes, o usuário não utiliza o botão Replicar e preenche manualmente todos os períodos.

		Período de entrega		1		2		3	
Período de produção	Item	1	2	1	2	1	2	1	2
	Modo								
1	normal								
	hora extra								
	Terceiro								
2	normal								
	hora extra								
	Terceiro								
3	normal								
	hora extra								
	Terceiro								

QUADRO 22 - Matriz de Uso Recurso 1.

FONTE: O autor (2015).

As instruções de preenchimento para a Matriz de Uso do Recurso 1 estão apresentadas (QUADRO 23):

MATRIZ DE USO RECURSO 1
<p>Instruções de preenchimento: é quanto cada unidade de uma família de itens utiliza do recurso 1, em tempo (horas, minutos, segundos, conforme escolhido no preenchimento das capacidades), para ser produzido. Preencher somente para o primeiro período de produção e entrega e clicar no botão replicar utilização do recurso para preencher toda a tabela com os mesmos valores de utilização.</p>


QUADRO 23 - Instruções Matriz de Uso Recurso 1.

FONTE: O autor (2015).

Após preencher a matriz o usuário clica no botão Inserir Matriz de Uso Recurso 2, que é igual e tem o mesmo processo de preenchimento que

a Matriz de Uso Recurso 1, e da mesma forma para as próximas matrizes do Recurso 3, 4 e 5. Para os casos onde a quantidade de recursos é menor que 5, então as matrizes dos recursos excedentes são preenchidas inteiras automaticamente com zeros. Ao concluir o preenchimento da Matriz de Uso Recurso 5, o usuário clica no botão Gerar Matriz de Planejamento;

8. Ao clicar no botão Gerar Matriz de Planejamento abre-se uma nova tela e é gerada uma nova matriz, a Matriz de Planejamento, essa matriz tem a mesma forma das anteriores e todos os espaços em branco. É apresentada a instrução de como rodar o programa do Lingo que está inserido como um objeto no Excel (QUADRO 24):

Para executar o otimizador lingo clique em  na barra de ferramentas superior, clique em close. Para exibir o planejamento da produção clique no botão exibir planejamento da produção.

QUADRO 24 - Instruções para Executar Lingo.
FONTE: O autor (2015).

O Lingo utiliza o algoritmo Branch-and-Bound para solucionar o problema. Após executar o programa no Lingo, o usuário clica no botão Exibir Planejamento da Produção, que organiza o resultado da otimização na Matriz de Planejamento, que tem uma estrutura igual a das outras matrizes, como por exemplo a matriz de custos. Com o planejamento finalizado cabe ao usuário e/ou gestor interpretá-lo e usá-lo como suporte à tomada de decisões. A interpretação do planejamento é abordada no próximo capítulo.

6 INTERPRETAÇÃO DO APLICATIVO PLAN_PRO: UMA ANÁLISE DE CENÁRIOS

Para validação e exemplificação de como deve ser interpretado o aplicativo, foi feita a análise de cenários que utilizou dados de uma micro empresa do segmento de alimentos do norte de Santa Catarina. A empresa foi criada em abril de 2007, hoje conta com 2 funcionários e seus produtos tem por característica pouco ou nenhum tempo em estoque. Como a empresa tem suas particularidades, foram também criados alguns cenários hipotéticos para demonstrar o comportamento do aplicativo em determinadas situações, os dois cenários apresentados a seguir, juntos sintetizam as funções do aplicativo.

6.1 PRIMEIRO CENÁRIO

O primeiro cenário é o planejamento para a produção de brigadeiros e bolachas. O planejamento é feito para 6 períodos, e um período de planejamento equivale a uma semana, 2 famílias de itens, sendo a primeira brigadeiros e a segunda bolachas, 5 recursos, onde o recurso 1 corresponde a balança, o recurso 2 corresponde a batedeira, o recurso 3 corresponde ao forno, o recurso 4 corresponde ao fogão e o recurso 5 a bancada de finalização, como se trata de um planejamento agregado, a sequência de produção não é considerada. Esses produtos não são terceirizados, e a empresa não permite entregas em atraso. O estoque máximo é de uma semana para as bolachas, ou seja, 1 período, para os brigadeiros o estoque não é permitido.

As demandas para os períodos são apresentadas abaixo (QUADRO 25), sendo que a demanda dos brigadeiros está em unidades e a das bolachas em pacotes de 100g.

A capacidade é apresentada (QUADRO 26), em minutos, a empresa trabalha 44h por semana, ou seja, 2640 minutos, e pode fazer até 2h de hora extra em cada um dos 5 dias trabalhados, ou seja, 600 minutos.

Período	1		2		3		4		5		6	
Item	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Demanda	1500	100	1000	800	2000	1600	3000	50	500	150	8000	5000

QUADRO 25 - Demanda primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

Período	Modo	Capacidade Recurso 1	Capacidade Recurso 2	Capacidade Recurso 3	Capacidade Recurso 4	Capacidade Recurso 5
1	normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	terceiro	0	0	0	0	0
2	normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	terceiro	0	0	0	0	0
3	normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	terceiro	0	0	0	0	0
4	normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	terceiro	0	0	0	0	0
5	normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	terceiro	0	0	0	0	0
6	normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	terceiro	0	0	0	0	0

QUADRO 26 - Capacidade primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

As linhas do modo terceiro estão com valores zero porque esses produtos não são terceirizados.

O custo de produção do brigadeiro em horário normal é R\$0,80 e em hora extra R\$0,85, e o custo de produção do pacote de bolacha em horário normal é R\$3,50 e em hora extra R\$3,70. Com esses dados foi preenchida a matriz custos de produção (QUADRO 27).

O custo de estoque para o brigadeiro é um custo alto simbólico para evitar o estoque deste produto, o custo de estoque para o pacote de bolacha é de R\$0,37, somente para um período que é o máximo de tempo de estoque permitido, o restante dos períodos também tem um custo alto simbólico para evitar que o estoque nesses períodos não seja planejado (QUADRO 28).

		Período de entrega	1		2		3		4		5		6	
Período de produção	Item	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
	Modo													
1	normal	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	
	hora extra	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	
2	normal	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	
	hora extra	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	
3	normal	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	
	hora extra	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	
4	normal	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	
	hora extra	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	
5	normal	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	
	hora extra	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	
6	normal	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	0,8	3,5	
	hora extra	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	0,85	3,7	
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	

QUADRO 27 - Matriz Custos de Produção primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015)

Período de produção	Período de entrega	1		2		3		4		5		6	
	Item Modo	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	normal	0	0	1000000	0,37	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	hora extra	0	0	1000000	0,37	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	terceiro	0	0	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
2	normal	0	0	0	0	1000000	0,37	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	hora extra	0	0	0	0	1000000	0,37	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	terceiro	0	0	0	0	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
3	normal	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1000000	1000000	1000000	1000000
	hora extra	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1000000	1000000	1000000	1000000
	terceiro	0	0	0	0	0	0	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
4	normal	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1000000	1000000
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1000000	1000000
	terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	1000000	1000000	1000000
5	normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37
	terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	1000000
6	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

QUADRO 28 - Matriz Custos de Estoque primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

Como entregas atrasadas não são permitidas, o triângulo inferior esquerdo foi preenchido com custos altos para evitar o planejamento de atrasos (QUADRO 29).

Para fazer 100 brigadeiros são utilizados 5 minutos do recurso 1, a balança, ou seja, 0,05 minutos para cada brigadeiro. Já para as bolachas é necessário 10 minutos para fazer 20 pacotes de 100g, ou seja, 0,5 minutos para cada pacote. Com esses dados foi preenchida a Matriz de Uso do Recurso 1 (QUADRO 30). Da mesma forma foram preenchidas as Matrizes de Uso dos recursos 2, 3, 4 e 5 (QUADROS 31, 32, 33 e 34).

O planejamento para o primeiro cenário (QUADRO 35) deve ser interpretado da seguinte forma:

No primeiro e no segundo período a capacidade normal foi suficiente para atender a demanda. No terceiro período a capacidade normal não foi suficiente para atender a demanda, mas com as horas extras foi possível atender a demanda de brigadeiros e com estoque do período anterior atender a demanda de bolachas. No quarto período novamente a capacidade normal foi suficiente para atender a demanda e ainda ajudou com produção para estoque de bolachas para atender a demanda do quinto período, isso porque como a demanda do sexto período foi muito elevada, a capacidade normal do quinto período foi utilizada para produzir bolachas e estocar para entrega no sexto período, assim como parte da capacidade das horas extras do quinto período, que produziu bolachas para estoque e entrega no sexto período, outra parte produziu brigadeiros para entrega no mesmo período, já que esse produto não permite estoque. No sexto período como a demanda é muito elevada, toda a capacidade normal foi utilizada para produzir brigadeiros, assim como a capacidade de horas extras, e ainda assim não foi suficiente para atender a quantia solicitada, parte da demanda das bolachas foi atendida com estoque do período anterior, mas da mesma forma que com os brigadeiros não foi suficiente para atender na sua totalidade, nesse caso o programa de otimização planejou o restante da demanda desse período para terceiros. No início do aplicativo, ao entrar com os dados o usuário selecionou não permitir terceirização, então ele pode se perguntar como no sexto período essa terceirização foi planejada? Isso pode ser explicado porque as capacidades normal e de hora extra no período não eram suficientes para atender a

		Período de entrega		1		2		3		4		5		6	
Período de produção	Item	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	Modo														
1	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Normal	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Normal	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Normal	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Normal	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0
6	Normal	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0
	Terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0

QUADRO 29 - Matriz Custos de Atraso primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

Período de produção	Período de entrega	1		2		3		4		5		6	
	Item Modo	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Normal	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	hora extra	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Normal	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	hora extra	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Normal	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	hora extra	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Normal	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	hora extra	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Normal	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	hora extra	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Normal	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	hora extra	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5	0,05	0,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

QUADRO 30 - Matriz de Uso Recurso 1 primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

Período de produção	Período de entrega	1		2		3		4		5		6	
	Item Modo	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Normal	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	hora extra	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Normal	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	hora extra	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Normal	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	hora extra	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Normal	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	hora extra	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Normal	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	hora extra	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Normal	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	hora extra	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

QUADRO 31 - Matriz de Uso Recurso 2 primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

Período de produção	Período de entrega	1		2		3		4		5		6	
	Item Modo	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Normal	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	hora extra	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Normal	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	hora extra	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Normal	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	hora extra	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Normal	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	hora extra	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Normal	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	hora extra	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Normal	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	hora extra	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

QUADRO 32 - Matriz de Uso Recurso 3 primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

Período de produção	Período de entrega	1		2		3		4		5		6	
	Item Modo	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Normal	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	hora extra	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Normal	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	hora extra	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Normal	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	hora extra	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Normal	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	hora extra	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Normal	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	hora extra	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Normal	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	hora extra	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0	0,4	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

QUADRO 33 - Matriz de Uso Recurso 4 primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

Período de produção	Período de entrega	1		2		3		4		5		6	
	Item Modo	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Normal	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	hora extra	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Normal	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	hora extra	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Normal	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	hora extra	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Normal	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	hora extra	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Normal	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	hora extra	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Normal	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	hora extra	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5	0,6	1,5
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

QUADRO 34 - Matriz de Uso Recurso 5 primeiro cenário.

FONTE: O autor (2015).

		Período de entrega		1		2		3		4		5		6	
Período de produção	Item	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	Modo														
1	Normal	1500	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Normal	0	0	1000	800	0	240	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Normal	0	0	0	0	1000	1360	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Normal	0	0	0	0	0	0	3000	50	0	150	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1760	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0	200	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4400	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	0
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2600	3040
Demanda		1500	100	1000	800	2000	1600	3000	50	500	150	8000	5000		

QUADRO 35 - Planejamento primeiro cenário.
 FONTE: O autor (2015).

demanda, juntando os estoques do período anterior, o máximo permitido, ainda não se tinha a quantidade suficiente para atendê-la, então a única solução encontrada foi planejar a terceirização, mesmo com custos altíssimos, para não deixar que a demanda não fosse atendida. Isso foi possível porque quando o usuário seleciona a opção de não terceirizar, o aplicativo automaticamente preenche com custos altos esse modo de produção para assim levar o otimizador a não planejá-lo, pois tem como objetivo minimizar o custo, como nesse caso não havia outra opção esse modo foi utilizado para que toda a demanda fosse atendida.

Essa situação pode ser interpretada da seguinte forma, se essa demanda alta acontece frequentemente, deve se pensar em aumentar a capacidade da empresa, ou encontrar outra empresa que terceirize os produtos, comparar custos e verificar qual das situações vale a pena considerando a aquisição de novos recursos e mão de obra, se acontece com pouca frequência, uma opção pode ser verificar qual o recurso gargalo e se é possível aumentar a capacidade contratando mão de obra no regime de diarista, ou então não aceitar tantos pedidos para esse período.

6.2 SEGUNDO CENÁRIO

O segundo cenário é o planejamento para brigadeiros e bolachas e panetone. O planejamento é feito para 6 períodos, e um período de planejamento equivale a uma semana, 3 famílias de itens, sendo a primeira brigadeiros, a segunda bolachas e a terceira panetones, 5 recursos, onde o recurso 1 corresponde a balança, o recurso 2 corresponde a batedeira, o recurso 3 corresponde ao forno, o recurso 4 corresponde ao fogão e o recurso 5 a bancada de finalização. Desses produtos apenas o panetone é terceirizado e não é produzido na empresa, entregas atrasadas não são permitidas. O estoque máximo é de duas semanas para o panetone, ou seja, 2 períodos, uma semana para as bolachas, ou seja, 1 período, para os brigadeiros o estoque não é permitido.

A demanda é apresentada (QUADRO 36) da mesma forma que no primeiro cenário os brigadeiros em unidades, as bolachas em pacotes de 100g e os panetones também em unidades.

A capacidade é apresentada (QUADRO 37) no modo de produção normal e hora extra em minutos e no modo terceiro em unidades.

Os custos de produção são apresentados (QUADRO 38) em reais, o brigadeiro e a bolacha têm altos custos no modo terceiro porque esses produtos não são terceirizados, já o panetone, tem altos custos nos modos normal e hora extra, porque são terceirizados. Nesse cenário o custo de produção é igual para todos os períodos.

Os custos de estoque são apresentados (QUADRO 39) é interessante perceber que como o brigadeiro não tem estoque todos os custos estão iguais a 1000000, já a bolacha tem custos reais de estoque em apenas um período e o panetone em dois, pois é o máximo de tempo permitido para estoque para esses produtos.

Os custos de atraso são apresentados no (QUADRO 40) como o atraso não é permitido, todo o triângulo inferior esquerdo é preenchido com altos custos.

A relação entre famílias de itens e recurso é apresentada nas Matrizes de Uso do recurso 1, 2, 3, 4 e 5 nos QUADROS 41, 42, 43, 44 e 45 respectivamente. Nesse caso as matrizes de uso tem os mesmos valores para todos os períodos.

O planejamento é apresentado no QUADRO 46, como a demanda nesse cenário não excede em grande quantidade a capacidade, a maioria dos produtos foi produzida e entregue no mesmo período. No primeiro período, as capacidades normal e hora extra foram usadas para entregas do mesmo período, e a capacidade de terceirização foi usada para atender a demanda do período e produzir para estoque. No segundo período foram utilizadas as capacidades normal e hora extra para atender as demandas de brigadeiro e bolacha, e terceiros e estoque do primeiro período para atender a demanda de panetones. No períodos seguintes, do terceiro ao sexto, foram utilizadas as capacidades normal e horas extras para atender a demanda do mês de brigadeiros e bolacha e a capacidade de terceiros para atender a demanda de panetones.

Uma observação importante é que se o usuário selecionou uma das opções de não permitir terceirização, estoques ou atraso, e mesmo assim o planejamento apresentar essa situação, isso deve ser interpretado como sendo a única opção para atender a demanda, ou seja, não necessariamente a empresa deve terceirizar, estocar, ou atrasar pedidos, mas a capacidade da fábrica não é suficiente para atender os pedidos e deve-se tomar alguma providência para resolver a situação, seja terceirizando, estocando, atrasando, aumentando a capacidade da fábrica ou até mesmo não aceitando pedidos em excesso.

A análise para os dois cenários apresentados permitiu verificar que o modelo e aplicativo apresentam resultados factíveis e coerentes.

Período	1			2			3			4			5			6		
Item	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Demanda	1500	100	100	2500	800	300	3000	1000	100	800	50	100	4400	150	100	500	1600	100

QUADRO 36 - Demanda segundo cenário.

FONTE: O autor (2015).

Período	Modo	Capacidade Recurso 1	Capacidade Recurso 2	Capacidade Recurso 3	Capacidade Recurso 4	Capacidade Recurso 5
1	Normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	Terceiro	200	200	200	200	200
2	Normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	Terceiro	200	200	200	200	200
3	Normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	Terceiro	200	200	200	200	200
4	Normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	Terceiro	200	200	200	200	200
5	Normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	Terceiro	200	200	200	200	200
6	Normal	2640	2640	2640	2640	2640
	hora extra	600	600	600	600	600
	Terceiro	200	200	200	200	200

QUADRO 37 - Capacidade segundo cenário.

FONTE: O autor (2015).

	Período de entrega	1,2,...,6		
Período de produção	Item			
	Modo	1	2	3
1,2,...,6	normal	0,8	3,5	1000000
	hora extra	0,85	3,7	1000000
	terceiro	1000000	1000000	11

QUADRO 38 - Matriz Custos de Produção segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015).

Período de produção	Período de entrega	1			2			3			4			5			6			
		Item	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Normal	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	hora extra	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	Terceiro	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
2	Normal	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	hora extra	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
3	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	1000000	1000000	1000000	
4	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	1000000	1000000	2,2	
5	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	0,37	1,1	
6	Normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

QUADRO 39 - Matriz Custos de Estoque segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015).

		1			2			3			4			5			6		
Período de produção	Período de entrega	1			2			3			4			5			6		
	Item Modo	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	normal	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	normal	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	normal	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	normal	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0	0	0	0
6	normal	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0
	hora extra	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0
	terceiro	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	0	0	0

QUADRO 40 - Matriz Custos de Atraso segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015).

		1		
Período de produção	Período de entrega	1		
	Item Modo	1	2	3
1	Normal	0,05	0,5	0
	hora extra	0,05	0,5	0
	Terceiro	0	0	1

QUADRO 41 - Matriz de Uso Recurso 1 segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015).

		Período de entrega	1,2,...,6		
Período de produção	Item		1	2	3
	Modo				
1,2,...,6	Normal		0	0,25	0
	hora extra		0	0,25	0
	Terceiro		0	0	1

QUADRO 42 - Matriz de Uso Recurso 2 segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015).

		Período de entrega	1,2,...,6		
Período de produção	Item		1	2	3
	Modo				
1,2,...,6	normal		0	1	0
	hora extra		0	1	0
	terceiro		0	0	1

QUADRO 43 - Matriz de Uso Recurso 3 segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015).

		Período de entrega	1,2,...,6		
Período de produção	Item		1	2	3
	Modo				
1,2,...,6	Normal		0,4	0	0
	hora extra		0,4	0	0
	Terceiro		0	0	1

QUADRO 44 - Matriz de Uso Recurso 4 segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015).

		Período de entrega	1,2,...,6		
Período de produção	Item		1	2	3
	Modo				
1,2,...,6	Normal		0,6	1,5	0
	hora extra		0,6	1,5	0
	Terceiro		0	0	1

QUADRO 45 - Matriz de Uso Recurso 5 segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015).

		1			2			3			4			5			6		
Período de produção	Período de entrega																		
	Item Modo	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	normal	1500	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	0	0	100	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	normal	0	0	0	2300	800	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	0	0	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	normal	0	0	0	0	0	0	2000	960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	50	0	0	0	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
5	normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4025	150	0	0	0	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375	0	0	0	0	0
	terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
6	normal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	1600	0
	hora extra	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
	terceiro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

QUADRO 46 - Planejamento segundo cenário.
 FONTE: O autor (2015)

7 CONCLUSÕES FINAIS

O primeiro capítulo desse trabalho faz uma introdução ao tema e apresenta seus objetivos, o segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, o terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados na elaboração, o quarto capítulo apresenta o modelo matemático, o quinto capítulo o aplicativo e o sexto a análise de cenários.

Durante o desenvolvimento desse trabalho o modelo do transporte foi adaptado para o planejamento da produção, a adaptação para o planejamento de apenas um item e com um recurso foi simples, encontrada inclusive na bibliografia pesquisada. A ampliação do modelo para vários itens e vários recursos exigiu mais esforço e ao mesmo tempo apresentou um resultado mais do que satisfatório. O modelo II como foi chamado neste trabalho a adaptação do modelo do transporte para planejamento da produção de vários itens e com vários recursos, deu uma nova interpretação às variáveis do modelo I, como foi chamado o modelo para um único item e único recurso, incluiu a criação de uma nova matriz, chamada de matriz de uso, e de novos vetores de capacidade, além de incluir novas colunas na matriz de custos e decisão, em consequência do planejamento para várias famílias de itens. O modelo II apresentou resultados factíveis e serviu de base para a criação do aplicativo.

O objetivo deste trabalho é propor o uso do modelo de transporte como ferramenta de apoio à decisão para problemas de planejamento da produção, esse objetivo foi alcançado adaptando o modelo do transporte ao planejamento de produção, desenvolvendo um aplicativo em Excel com ajuda da ferramenta vba e do Lingo como otimizador, esse aplicativo foi validado com testes em um horizonte de planejamento de 6 períodos, com mais de um recurso e de uma família de itens, em situações onde a demanda era maior ou menor que a capacidade, era permitido ou não terceirizar, estocar e atrasar pedidos, e essas situações permitiram exemplificar o uso do aplicativo, e como seus resultados devem ser interpretados.

Um ponto de melhoria para o aplicativo PLAN_PRO que se destaca é o otimizador, que por ser um software fechado, é muito pouco difundido entre as empresas, especialmente entre as micro e pequenas, as quais o trabalho

dessa dissertação tem como principal foco, uma solução seria substituí-lo por um otimizador livre.

Como ponto fortes do aplicativo podemos destacar que tem instruções de preenchimento para facilitar seu uso, e para que até empresas sem nenhum processo formal de planejamento e controle da produção possam utilizá-lo sem grandes dúvidas. O aplicativo permite trabalhar com um horizonte de planejamento de no máximo 6 períodos, com 5 famílias de itens e 5 recursos, custos diferenciados por período e modo de produção, possibilita ao usuário escolher se quer ou não terceirizar, estocar e atrasar pedidos, para as duas últimas situações se escolher a opção de estocar e/ou atrasar, pode determinar por quantos períodos. Com todas essas características o aplicativo possibilita o gerenciamento da produção, porque fornece informações confiáveis ao usuário e/ou gestor, mostrando quais as variações no comportamento do planejamento no caso de alterações de capacidade, demanda, políticas de terceirização, estoque e atrasos.

É possível também ampliar o aplicativo, fazendo com que funcione para mais períodos, famílias de itens e recursos se houver a necessidade.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisões**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BILLINGTON, P.; MCCLAIN J.; THOMAS, L. **Mathematical programming approaches to capacity-constrained MRP systems: Review, formulation and problem reduction**. *Management Science*, v. 29, n. 10, p. 1126-1141, 1983.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 Aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção: MRP II/ ERP: conceitos, uso e implantação: base para SAP, Oracle Applications e outros softwares integrados de gestão**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

DANTZIG, G. B.; THAPA, M. N. **Linear Programming 1: Introduction**. Rensselaer: Hamilton Printing Co., 1997.

EREGUNC, S. S.; TUFEKCI, S. **A transportation type aggregate production model with bounds on inventory and backordering**. *European Journal of Operational Research*, 35: 414-425, 1988.

FERNANDES, L. J.; RODRIGUEZ, L. A. T.; CORREIA, A. R.; MARINS, F. A. S. **Planejamento e controle da produção de cilindros para laminação: um estudo de caso quantitativo**. *Produção*, v. 23, n. 1, p. 120, 2013.

GAAFAR, L. **Applying genetic algorithms to dynamic lot sizing with batch ordering**. *Computers & Industrial Engineering*, v. 51, n. 3, p. 433-444, 2006.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração de produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDBERG, A.; TARJAN, R. **Finding minimum cost circulations by cancelling negative cycles**. *Journal of the ACM*, v. 36 n. 4, p. 873–886, 1989.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução a Pesquisa Operacional**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

JUNQUEIRA, R. A. R.; MORABITO, R. **Um modelo de otimização linear para o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho**. *Produção*, v. 16, n. 3, p. 510-525, Set./Dez. 2006.

LI, Y.; CHEN, J.; CAI, X. **Heuristic genetic algorithm for capacitated production planning problems with batch processing and remanufacturing**. *International Journal of Production Economics*, v. 115, n. 2, p. 301-317, 2007.

LI, X.; SHAO, X.; GAO, L.; QIAN, W.; **An effective hybrid algorithm for integrated process planning and scheduling**. *International Journal of Production Economics*, v. 126, n. 2, p. 289-298, 2010.

LUSTOSA, L. *et al.* **Planejamento e Controle da Produção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

MIGUEL, P. A. C. *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MOCQUILLON, C.; LENTÉ, C.; T-KINDT, V. **An efficient heuristic for medium-term planning in shampoo production**. *International Journal of Production Economics*, v. 129, n. 1, p. 178-185, 2011.

MUNHOZ, J. R.; MORABITO, R. **Uma abordagem de otimização robusta no planejamento agregado de produção na indústria cítrica**. *Produção*, v. 23, n. 2, p. 422-435, abr./jun. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132012005000054>

MUNHOZ, J. R.; MORABITO, R. **Otimização no planejamento agregado de produção em indústrias de processamento de suco concentrado congelado de laranja.** *Gestão & Produção*, v. 17, n.3, p. 465-481, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2010000300003>

MURTY, K. G. **Linear and Combinatorial Programming.** Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company, Inc., 1985.

PASSOS, E. J. P. F. **Programação Linear como Instrumento da Pesquisa Operacional.** São Paulo: Atlas, 2008.

PUCCINI, A. L. **Introdução à Programação Linear.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1976.

SIMON, H. A. ***The Shape for Automation: for Men and Management.*** New York: Harper & Row, 1965.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção.** 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: Uma Visão Geral.** 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática.** 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C.; JACOBS, F. R. **Sistemas de Planejamento & Controle da Produção para o Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos.** Tradução Sandra de Oliveira. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

WU, T.; AKARTUNALI, K.; SONG, J.; SHI, L. **Mixed integer programming in production planning with backlogging and setup carryover: modeling and algorithms.** *Discrete Event Dynamic Systems-theory And Applications*, v. 23, n. 2, p. 211-239, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Programa Lingo	87
-----------------------------------	----

APÊNDICE 1

```

data:
    O,D=@ole('C:\Users\DEBORA\Desktop\MESTRADO\Projeto de
Pesquisa\aplicativo.xlsx');

enddata

sets:
    origens/1..O/:capa1,capa2,capa3,capa4,capa5;
    destinos/1..D/:dem;
    rotas(origens,destinos):custo,x,muso1,muso2,muso3,muso4,muso5,cu
stoe,custob;
endsets

data:
    capa1,capa2,capa3,capa4,capa5,dem,custo,muso1,muso2,muso3,muso4,
muso5,custoe,custob=@ole('C:\Users\DEBORA\Desktop\MESTRADO\Projeto de
Pesquisa\aplicativo.xlsx');
enddata

min=@sum(origens(i): @sum(destinos(j):
x(i,j)*custo(i,j)+x(i,j)*custoe(i,j)+x(i,j)*custob(i,j)));
@for(origens(i):
    @sum(destinos(j): muso1(i,j)*x(i,j))<=capa1(i);
    );
@for(origens(i):
    @sum(destinos(j): muso2(i,j)*x(i,j))<=capa2(i);
    );
@for(origens(i):
    @sum(destinos(j): muso3(i,j)*x(i,j))<=capa3(i);
    );
@for(origens(i):
    @sum(destinos(j): muso4(i,j)*x(i,j))<=capa4(i);
    );
@for(origens(i):
    @sum(destinos(j): muso5(i,j)*x(i,j))<=capa5(i);
    );
@for(destinos(j):
    @sum(origens(i): x(i,j))>=dem(j);
    );

data:
@ole('C:\Users\DEBORA\Desktop\MESTRADO\Projeto de
Pesquisa\aplicativo.xlsx')=x;
enddata

@for(rotas(i,j):
    @gin(x(i,j)));

```

APÊNDICE 1 - Programa Lingo