

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELO DE PLANEJAMENTO AGREGADO
MULTIOBJETIVO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
MODALIDADE MESTRADO ACADÊMICO
POR

ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO

Orientador: Prof. Fernando Menezes Campello de Souza, PhD

RECIFE, MARÇO / 2006

A447m Almeida Filho, Adiel Teixeira de

Modelo de planejamento agregado multiobjetivo / Adiel Teixeira de Almeida Filho. - Recife: O Autor, 2006.
xii,70 f., il., figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Dpto. de Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEP, 2006.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção – Planejamento agregado. 2. Estratégia de produção. 3. Programação linear multiobjetivo – Step Method. I. Título.

658 CDD (22. ed.)

BCTG/2006-36



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DE

ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO

“Modelo de Planejamento Agregado Multiobjetivo”.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO **APROVADO COM DISTINÇÃO**.

Recife, 03 de março de 2006.

Prof. FERNANDO MENEZES CAMPELLO DE SOUZA, PhD (UFPE)

Profª. ANA PAULA CABRAL SEIXAS COSTA, Doutor (UFPE)

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

Prof. CARLOS FRANCISCO SIMÕES GOMES, Doutor (CASNAV-RJ)

*“Escolher e preferir são tarefas que o decisor tem de exercer por si próprio, ninguém pode realizá-las por ele, ninguém pode tomar o seu lugar. Mesmo quando, em desespero, ele se abandona ao destino e **decide** não decidir”.*

ZELNY (1982).

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A vontade de atingir objetivos cada vez maiores aliada às necessidades de crescimento e desenvolvimento profissional serviram de motivação para aceitar o desafio de concluir o curso de mestrado acadêmico em doze meses. Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de aprendizado, sem os quais jamais teria chegado até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Fernando Campello, pela atenção e pelas importantes e inestimáveis contribuições através de seu amplo conhecimento e ensinamentos compartilhados.

Ao meu pai, Prof. Adiel, pela amizade, dedicação, disposição e atenção durante toda a trajetória percorrida, bem como durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe, Maria Stella, pela dedicação e amor dispensados, aos meus irmãos, pela amizade que existe entre nós e a Renata, por todo carinho e incentivo nos momentos de dificuldade.

Aos amigos, especialmente Gabriel Barros, Marco Diniz e Túlio Bezerra, que sempre reclamaram da minha ausência, justificada pela necessidade de estudar para cumprir com os prazos exigidos.

Meus agradecimentos ao PPGEP/UFPE e a todos os professores que se esforçam para manter este programa entre os melhores do Brasil, especialmente à Prof.^a Ana Paula Cabral, pelo seu empenho como coordenadora do programa e pelo acompanhamento desde o período da graduação. Agradeço também à Juliane, com a qual pude sempre contar para me auxiliar na resolução de questões administrativas e burocráticas.

Aos meus amigos do GPSID, especialmente Rodrigo pelo companheirismo, amizade e idéias que trocamos desde o primeiro período da graduação, à Luciana, Cristiano, Danielle, Anderson, Ana Paula Gusmão e a Prof.^a Caroline pela amizade e troca de experiências.

À todos os colegas do curso com os quais compartilhei dificuldades e agora também vitórias, principalmente Heldemárcio, Afrânio, Carlos Sant Anna, Leonardo e àqueles que me acompanham desde o início do curso de graduação (Andreza, Rodrigo, Márcio e Hélder).

Devido à vontade de expressar minha gratidão àquelas pessoas que de alguma forma ajudaram a superar obstáculos, e me incentivaram a continuar o caminho que me levou a conquista do título de mestre, me arrisquei a citar nomes, quando mais que simplesmente agradecer eu queria compartilhar essa conquista com todos que de uma forma ou de outra contribuíram para que ela acontecesse.

RESUMO

A atividade de planejamento agregado consiste numa etapa intermediária do planejamento da produção, que busca uma estratégia de atendimento da demanda que direcione as quantidades de itens a serem produzidos em cada alternativa de produção, abrangendo todos os períodos do horizonte de planejamento, os níveis de estoque ao longo do horizonte de planejamento e as variações na força de trabalho para que a demanda prevista seja atendida. Buscando o alinhamento da atividade de planejamento agregado com a estratégia de produção definida, este trabalho apresenta dois modelos de apoio multicritério a decisão para o problema de planejamento agregado, ambos baseados no mesmo princípio, o de estender as prioridades da estratégia de produção para as decisões a serem tomadas no contexto do planejamento agregado da produção. Dessa maneira, o gerente pode fazer o planejamento dos recursos a serem utilizados para atender à demanda priorizando os objetivos de desempenho que melhor refletem os fatores competitivos do negócio. Os modelos propostos neste trabalho buscam fazer com que um problema típico do contexto de planejamento da produção permita que a função produção possa atuar como implementadora da estratégia de produção adotada. A cada estratégia de atendimento da demanda será associado um custo. Portanto, o modelo aqui proposto busca encontrar uma estratégia de atendimento da demanda (obtida através do Planejamento Agregado) que esteja alinhada com as estratégias de produção definidas, respeitando a prioridade e as relações estabelecidas entre os objetivos de desempenho.

Palavras Chave: Planejamento Agregado da Produção, Estratégia de Produção, Programação Linear Multiobjetivo, Step Method.

ABSTRACT

Aggregate Planning activity is a relevant stage of production planning process. It looks for a strategy in order to attend the demand given capacity constraints. The plan consists of the amount of items to be produced in each production alternative, for all periods of planning term. The stock levels along planning term and variations in workforce are accounted for, so that foreseen demand is attended. This work presents a model based on multicriteria decision analysis with the aim of overcome the problem of aggregate planning. This decision model takes into account performance objectives obtained in the manufacturing strategy planning process. The performance objectives are analyzed according to qualifying characteristics. Then, the order winners performance objectives are introduced in the multicriteria decision model. In this sense, the decision maker chooses the most appropriate combination of resources to attend the demand, according to the trade-offs amongst the performance objectives. Therefore resulting aggregate plan reflects the competitive factors of the business. The proposed decision model allows the implementation of the manufacturing strategy by the production function and indicates to the decision maker the appropriate alternative which is aligned with the manufacturing strategies.

Keywords: Aggregate Planning, Manufacturing Strategy, Multicriteria Analysis, Multi Objective Linear Programming, Step Method.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2	BASE CONCEITUAL.....	5
2.1	ESTRATÉGIA DE PRODUÇÃO	5
2.1.1	<i>Objetivos de Desempenho</i>	6
2.1.2	<i>Classificação dos Objetivos de Desempenho</i>	8
2.2	PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO	9
2.2.1	<i>Planejamento da Capacidade</i>	11
2.2.2	<i>Planejamento Agregado</i>	12
2.2.2.1	Modelo de Tentativa e Erro	18
2.2.2.2	Modelo de Programação Linear.....	18
2.2.3	<i>Programação e Controle da Produção</i>	18
2.3	APOIO MULTICRITÉRIO A DECISÃO	20
2.3.1	<i>Programação Linear Multiobjetivo</i>	20
2.3.1.1	Conceitos Básicos.....	21
2.3.1.2	Métodos de Programação Linear Multiobjetivo.....	22
2.3.1.2.1	Método Lexicográfico	23
2.3.1.2.2	Programação por Metas (Goal Programming).....	23
2.3.1.2.3	STEM (Step Method)	24
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	28
3.1	REVISÃO DA LITERATURA SOBRE PLANEJAMENTO AGREGADO	28
3.2	O ESTADO DA ARTE	32
4	MODELO PROPOSTO DE PLANEJAMENTO AGREGADO MULTIOBJETIVO	35
4.1	MODELO DE PLANEJAMENTO AGREGADO MULTIOBJETIVO (MPAM).....	35
4.2	MODELO GENERALIZADO DE PLANEJAMENTO AGREGADO MULTIOBJETIVO (MGPAM).....	42
4.2.1	<i>Desafios</i>	44
5	ESTUDO DE CASO	48
5.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	48
5.2	APLICAÇÃO DO MODELO.....	53
5.3	RESULTADOS.....	54

6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
6.1	CONCLUSÕES	62
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Valor dos benefícios competitivos de critérios ganhadores, qualificadores e menos importantes, Adaptado de Slack et al. (1996).....	9
Figura 2.2 – Gráfico da demanda agregada prevista sob a restrição de capacidade agregada, Adaptado de Slack et al. (1996).....	14
Figura 2.3 – Algoritmo do STEM, Fonte: Clímaco et al. (2003).....	25
Figura 4.1 – Comportamento dos parâmetros para a Qualidade.....	38
Figura 4.2: Modelo Generalizado de Planejamento Agregado Multiobjetivo (MGPAM).....	43
Figura 4.3 – Ilustração dos seis fluxos definidos por Forrester (1967) numa indústria, Fonte: Forrester (1967).....	45
Figura 4.4 – Dinâmica do ambiente da produção até entrega do produto ao consumidor final, Fonte: Forrester (1967).....	46
Figura 4.5 – Dinâmica da publicidade sobre o mercado consumidor, Fonte: Forrester (1967).....	47
Figura 5.1 – Comparação entre o custo da alternativa “Ideal” e a recomendação.....	59
Figura 5.2 – Comparação entre a Credibilidade da alternativa “Ideal” e a recomendação.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplos de medidas de capacidade através da produção e de insumos	11
Tabela 2.2 – Tabela de ótimos individuais.....	26
Tabela 5.1 – Custo unitário de produção para os regimes de produção disponíveis	48
Tabela 5.2 – Parâmetros para a função objetivo da Credibilidade.....	49
Tabela 5.3 – Demanda prevista para o horizonte de planejamento	52
Tabela 5.4 – Solução ótima para o objetivo Custo Total Anual	55
Tabela 5.5 – Solução ótima para o objetivo Credibilidade	56
Tabela 5.6 – Tabela de ótimos individuais.....	56
Tabela 5.7 – Solução final após a relaxação da função objetivo do Custo Total Anual	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	17
Equação 2.2	17
Equação 2.3	26
Equação 4.1	36
Equação 4.2	37
Equação 4.3	40
Equação 4.4	40
Equação 4.5	42
Equação 5.1	53

1 INTRODUÇÃO

Grande parte das decisões tomadas durante a produção de bens e serviços são feitas sem o suporte de uma metodologia formal de apoio a decisão. Isto se justifica em virtude das conseqüências destas decisões isoladas, principalmente aquelas relacionadas ao nível operacional.

Contudo se faz necessário salientar que os resultados obtidos como conseqüência de algumas destas decisões podem determinar o futuro do sistema de produção para o qual a decisão é tomada.

Muitas decisões tomadas dentro do contexto de planejamento são consideradas estratégicas, portanto merecem uma abordagem adequada para o processo de apoio a decisão. A literatura apresenta diversas abordagens qualitativas e quantitativas, contudo, ainda existe muito a ser desenvolvido nessa área, seja pela combinação de abordagens quantitativas e qualitativas, seja pela proposição de novas abordagens para tratar estes problemas. Muitas abordagens qualitativas apresentam deficiências por não tratarem os problemas de forma adequada, pois sem que haja a devida quantificação dos aspectos de melhoria a serem avaliados, os problemas são tratados apenas de uma forma superficial, não sendo possível fazer um acompanhamento e uma avaliação para constatar se o problema realmente foi resolvido, e se resolvido, se foi uma solução satisfatória. Esta é uma das razões pelas quais se optou por desenvolver uma nova abordagem quantitativa para o planejamento agregado da produção.

Dentre as atividades do planejamento da produção, o Planejamento Agregado ocupa uma posição intermediária, observando-se três etapas:

- O Planejamento da Capacidade é a primeira etapa de planejamento que no nível estratégico (longo prazo), determina o tamanho de plantas industriais e as chances da empresa atingir determinados níveis máximos de produção, avaliando questões relativas à demanda potencial, ganhos de escala, viabilidade econômica (ponto de equilíbrio) entre outros.
- O Planejamento Agregado procura conciliar as restrições de capacidade com a previsão de demanda. Considerando estas restrições constantes a médio prazo, o planejamento agregado busca uma alternativa de produção que satisfaça a demanda através de variações da força de trabalho, da utilização de estoques e

da terceirização de parte da produção quando possível, ou influenciando a demanda.

- A Programação e o Controle da Produção busca sistematizar e estabelecer uma rotina para que as ordens de produção sejam concluídas posteriormente.

O Planejamento Agregado, também conhecido por escalonamento da produção e da força de trabalho, tem sido tema de interesse dos pesquisadores por quase 50 anos. Os trabalhos pioneiros surgiram na década de 50, despertando um rico segmento na literatura de Pesquisa Operacional. Já na metade da década de 70, existiam trabalhos suficientes para revisões da literatura. Este tema de pesquisa passou por uma fase natural de evolução, onde são incrementados os níveis de complexidade e são relaxadas hipóteses buscando aproximar os modelos da realidade encontrada nas empresas, fase se estende até os dias de hoje.

As técnicas de planejamento agregado ajudam os gerentes a decidirem entre diversas opções para suavizar a produção (quando é possível estocar produtos em períodos de baixa demanda para que estes sejam fornecidos ao mercado durante períodos de alta demanda).

Neste trabalho é proposto um modelo de decisão para o problema de planejamento agregado da produção, utilizando critérios que não vislumbrem apenas o contexto financeiro, mas que quantifiquem e agreguem alguns dos diversos atributos que são influenciados pela estratégia de produção adotada, tais como qualidade, flexibilidade, rapidez e credibilidade que precisam ser quantificados e mensurados.

1.1 Justificativa

Por ser um tema bastante tratado na literatura, o Planejamento Agregado é um assunto relevante que vem sendo explorado há quase 50 anos. Apesar de terem sido publicados diversos trabalhos nessa linha, a maior parte dos modelos desenvolvidos que consideram múltiplos objetivos utilizam apenas diferentes custos de produção. A partir da década de 90 surgiram trabalhos que acrescentavam novos objetivos aos modelos de planejamento agregado, considerando as variações na força de trabalho, custos tangíveis e intangíveis associados às alternativas de planejamento, entre outros.

Todavia nenhum trabalho abordou o problema de planejamento de produção buscando um alinhamento com a estratégia de produção adotada pela empresa, procurando maximizar os aspectos ganhadores de pedidos visando escolher a alternativa de produção que garanta aumento da vantagem competitiva.

1.2 Objetivos do Trabalho

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo multicritério de apoio a decisão para a atividade de Planejamento Agregado, incorporando os aspectos definidos na estratégia de produção adotada.

Nesse sentido, busca-se alinhar as atividades de planejamento da produção à estratégia de produção adotada, passando a considerar nas atividades de planejamento não apenas aspectos de natureza monetária (como custo usualmente), avaliando fatores que são influenciados pela estratégia de produção como qualidade, flexibilidade, credibilidade e rapidez.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Avaliar as possibilidades de métodos de apoio multicritério a decisão que podem ser aplicados ao problema de planejamento agregado da produção;
- Estruturar um procedimento multiobjetivo de planejamento agregado da produção que considere fatores tais como Custo, Qualidade, Credibilidade, Rapidez e Flexibilidade;
- Estabelecer um novo modelo multicritério de apoio a decisão para o problema de planejamento agregado da produção;
- Ilustrar o modelo proposto através de uma aplicação numérica;

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos:

- O Capítulo I apresenta uma visão geral dos assuntos abordados neste trabalho; também define o objetivo geral e específico deste estudo.
- A Base Conceitual que fundamenta esta dissertação foi desenvolvida no Capítulo II, que se inicia com uma breve visão de Estratégia de Produção, dando maior enfoque nos Objetivos de Desempenho, que representam aspectos da vantagem competitiva nas operações. No decorrer do capítulo são apresentados

os aspectos mais significativos relacionados ao Problema de Planejamento Agregado da Produção e algumas abordagens para este problema. Em seguida são apresentados conceitos de Apoio Multicritério a Decisão, onde alguns métodos de apoio multicritério a decisão são abordados com enfoque nos métodos de Programação Linear Multiobjetivo (PLMO ou MOLP – *Multiple Objective Linear Programming*). O primeiro método abordado foi o Método Lexicográfico, pela sua simplicidade e facilidade de implementação. O segundo método abordado é o de Programação por Metas (*Goal Programming*) por ser um dos métodos mais divulgados e já ter sido aplicado ao contexto do Planejamento Agregado da Produção; o terceiro método abordado é o STEM (*Step Method*), um método iterativo de PLMO, que permite a interação com o decisor para que este especifique a quantidade que está disposto a sacrificar na função objetivo cujo valor considera mais satisfatório visando melhorar o desempenho das demais funções objetivo.

- No Capítulo III é feita uma revisão da literatura sobre os trabalhos que têm sido publicados sobre o problema de Planejamento Agregado de Produção, onde são apresentadas algumas abordagens desenvolvidas para solucionar o problema.
- No Capítulo IV é apresentado o Modelo de Planejamento Agregado Multiobjetivo proposto neste trabalho. É apresentado também neste capítulo um modelo generalizado para o Modelo de Planejamento Agregado Multiobjetivo. Este modelo generalizado oferece uma estrutura e uma seqüência de passos para que o modelo multiobjetivo possa ser aplicado com maior flexibilidade.
- Em seguida é feita no Capítulo V uma aplicação numérica com Modelo de Planejamento Agregado Multiobjetivo proposto neste trabalho.
- Finalmente, no Capítulo VI serão apresentados as conclusões e os resultados mais importantes obtidos com o desenvolvimento deste trabalho. Ainda neste último capítulo, serão feitas sugestões para futuros trabalhos com o objetivo de dar continuidade à linha de pesquisa ora desenvolvida.

2 BASE CONCEITUAL

A literatura apresenta um sistema produtivo como um conjunto de atividades e operações inter-relacionadas envolvidas na produção de bens ou serviços. Segundo essa definição, um sistema produtivo é um sistema sócio-técnico, que sofre influências internas e externas que afetam o seu desempenho (MOREIRA, 2000; SLACK *et al.*, 1996).

No ambiente interno são encontradas áreas funcionais que englobam as diversas funções necessárias para suportar esse sistema, tais como marketing, finanças, recursos humanos, destacando-se a produção que diz respeito ao processo de transformação dos recursos produtivos em bens ou serviços.

A gerência, responsável pelas decisões tomadas na empresa, divide-se de acordo com o grau de impacto das conseqüências das decisões tomadas. As atividades de Planejamento caracterizam o nível estratégico, que envolve horizontes de longo prazo, o que aumenta o grau de incerteza e os riscos associados às decisões tomadas por esta gerência. O nível tático é um nível intermediário, onde são tomadas decisões dentro do contexto da alocação e o planejamento da utilização dos recursos que envolvem horizontes de médio prazo e um grau de risco moderado, pois as decisões tomadas nesse nível não são afetadas por variáveis externas, a não ser a demanda. O nível subsequente é o nível operacional, que envolve decisões rotineiras, como a alocação de carga aos departamentos produtivos e a programação da produção, cujas conseqüências isoladas não são consideradas tão graves quanto as conseqüências dos dois níveis anteriores.

2.1 Estratégia de Produção

A literatura define estratégia de produção como sendo uma coleção de modelos de escolha que determinam a estrutura, os recursos e a infra-estrutura do sistema de produção. No entanto, Miller & Hayslip (1989) definem estratégia de produção como o padrão projetado para as alternativas de produção formuladas para melhorar a performance nos objetivos de desempenho, e para apoiar as estratégias do negócio.

Segundo Wheelwright (1984), o principal objetivo da estratégia de produção é desenvolver e apoiar vantagens competitivas duradouras, portanto, uma estratégia eficaz nem sempre resulta numa produção com eficiência máxima, mas naquela que se ajusta às necessidades do negócio. Nesse sentido, as decisões a serem tomadas devem considerar um

contexto multiobjetivo, não fazendo sentido apenas considerar uma solução ótima, mas um meio termo entre as soluções ótimas dos objetivos que representam as necessidades do negócio.

Estas necessidades do negócio estão relacionadas às necessidades dos clientes de um setor específico e se dividem em aspectos que representam o desdobramento dos cinco objetivos de desempenho da produção.

O fato de existirem diversas nomenclaturas e definições para o contexto de estratégia de produção justificou o desenvolvimento e análise de uma taxonomia de estratégias de produção apresentada por Miller & Roth (1994). Nesse trabalho, Miller & Roth (1994) utilizaram métodos de análise através de *clusters* que observam a importância relativa associada a onze aspectos que oferecem vantagem competitiva em manufatura e definem o papel estratégico da função produção. Estes aspectos são resultado do desdobramento dos cinco objetivos de desempenho da produção, representados pelo Custo, Flexibilidade de Design, Flexibilidade de Volume de Produção, Conformidade, Performance dos Produtos, Velocidade na Entrega, Confiança, Serviço Pós-Venda, Publicidade, Ampla Rede de Distribuição e Distribuição de uma ampla rede de produtos.

Dessa forma, a literatura apresenta de forma básica e generalizada apenas cinco objetivos de desempenho para obter vantagem baseada em produção. Os objetivos são Custo, Qualidade, Rapidez, Flexibilidade e Credibilidade (HILL, 1993; SLACK *et al.*, 1996; SLACK, 2002).

2.1.1 Objetivos de Desempenho

Slack (2002) apresenta uma abordagem em que “vantagem em manufatura significa fazer melhor”. Para Slack, “fazer melhor” significa cinco coisas:

- **Fazer Certo** – não cometer erros; produtos sem erros e sempre de acordo com as especificações de projeto (Vantagem em Qualidade).
- **Fazer Rápido** – fazer com que o intervalo de tempo entre o início do processo de manufatura e a entrega do produto ao cliente seja menor do que o da concorrência (Vantagem de Velocidade).
- **Fazer Pontualmente** – cumprir os prazos de entrega, o que implica estar apto a estimar datas de entrega com acuidade (Vantagem de Credibilidade).

- **Mudar o que está sendo feito** – ser capaz de variar e adaptar a operação, seja porque as necessidades dos clientes são alteradas, seja por mudanças no processo de produção (Vantagem da Flexibilidade).
- **Fazer Barato** – fazer produtos a custos mais baixos que os concorrentes conseguem administrar (Vantagem de Custo).

Portanto os Objetivos de Desempenho buscam representar fatores competitivos advindos da função produção.

O **Objetivo de Desempenho da Qualidade** busca elevar a qualidade dos produtos através da elevação do índice de conformidade, do aumento da performance dos produtos, de altas especificações (luxo), especificações apropriadas (adequação ao uso, abordagem de Garvin (2002)) e demais conceitos e abordagens para qualidade.

O **Objetivo de Desempenho Rapidez ou Velocidade**, busca maximizar a velocidade da entrega, minimizar o *lead time* de produção, aumentar a velocidade nas compras de matérias primas, inclusive, influenciar na dinâmica de lançamento de novos produtos, aumentando a velocidade com a qual são desenvolvidos e lançados novos produtos no mercado.

O **Objetivo de Desempenho Credibilidade**, procura fazer com que as entregas sejam feitas na data devida e que seja mantida a integridade do produto acabado até que esteja sob a responsabilidade do cliente.

O **Objetivo de Desempenho Flexibilidade**, busca proporcionar um número maior de opções para o cliente através de mais opções de modelos (Flexibilidade de Design, Mix de Produtos), maior capacidade de se adaptar a diferentes níveis de demanda (sazonalidade), maior capacidade de atender o mercado (ampla rede de distribuição), capacidade de atender clientes especiais (Flexibilidade para expedir pedidos prioritários), capacidade para adaptar produtos e serviços aos requisitos específicos dos consumidores, intercambiabilidade na produção para poder atender futuras gerações de produtos, entre outros que podem contribuir como fatores competitivos.

O **Objetivo de Desempenho Custo**, busca a minimização do preço do produto final como um fator competitivo, podendo ser alcançado através de ganhos de escala e da redução da variedade dentro dos processos e das atividades de produção.

2.1.2 Classificação dos Objetivos de Desempenho

Para traduzir as necessidades dos consumidores e determinar a importância relativa entre os fatores competitivos, uma forma para classificar os objetivos de desempenho foi estabelecida por Hill (1993). Analisando o comportamento dos consumidores é possível decidir se é realmente necessário “fazer melhor” que a concorrência para obter vantagem em manufatura.

O que Hill propõe é que sejam determinados quais objetivos de desempenho são importantes para o sucesso competitivo. A abordagem proposta por Hill pretende determinar quais aspectos da competitividade nos quais o desempenho da produção deve estar acima de determinado nível para ser considerado pelo cliente, pois abaixo deste nível de desempenho a empresa sequer passa a ser considerada como fornecedora. Os Objetivos de Desempenho que representem esses aspectos de competitividade são classificados por Hill como **Qualificadores de Pedido**, onde o nível crítico de desempenho passa a ser um Critério Qualificador de Pedidos. Portanto qualquer melhora nos fatores qualificadores acima do nível qualificador não acrescentará benefício competitivo relevante.

Alguns aspectos da competitividade tornam-se mais importantes por não haver um determinado nível de saciedade para estes. Diferentemente do que ocorre com os **Qualificadores de Pedido**, onde existe um nível crítico de desempenho a ser atingido e após este nível o consumidor apresenta um comportamento de saciedade, alguns aspectos são classificados como **Ganhadores de Pedido**, pois são considerados pelos consumidores como razões-chaves para comprar o produto ou serviço (SLACK *et al.*, 1996). Aspectos ganhadores de pedido tornam-se Critérios Ganhadores de Pedidos uma vez que foram satisfeitas as condições para que a empresa seja classificada como fornecedora (Critério Qualificador de Pedidos). A empresa que apresentar melhor desempenho nesses aspectos competitivos será escolhida pelo cliente. Slack *et al.* (1996) considera que os Critérios Ganhadores de Pedido são os que direta e significativamente contribuem para a realização de um negócio, portanto aumentar o desempenho em um Critério Ganhador de Pedidos aumenta a probabilidade de que sejam realizados mais pedidos.

Dessa forma, Hill (1993) estabelece uma forma de classificar os aspectos da competitividade mais importantes e os aspectos menos importantes, dando uma interpretação dos Objetivos de Desempenho como critérios a serem levados em consideração pelos clientes antes de efetuarem a compra.

Através da classificação proposta por Hill (1993), pode-se visualizar o que seria o formato de uma função valor ou utilidade de cada objetivo de desempenho para o mercado cliente da empresa, onde cada uma destas funções representaria uma forma de mensurar a satisfação proporcionada aos clientes em diversos níveis de cada um dos aspectos da competitividade.

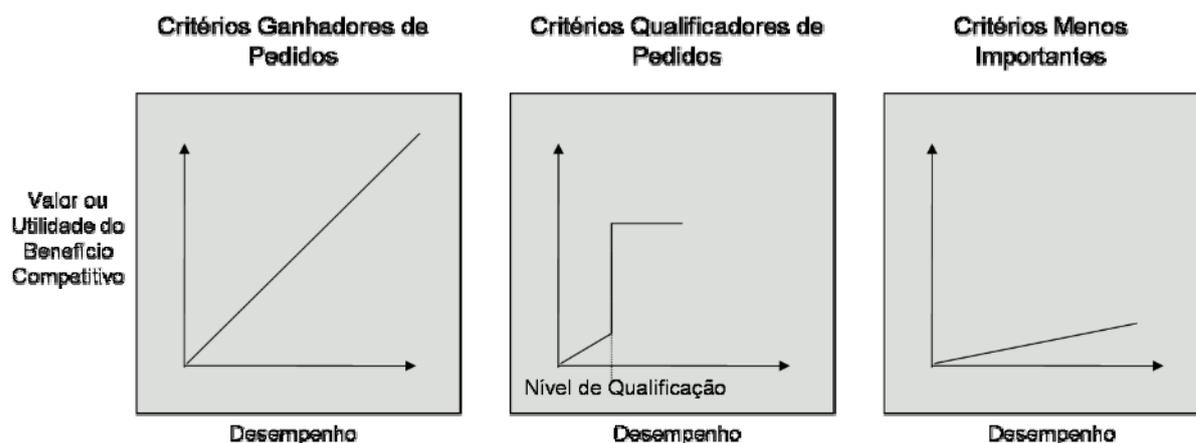


Figura 2.1 – Valor dos benefícios competitivos de critérios ganhadores, qualificadores e menos importantes, Adaptado de Slack et al. (1996)

2.2 Planejamento da Produção

De acordo com Corrêa *et al.* (2001), a necessidade de planejamento deriva diretamente da inércia intrínseca dos processos decisórios que afetam as necessidades futuras de capacidade. Esta inércia pode ser entendida como o tempo necessário para que o resultado de uma decisão tomada no passado tenha efeito. Se por acaso fosse possível decidir alterações ao longo do processo produtivo e que estas pudessem ser implementadas instantaneamente, não haveria necessidade de efetuar nenhuma das atividades de planejamento, pois seria possível decidir no momento o que seria suficiente.

Em qualquer que seja o contexto de planejamento é necessário definir um horizonte de planejamento que representa o intervalo de tempo, ou seja, o tamanho do tempo futuro sobre o qual se tenha interesse em desenvolver uma visão. A definição deste intervalo de tempo (que representa o horizonte de planejamento) deve considerar aquele ponto no futuro em que as decisões tomadas no presente não exerçam influência relevante.

As atividades de planejamento podem se dividir de acordo com o nível das decisões a serem tomadas no contexto de planejamento, portanto o horizonte de planejamento definirá o tipo das decisões a serem tomadas nas atividades de planejamento, sendo estas de nível operacional, tático ou estratégico. Estes níveis gerenciais (operacional, tático e estratégico) são caracterizados pelo grau de incerteza associado aos parâmetros sob os quais se toma uma decisão (risco) e pela inércia do processo decisório. À medida que aumenta a inércia, aumentam os riscos associados àquelas decisões, pois à medida que aumentam os intervalos de tempo entre a tomada da decisão e a concretização dos resultados aumentam as incertezas (risco) associadas à decisão.

- No Nível Estratégico são tomadas decisões mais amplas em escopo (envolvendo políticas corporativas, planejamento de linhas de produtos, localização de novas plantas industriais, localização de novos centros de distribuição) caracterizadas por horizontes de longo prazo e, conseqüentemente graus elevados de risco (pelas conseqüências das decisões) e de incerteza (pela inércia do processo decisório).
- No Nível Tático são tomadas decisões de escopo mais estreito que o anterior, onde aquelas decisões envolvem tipicamente a alocação e a utilização dos recursos. As decisões tomadas neste nível não envolvem características corporativas, contudo abrangem características que dizem respeito à fábrica para a qual se faz o planejamento. As conseqüências das decisões tomadas neste nível são consideradas moderadas, pois dizem respeito apenas a uma planta, e não à organização como um todo (diferentemente das decisões no nível estratégico), portanto as decisões tomadas neste nível envolvem horizontes de médio prazo e graus de risco e incerteza moderados. O Planejamento Agregado da Produção (enfoque maior desta dissertação) é um bom exemplo de uma atividade de nível tático, que é conduzida no nível intermediário da organização (nível gerencial médio).
- No Nível Operacional são tomadas decisões rotineiras, que envolvem horizontes curtos de tempo e riscos muito menores, pois considerando um horizonte de tempo pequeno existe menos incerteza associada.

2.2.1 Planejamento da Capacidade

A capacidade se refere à quantidade máxima de produtos que podem ser produzidos durante um determinado intervalo de tempo. A capacidade é medida em função de um determinado produto, dos recursos disponíveis para a sua produção (uma linha de produção, uma célula, um departamento, ou por exemplo uma fábrica inteira), e de uma unidade de tempo relativa à ocupação dos recursos disponíveis (por um ano, por semestre, por mês, por semana ou por hora).

De acordo com Moreira (2000) existem duas classificações para a forma com a qual é medida a capacidade de uma unidade produtiva:

- **Através da Produção:** onde as unidades de medida são comuns ao tipo de produto produzido. Ou seja, pelo fato de não ser possível misturar medidas diferentes, a capacidade só pode ser medida através da produção se existir apenas um produto ou se todos os produtos forem semelhantes.
- **Através de Insumos:** diferentemente do setor industrial, o setor de serviços possui maiores variações. Dessa forma, a medida pela produção é inviabilizada devido à variedade de serviços a serem oferecidos, assim como os recursos demandados para que estes sejam prestados. Um exemplo no setor industrial é aquele onde existem diversos modelos de produtos, e esta variedade faz com que os recursos demandados para a produção se diferenciem bastante de acordo com o modelo a ser produzido. Para estes casos, a capacidade é medida de acordo com o insumo que seja mais representativo do serviço prestado ou modelo produzido.

Tabela 2.1 – Exemplos de medidas de capacidade através da produção e de insumos

Capacidade	Instituição	Medida de capacidade
Produção	Indústria de Plástico	Tonelada de Plástico/mês
	Companhia de Eletricidade	Megawatts/hora
	Fazenda	Tonelada de Grãos/ano
	Siderúrgica	Tonelada de Aço/ano
Insumos	Companhia Aérea	Número de Assentos/ vôo
	Teatro	Número de Assentos/ vôo
	Hotel	Número de Quartos
	Hospital	Número de Leitos

Adaptado de Moreira (2000)

Na Tabela 2.1 podem ser observados alguns exemplos de como as empresas utilizam a medida de capacidade seja pela produção, seja pelos insumos.

O planejamento da capacidade se refere à forma como se planeja e se tomam decisões para o dimensionamento de uma unidade produtiva, que pode se referir a uma linha de produção, uma célula, um departamento, ou até a uma fábrica inteira.

Basicamente são avaliadas questões financeiras como a taxa de retorno do investimento feito na unidade produtiva, o ponto de equilíbrio, questões de mercado como as estimativas para a demanda a ser satisfeita, as habilidades técnicas dos trabalhadores disponíveis na região (pois a habilidade técnica dos funcionários pode aumentar a capacidade) e outros fatores externos, tais como isenções fiscais, legislações ambientais, padrão de qualidade e de desempenho exigido pelos clientes.

2.2.2 Planejamento Agregado

O Planejamento Agregado representa uma das mais importantes decisões a médio prazo, formando uma ponte de ligação entre o Planejamento da Capacidade e a Programação e Controle da Produção (PCP) (MOREIRA, 2000; SLACK *et al.*, 1996; MONKS, 1987; HEISER & RENDER, 1993; GAITHER & FRAZIER, 2001; DAVIS *et al.*, 2001).

O Planejamento Agregado consiste em elaborar uma estratégia de atendimento da demanda, onde é feito um balanceamento da produção com a demanda prevista para horizontes de tempo entre seis e doze meses. Este balanceamento pode ser feito atuando-se sobre os recursos produtivos capazes de influenciar e alterar a capacidade de produção em curto e curtíssimo prazo. O que se procura é combinar estes recursos produtivos, de maneira a atender simultaneamente a demanda e conseguir o custo mínimo.

Para efetuar o balanceamento da produção com a demanda, são utilizadas diversas opções, tais como contratar e demitir funcionários, utilizar horas extras, subcontratar parte da produção, acumular estoques nos meses de baixa demanda e utilizá-los para cobrir o excesso de demanda nos meses de alta demanda, dentre outros. Contudo, o Planejamento Agregado pode ser utilizado com uma orientação inversa, quando o problema a ser tratado não é o déficit da produção, e sim a demanda. Neste sentido, haverá a busca pela eliminação de recursos onerosos, buscando a redução dos custos da produção para que estes sejam adaptados a demandas insuficientes.

Moreira (2000) afirma que o Planejamento Agregado é um processo aproximado, pois trabalha com previsões de demanda sujeitas a vários fatores tais como sazonalidade, variações erráticas, o momento econômico, etc. Dentre as limitações inerentes ao uso desta técnica, considera-se como principal a dificuldade de planejar o emparelhamento da produção com a demanda prevista para cada produto, individualmente, quando a empresa possui uma grande variedade de produtos. Portanto é necessário que sejam utilizadas unidades de medida comuns para expressar a demanda, possibilitando a agregação de tais produtos, justificando o nome de Planejamento “Agregado”.

Dentro do contexto de planejamento da produção, o Planejamento Agregado ocupa uma posição intermediária. Acima do Planejamento Agregado, observa-se o Planejamento da Capacidade que no nível estratégico (longo prazo), determina o tamanho de plantas industriais e as chances da empresa atingir determinados níveis máximos de produção. Observando as restrições de capacidade máxima, consideradas constantes em médio prazo, o Planejamento Agregado procura conciliá-las com a previsão de demanda.

Diante de restrições de capacidade constantes, ainda assim é possível aumentar a produção dentro de certos limites caso seja necessário para atender a demanda, contudo é necessário escolher dentre um conjunto de ações, aquela que seja mais adequada à estratégia da empresa, onde a escolha é tarefa do Planejamento Agregado.

As decisões tomadas após esta etapa do planejamento são (sumarizadas) aquelas que dizem respeito ao Programa Mestre da Produção ou simplesmente Plano de Produção, que estabelece o que será efetivamente produzido no horizonte de curto prazo (semanas). O Programa Mestre da Produção serve para transladar o Planejamento em programações individualizadas, servindo para avaliar as necessidades imediatas de capacidade produtiva, para auxiliar a definição do cronograma de compras e estabelecer as prioridades entre os produtos na programação (MOREIRA, 2000; SLACK *et al.* , 1996; MONKS, 1987 ; HEISER & RENDER, 1993; GAITHER & FRAZIER, 2001; DAVIS *et al.*, 2001) . A elaboração dos Planos de produção é feita utilizando-se técnicas de seqüenciamento, alocação de carga e balanceamento de linha, MRP (*Material Requirement Planning*) e demais técnicas que a literatura apresenta, que caracterizam as atividades de Programação e Controle da Produção (PCP).

Contudo, alguns autores tratam o problema de planejamento agregado dentro do contexto de planejamento da capacidade, abordando o problema através do planejamento e

controle da capacidade produtiva (SLACK *et al.*, 1996). Isto é decorrente do contexto do sistema de produção em análise, pois dependendo das características deste sistema, os benefícios decorrentes do planejamento agregado podem não ser tão significativos.

Quando observa-se uma situação onde as restrições de capacidade agregada e a demanda agregada prevista se comportam como no gráfico da Figura 2.2, observa-se a necessidade de emparelhamento da produção com a demanda e a suavização dos níveis de produção ao longo do ciclo de sazonalidade. Observando as conseqüências de aumento da capacidade, verifica-se a influência dos custos fixos de operação sobre o custo unitário do produto acabado.

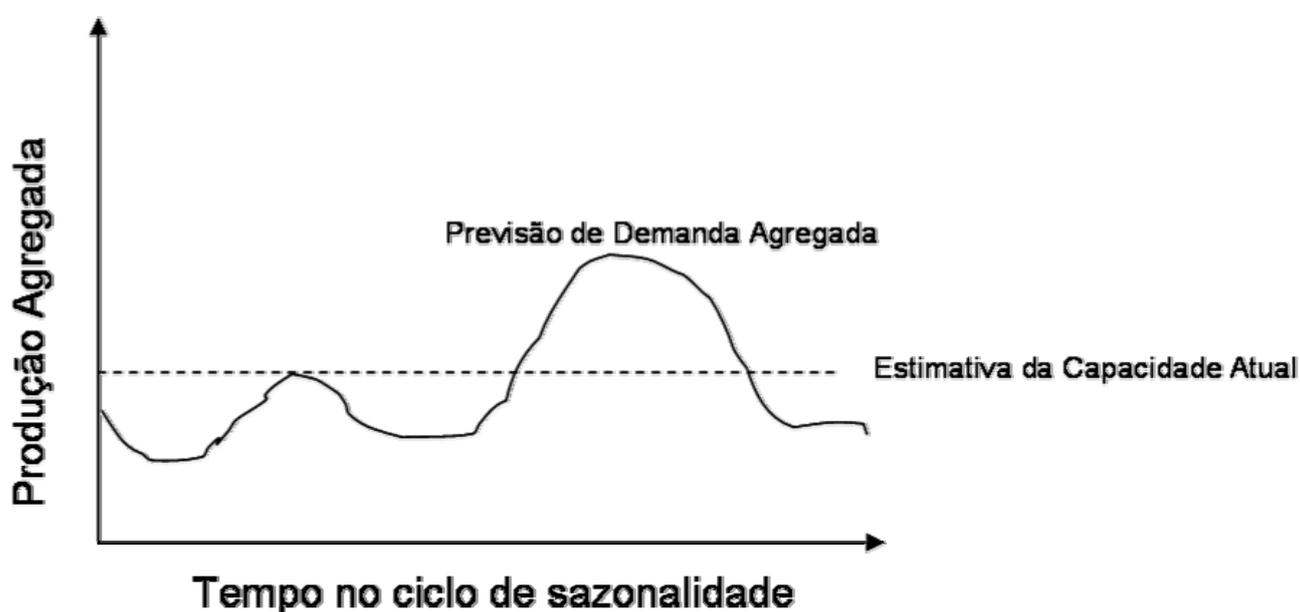


Figura 2.2 – Gráfico da demanda agregada prevista sob a restrição de capacidade agregada, Adaptado de Slack *et al.* (1996)

Nos casos onde os custos fixos exercem grande influência sobre o custo unitário do produto acabado, observa-se a necessidade de que o planejamento da capacidade considere as conseqüências do planejamento agregado, determinando se deve ser utilizada uma capacidade acima de todos os picos de demanda, ou se é possível obter menores custos unitários de produto acabado utilizando o planejamento agregado como uma ferramenta para atender a demanda sob o menor custo total.

Empresas do setor de serviços, principalmente aquelas de serviços essenciais (tipo energia, água, telefone...) não dispõem das alternativas de balanceamento da produção através

do planejamento agregado, sendo obrigadas a definir sua capacidade em função dos picos de demanda. Contudo, mesmo assim, essas empresas utilizam outras abordagens de planejamento agregado para evitar aumento do custo unitário de produto acabado em decorrência de custos fixos elevados gerados pelos altos níveis de ociosidade. Estas empresas utilizam o planejamento agregado sob a ótica de influenciar a demanda, buscando deslocá-la para períodos de maior ociosidade. Para isto, utilizam taxas promocionais, diferenciação nas tarifas, praticando tarifas mais elevadas durante os horários de pico de demanda. Na prática, todas as empresas dispõem da alternativa de influenciar a demanda, e utilizam também conceitos de Microeconomia para decidir sobre suas políticas de preço.

Considerando apenas a atividade de Planejamento Agregado, esta apresenta três fases que são constituídas pela Previsão da Demanda, a escolha do conjunto possível de alternativas a serem utilizadas para influenciar a demanda ou os níveis de produção e a última fase, que se constitui como objeto principal deste trabalho, que é a determinação de quais alternativas serão utilizadas a cada período para influenciar a demanda ou os níveis de produção.

A Previsão da Demanda é um procedimento para estimar a demanda futura, geralmente feita para um período de 6 a 12 meses através de métodos conhecidos como qualitativos (tais como opinião de especialistas, pesquisas junto a consumidores, método Delphi, entre outros abordados pela literatura) e quantitativos (métodos causais, tais como regressões, e séries temporais, ambos conjuntos de métodos bastante abordados na literatura) (MOREIRA, 2000; SLACK *et al.*, 1996; MONKS, 1987; HEISER & RENDER, 1993; GAITHER & FRAZIER, 2001; DAVIS *et al.*, 2001).

A escolha do conjunto possível de alternativas a serem utilizadas para influenciar a demanda ou os níveis de produção é orientada pelas restrições estabelecidas pela gerência e o conjunto de alternativas possível para o negócio da empresa. Estas alternativas se dividem em dois grupos: aquelas que têm por objetivo influenciar a demanda e as alternativas que influenciam a produção. Dentro do contexto abordado neste trabalho, faz-se necessário detalhar as alternativas que influenciam a produção, tais como:

- **Contratação e Demissão de empregados:** caso a empresa não esteja operando em sua capacidade máxima, é possível incrementar a produção para atender a um aumento previsto na demanda. Numa situação de demandas insuficientes, pode-se utilizar a demissão de alguns empregados para reduzir a ociosidade.

- **Horas Extras ou Redução da jornada de trabalho:** caso se deseje elevar os níveis de produção é comum o uso de horas extras, mesmo que com custos unitários superiores aos custos unitários do regime de produção regular.
- **Estocagem:** os estoques permitem suavizar o ritmo de produção, permitindo a uma utilização mais regular da mão-de-obra.
- **Subcontratação:** consiste em solicitar que outra empresa faça o produto ou parte dele.
- **Deslocamento da demanda:** é a prática de utilizar políticas de custos diferenciados e propaganda para estimular a demanda em períodos de capacidade ociosa.

A cada uma destas alternativas pode ser relacionada direta e / ou indiretamente um custo, como:

- **Custo de Contratação de empregados:** neste custo são considerados todos os custos associados com os processos de recrutamento, seleção e treinamento de pessoal que dependem da função a ser desempenhada.
- **Custo de Demissão de empregados:** neste custo são considerados os pagamentos previstos na legislação trabalhista corrente ou nos acordos sindicais. Além do custo mencionado, podem-se considerar também como custos as perdas que ocorrem indiretamente, através das dificuldades para contratações futuras e dos abalos na moral e motivação dos demais funcionários frente à demissão dos companheiros.
- **Custo de Horas Extras:** corresponde ao valor pago nas horas do regime de produção regular acrescido de um percentual que varia de acordo com a legislação trabalhista corrente ou acordos sindicais.
- **Custos de Estocagem:** são os chamados custos de manutenção, que podem ser divididos em duas categorias, os custos associados ao capital empatado nos estoques e aos custos associados ao próprio ato de conservar fisicamente os produtos, tais como custos de instalações, pessoal de almoxarifado, eventual deterioração, taxas e seguros, sendo essa segunda categoria denominada pela literatura como custo de armazenagem.
- **Custo de Subcontratação:** é representado pelo que se paga a outro produtor para fabricar o produto em sua totalidade ou apenas alguma parte. Contudo

pode-se relacionar um outro custo, difícil de mensurar, representado pelos riscos aos quais a empresa se sujeita ao subcontratar, tais como estar treinando (ou oferecendo tecnologia) um concorrente potencial, a falta de controle sobre a qualidade e o processo de fabricação dos produtos subcontratados.

- **Custos para Deslocar a Demanda:** correspondem aos custos de propaganda para estimular o consumo dos produtos em períodos de baixa demanda e para divulgar as políticas de preço praticadas.

Considerando estes custos, os métodos de Planejamento Agregado buscam uma solução que minimize o custo total de produção para o horizonte de tempo sob o qual é feito o planejamento. Para isto, são analisados os custos envolvidos na composição de alternativas para alterar os níveis de produção em cada período t , onde estes custos são representados por CP_t (Custo de Produção no período t). Dessa maneira, o custo total de produção para os n períodos é:

$$CP = \sum_{t=1}^n CP_t \quad \text{Equação 2.1}$$

O Custo de Produção no período t deve englobar os custos que variam de acordo com o número de admissões / demissões de funcionários (A_t, D_t), o número de unidades armazenadas no estoque (E_t) e o número de unidades produzidas nos respectivos regimes de produção (R_t, H_t, S_t). Este custo pode ser expresso como na Equação 2.2:

$$CP_t = C_r r_t + C_h h_t + C_s s_t + C_D D_t + C_A A_t + C_E E_t \quad \text{Equação 2.2}$$

A solução do problema de Planejamento Agregado é determinar em cada período a combinação de alternativas de produção tal que, ao mesmo tempo em que atende à demanda, o custo total de produção CP , seja minimizado ao menor valor possível.

Os modelos de Planejamento Agregado têm sido desenvolvidos desde a década de 50 envolvendo modelos cada vez mais sofisticados. Estes modelos são classificados em duas dimensões: aqueles que assumem ou não que a variação linear dos custos e aqueles que levam ou não à solução ótima.

Dentre os modelos que assumem que a variação dos custos é linear, a literatura apresenta o Modelo de Tentativa e Erro e o Modelo de Programação Linear como os mais conhecidos. Eilon (1975), apresenta outros três modelos, contudo estes dois modelos citados aparecem na literatura como os mais conhecidos.

2.2.2.1 Modelo de Tentativa e Erro

O Modelo de Tentativa e Erro é uma heurística, ou seja, não fornece necessariamente uma solução ótima. Este modelo consiste em utilizar o bom senso para procurar uma composição das alternativas de produção que minimize o custo total de produção.

Utilizando uma composição original de alternativas de produção, são geradas outras composições para que sejam comparados os seus respectivos custos. Contudo não há garantia de que a melhor solução encontrada seja a solução ótima. Moreira (2000), considera uma limitação deste método a dificuldade encontrada quando existem muitas alternativas de produção a serem consideradas, além da limitação óbvia por não fornecer uma solução ótima. No entanto esta última limitação pode ser compensada pela facilidade e rapidez com a qual se pode apresentar uma solução para o problema.

2.2.2.2 Modelo de Programação Linear

Segundo Moreira (2000), a primeira referência ao uso de Programação Linear para o problema de Planejamento Agregado é o artigo de Bowman (1956), onde é feita uma aplicação com o Modelo de Transporte para encontrar uma solução ótima para o problema de Planejamento Agregado.

O modelo de Programação Linear permite emparelhar a produção e a demanda ao mínimo custo total de produção, permitindo considerar no problema diversos custos inerentes a cada alternativa de produção. Além de fornecer uma solução ótima para o problema, este modelo tem como vantagem a flexibilidade proporcionada por permitir que seja definido o objetivo a ser considerado, não necessariamente o custo total de produção, permitindo que o problema seja modelado de acordo com a realidade da empresa e as restrições específicas encontradas na aplicação que podem ser incorporadas ao modelo.

2.2.3 Programação e Controle da Produção

A programação e o controle da produção (PCP) é uma atividade que busca utilizar as ações definidas no planejamento agregado e implementar a *desagregação* do planejamento em produtos individuais, efetuando uma programação em termos dos itens que serão produzidos para um determinado período. Para isto é utilizado o Plano Mestre de Produção (PMP), um documento que representa a programação da produção quanto aos itens que serão produzidos em cada período em termos dos produtos individuais (MOREIRA, 2000; SLACK

et al., 1996; MONKS, 1987 ; HEISER & RENDER, 1993; GAITHER & FRAZIER, 2001; DAVIS *et al.*, 2001).

A atividade de programação e controle da produção têm por objetivo implementar o que foi definido no plano mestre de produção, viabilizando o cumprimento deste e controlando o sistema produtivo para que o PMP seja cumprido. Aliados aos objetivos de implementar e controlar a produção para que o PMP seja cumprido, o PCP deve buscar que as máquinas e os funcionários operem com os níveis desejados de produtividade, a redução dos estoques e dos custos operacionais do sistema, manter o nível de atendimento aos clientes permitindo que os produtos possuam a qualidade especificada.

De acordo com Moreira (2000), as principais decisões a serem tomadas pelo PCP são:

- Quanto produzir de cada produto?
- Quando e em que ordem devem ser produzidos os produtos?
- Que máquina (linha de produção ou célula de produção) deve ser utilizada para produzir o produto “A”?

A primeira decisão se refere principalmente à minimização de custos operacionais, tais como o custo de estoques e o custo de *setup* ou preparação de máquinas, pois à medida que se aumenta a quantidade a ser produzida numa rodada de produção, são reduzidos o número de rodadas, o que diminui o custo de *setup*. No entanto o aumento de itens produzidos gera aumento no número de itens em estoque, aumentando o os custos de estocagem. Para isto, busca-se determinar uma quantidade que minimize a soma destes dois custos. Esta quantidade é chamada de Lote Econômico de Fabricação (LEF).

A segunda decisão se refere ao seqüenciamento das ordens de produção, onde são utilizadas técnicas que buscam minimizar os atrasos e o tempo médio de término das ordens de produção. Contudo existem casos onde a percepção do cliente é muito forte sobre a forma como é feito o seqüenciamento, como por exemplo, o setor de serviços. Nestes casos são utilizados conceitos de fila (PEPS – Primeiro que Entra, Primeiro que Sai).

A terceira decisão depende da segunda por haver uma questão de interdependência associada entre essas duas. A terceira decisão se refere à alocação de carga. O resultado desta decisão busca proporcionar maior eficiência ao sistema produtivo, alocando as ordens de produção de acordo com a habilidade dos funcionários para executar as atividades daquela ordem de produção e a eficiência da máquina para processar aquela determinada ordem de produção.

2.3 Apoio Multicritério a Decisão

Há muito tempo, o homem vem tentando resolver problemas complexos de decisão utilizando abstrações, heurísticas e raciocínios dedutivos. Até a década de 50, utilizava-se basicamente a esperança matemática para tomada de decisões em condições onde a incerteza era considerada. A experiência adquirida na década de 50 com o uso de Pesquisa Operacional aplicada aos problemas logístico-militares, deu ênfase a um tipo de abordagem que observava apenas as necessidades imediatas como otimizar custos, despesas e lucros. Nessa época, foram desenvolvidos métodos estritamente matemáticos para se encontrar a solução ótima de um problema.

De acordo com Gomes *et al.* (2002), os métodos multicritério ou multiobjetivo voltados para problemas discretos de decisão começaram a surgir a partir da década de 70. Estes métodos utilizam uma abordagem diferenciada para essa classe de problemas, passando a atuar como apoio a decisão não só objetivando a representação multidimensional dos problemas, mas incorporando também diversas características bem definidas quanto a sua metodologia, como:

- A análise do processo de decisão ao qual a metodologia é aplicada, sempre buscando identificar informações / regiões críticas;
- Melhor compreensão do problema e de suas dimensões.
- A possibilidade de se terem diferentes formulações válidas para o problema;
- O uso de representações explícitas de uma estrutura de preferências, em vez de representações numéricas definidas artificialmente, pode muitas vezes ser mais apropriado a um problema de tomada de decisão.

2.3.1 Programação Linear Multiobjetivo

A programação linear multiobjetivo pode ser vista como uma extensão daquele modelo clássico de programação linear para um caso onde não se considera apenas uma função objetivo (CLÍMACO *et al.*, 2003).

Observando pelo o contexto de otimização multiobjetivo, observa-se que a programação linear multiobjetivo é um caso particular da otimização vetorial, em que são tratadas funções lineares a serem otimizadas. Cunha & Polak (1967) trataram o problema de otimização

multiobjetivo de forma generalizada, desenvolvendo condições necessárias para classificação de soluções dominadas. Diversos métodos de otimização multiobjetivo podem ser encontrados em Ehrgott & Gandibleux (2002).

Muitas vezes o analista acaba modelando problemas multiobjetivo através de uma única função objetivo e, dessa forma, transforma as demais funções objetivo a serem consideradas em restrições para o problema. Esse tipo de simplificação implica em erros no que diz respeito à mensuração das preferências do decisor quanto aos objetivos, pois a subjetividade inerente a esse processo é retirada através da fixação de valores máximos ou mínimos para uma restrição que busca representar uma função objetivo adicional. A abordagem multiobjetivo permite a intervenção do decisor durante o processo decisório e obtenção de mais informações sobre o problema.

2.3.1.1 Conceitos Básicos

Enquanto os procedimentos utilizados em programação linear monocritério têm por objetivo apenas encontrar uma solução ótima, na programação linear multiobjetivo, o objetivo principal é encontrar a melhor solução não dominada (ou conjunto das melhores ações não dominadas) de acordo com a satisfação do decisor em todos os objetivos considerados. Na avaliação das soluções encontradas em um problema de programação linear multiobjetivo, são utilizados os seguintes conceitos (CLÍMACO *et al.*, 2003):

- **Alternativa Dominada:** uma solução é dominada se, e somente se existe uma outra melhor do que esta em pelo menos um critério, sem ser pior em qualquer outro critério.
- **Alternativa Eficiente (Não-Dominada ou Ótima de Pareto):** uma solução é eficiente se, e somente se não for dominada por alguma outra solução admissível.
- **Solução Ideal:** a solução “ideal” geralmente é uma alternativa inviável, que é constituída pelos ótimos individuais das funções objetivo, ou seja, possui simultaneamente a máxima classificação possível em todos os critérios de avaliação.
- **Solução Nadir:** a solução “nadir” é uma alternativa que possui, simultaneamente, a pior classificação em todos os critérios de avaliação.

- **Trade-Off (Valor de Compensação entre dois atributos X e Y):** é a taxa pela qual o decisor aceita trocar uma unidade no atributo X por uma outra quantidade no atributo Y de forma que este decisor ainda se mantém satisfeito mesmo após a troca, ou seja, o decisor é indiferente entre a situação anterior (antes da troca) e a situação posterior (após a troca). *Trade-Off* também pode ser definido como a relação entre o que é preciso perder em X para ganhar em uma unidade em Y, sem sair da curva de indiferença.

2.3.1.2 Métodos de Programação Linear Multiobjetivo

De acordo com Clímaco *et al.* (2003) os métodos de programação linear multiobjetivo podem ser classificados de acordo com:

- O grau de intervenção do decisor;
- O tipo de modelagem de preferências do decisor;
- O número de decisores;
- A certeza / incerteza na determinação dos parâmetros do modelo;
- e de acordo com as entradas requeridas e os resultados obtidos ;

Considerando o grau de intervenção, os métodos podem ser classificados de acordo com a forma em que é feita a articulação das preferências do decisor. Nesse sentido, existem métodos que consideram a articulação a priori das preferências como:

- Método Lexicográfico;
- Método da Programação por Metas (*Goal Programming*);

E métodos onde a articulação das preferências do decisor é feita de forma progressiva, como:

- STEM;
- Zionts e Wallenius;
- TRIMAP;
- Interval Criterion Weights (ICW);
- Pareto Race;

Esta segunda classe de métodos é conhecida como a classe de métodos interativos, onde se permite ao decisor realizar uma pesquisa aberta, progressiva e seletiva das soluções eficientes que termina quando se obtém uma solução satisfatória para o decisor.

Buscando atender aos objetivos dessa dissertação, apenas alguns métodos de programação linear multiobjetivo serão descritos neste capítulo. Contudo os leitores mais interessados no assunto podem consultar Clímaco *et al.* (2003) que apresenta detalhadamente diversos métodos de programação linear multiobjetivo.

2.3.1.2.1 Método Lexicográfico

O Método Lexicográfico consiste inicialmente em um escalonamento das funções objetivo de acordo com as preferências do decisor. Após este escalonamento inicia-se a otimização seqüencial dos objetivos.

A cada passo em que se inicia uma nova otimização há uma restrição de igualdade relativa ao objetivo otimizado no passo anterior. Esta restrição é adicionada ao modelo para fazer parte das próximas otimizações. Há muitos casos em que não são incluídas restrições de igualdade, mas sim restrições para que os valores de um objetivo não ultrapassem uma determinada porcentagem dos ótimos obtidos. O problema decorrente da inclusão de uma restrição de igualdade é que se o ótimo for único (muito freqüente) o processo termina, levando à inclusão do segundo tipo de restrições.

2.3.1.2.2 Programação por Metas (Goal Programming)

A Programação por Metas foi desenvolvida durante a década de 50. Contudo apenas a partir da década de 70 é que passou a ser mais conhecida, sendo hoje um dos métodos mais divulgados de programação linear multiobjetivo.

O método da distância mínima à solução ideal difere da Programação por Metas, pois na abordagem de metas busca-se minimizar o desvio em relação as metas definidas pelo decisor (O_1, \dots, O_p).

Contudo Clímaco *et al.* (2003) alertam para as situações em que as metas definidas pelo decisor podem conduzir a uma solução dominada do problema em estudo. Desta forma, a aplicação do método leva o decisor a uma solução satisfatória. No entanto, esta pode não pertencer ao conjunto das soluções eficientes, daí ser necessário que o analista ajude o decisor para que este possa estabelecer “*metas suficientemente ambiciosas*” (CLÍMACO *et al.*, 2003).

Mais detalhes sobre as diversas versões de Programação por Metas podem ser encontrados em Zeleny (1982), Charnes & Cooper (1977), Steuer (1986) ou Ignizio (1985).

2.3.1.2.3 STEM (Step Method)

O STEM (*Step Method*) foi desenvolvido por Benayoun *et al.* (1971) *apud* Clímaco *et al.* (2003). Este método faz parte do conjunto de métodos iterativos de programação linear multiobjetivo, sendo este um método iterativo de redução progressiva da região admissível.

Os procedimentos deste método consistem em fazer com que a cada interação, o decisor especifique uma quantidade que está disposto a sacrificar numa determinada função objetivo, aquela em que se considera satisfeito com o resultado obtido. Dessa forma, busca-se melhorar o resultado daquelas outras funções cujos valores não lhe satisfazem.

A busca por soluções satisfatórias no STEM é feita através da minimização de uma distância ponderada de Tchebycheff à solução ideal. Esta solução ideal é uma alternativa fictícia representada por uma solução que assume em cada função objetivo o valor ótimo da respectiva função quando ela é otimizada. Tal alternativa dificilmente existiria, uma vez que essa combinação de valores torna-se inviável devido aos conflitos que existem quando múltiplos objetivos são considerados. Esta é uma característica encontrada em problemas multiobjetivo ou multicritério, sendo o apoio multicritério a decisão uma abordagem para apoiar o processo decisório buscando uma solução considerando objetivos quase sempre conflitantes.

A cada interação do método é resolvido um problema de otimização onde são incorporadas as preferências do decisor. Cada uma destas etapas de cálculo refletem as escolhas que o decisor fez previamente, onde as preferências do decisor podem ser percebidas através da redução da região admissível.

Ao final da interação, o decisor se depara com uma solução de compromisso obtida através da minimização de uma distância ponderada de Tchebycheff à solução ideal. A decisão por manter esta solução de compromisso ou descartá-la é tomada pelo decisor, e é esta decisão que determina se deve-se iniciar outra interação ou terminar o processo. Se por acaso o decisor estiver insatisfeito com a solução de compromisso obtida, ele deve especificar qual o objetivo no qual está mais satisfeito, e decidir pela relaxação deste objetivo e também na quantidade em que pretende relaxá-lo. Com isto, o decisor reduz a região admissível e

permite que se busque uma nova solução de compromisso que possua melhor desempenho nos demais objetivos. Caso o decisor esteja satisfeito com a solução de compromisso obtida, esta solução é recomendada como a solução do problema para aquele decisor e o processo termina.

De acordo com o procedimento descrito, a região admissível é reduzida progressivamente através dos limites nos valores das funções objetivo impostas pelo decisor (estes limites são calculados a partir das quantidades que o decisor opta por relaxar nas funções objetivo nas quais está satisfeito ou disposto a renunciar buscando melhorar o desempenho das demais funções objetivo).

Clímaco et al. (2003) descreve o algoritmo do STEM, conforme a Figura 2.3:

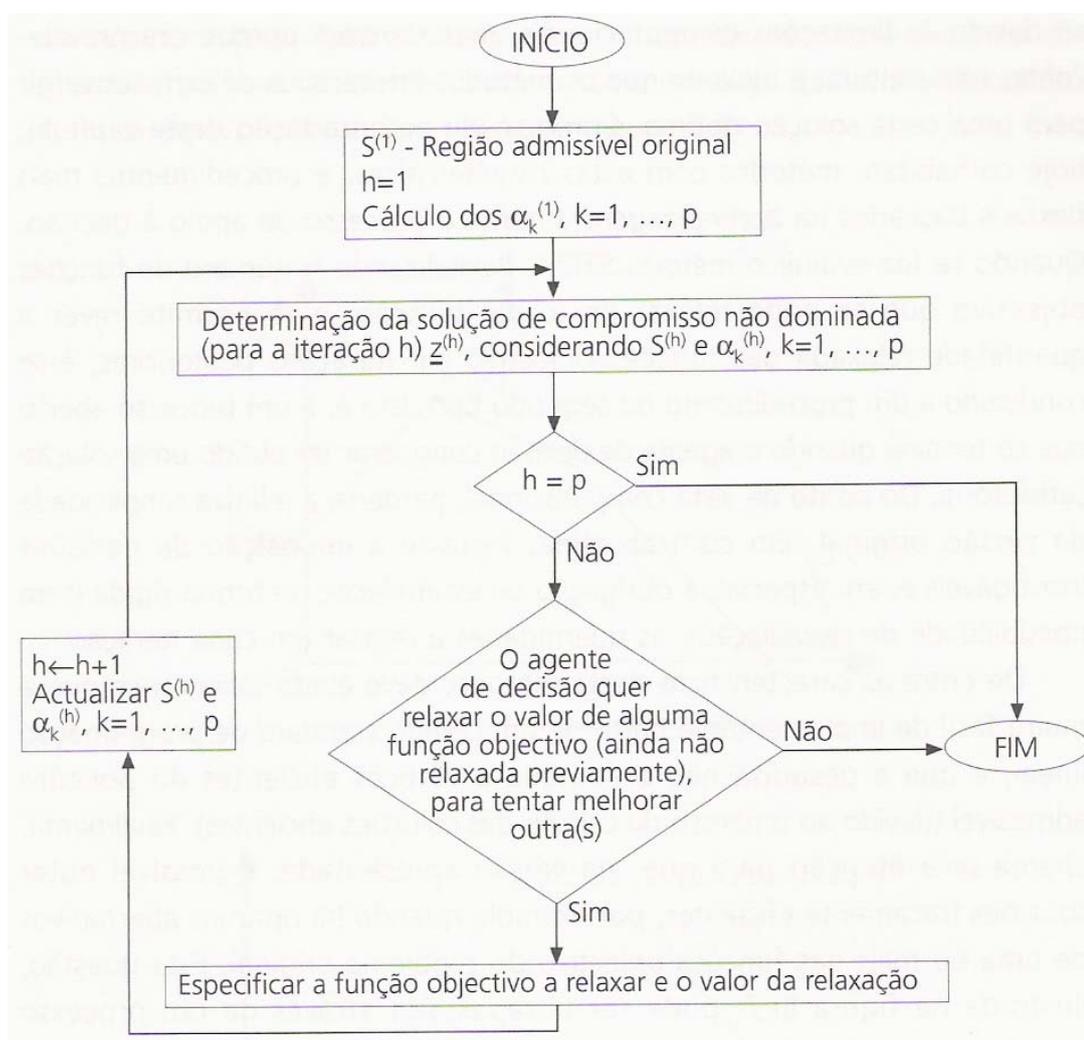


Figura 2.3 – Algoritmo do STEM, Fonte: Clímaco et al. (2003)

A primeira etapa do método consiste na otimização das funções objetivo uma a uma. A partir dos ótimos das funções objetivo, constrói-se uma tabela de ótimos individuais (também chamada de tabela de *pay-off* por Clímaco et al. (2003)). A tabela de ótimos individuais segue a seguinte forma:

Tabela 2.2 – Tabela de ótimos individuais

Z_1	.....	Z_k	.....	Z_p
$Z_1^1 = Z_1^*$	.....	Z_k^1	.....	Z_p^1
.....	.....	.....	.....	Z_p^2
Z_1^k$	.....	Z_k^k = Z_k^*$	.....	Z_p^3
.....
Z_1^p	.....	Z_k^p$	.....	Z_p^p = Z_p^*$
Fonte: Clímaco et al. (2003)				

Os ótimos individuais desta tabela estão na diagonal principal e os demais valores são os valores que estas funções assumem quando o elemento da diagonal principal é otimizado. Esta tabela serve para que sejam obtidos os valores da solução ideal (composta pelos elementos da diagonal principal) e a solução NADIR (aquela que apresenta o pior desempenho em todos os objetivos, sendo composta pelo pior valor de cada coluna).

Calcula-se então os pesos β_k a partir dos valores ótimos de cada função objetivo. Estes pesos servem para considerar as ordens de grandeza e a gama de valores das funções objetivo no cálculo de uma solução eficiente que minimize a distância ponderada de Tchebycheff à solução ideal. Os pesos β_k são calculados pela Equação 2.3, onde n_k é o valor da solução NADIR no objetivo k , z_k^* é o valor da solução ideal no objetivo k e c_{kj} é o j -ésimo coeficiente da função objetivo k :

$$\beta_k = \begin{cases} \frac{z_k^* - n_k}{z_k^*} \left[\sum_{j=1}^n c_{kj}^2 \right]^{-\frac{1}{2}} & \text{se } \max z_k \\ \frac{n_k - z_k^*}{n_k} \left[\sum_{j=1}^n c_{kj}^2 \right]^{-\frac{1}{2}} & \text{se } \min z_k \end{cases} \quad k = 1, \dots, p \quad \text{Equação 2.3}$$

Em seguida estes pesos β_k devem ser normalizados e procede-se a próxima etapa de cálculo onde é resolvido o problema de programação linear de minimização da distância ponderada de Tchebycheff à solução ideal. Se por acaso o decisor estiver insatisfeito com a solução de compromisso obtida, ele deve especificar qual o objetivo no qual está mais satisfeito, e decidir pela relaxação deste objetivo e, também, na quantidade em que pretende relaxá-lo. Com isto, o decisor reduz a região admissível e permite que se busque uma nova solução de compromisso que possua melhor desempenho nos demais objetivos. Caso o decisor esteja satisfeito com a solução de compromisso obtida, esta solução é recomendada como a solução do problema para aquele decisor e o processo termina.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Revisão da Literatura sobre Planejamento Agregado

Devido à importância do problema de Planejamento Agregado no contexto da Administração da Produção e Operações, desde o início da década de 50 são publicados trabalhos nesse tema.

Bowman (1956) foi a primeira referência encontrada utilizando Programação Linear para solucionar o problema de Planejamento Agregado. Neste trabalho o Modelo de Transporte foi aplicado para encontrar uma solução ótima para o problema de Planejamento Agregado. A partir de então, surgiram diversos trabalhos utilizando métodos que buscam encontrar a solução ótima.

A partir da década de 50, foram publicados diversos trabalhos, seja com novos métodos para solucionar o problema de Planejamento Agregado, seja com aplicações desses métodos em diversos setores além do setor industrial, tais como setor energético, serviços, em operações de logística, principalmente na marinha.

Com o desenvolvimento de novas abordagens para o problema de Planejamento Agregado, os problemas de *scheduling* da produção e de suavização da produção passaram a ser tratados durante o planejamento agregado do nível da Produção para cada período dentro do horizonte de demanda prevista. Eilon (1975) fez um retrospecto das principais abordagens utilizadas para o problema de Planejamento Agregado, discutindo as hipóteses assumidas e os objetivos inerentes a estas abordagens. Nesse trabalho Eilon (1975) discute a abordagem da Regra de Decisão Linear HMMS (Holt, Modigliani, Muth e Simon) para o nível de produção e de emprego; a regra DE para produção, que incorpora o tempo de atraso; o método dos coeficientes de gerenciais (The Management Coefficients Method); o uso de modelos de Programação Linear; e o método comutação da produção (Production Switching Method).

A Regra de Decisão Linear HMMS (HOLT *et al.*, 1955; HOLT *et al.*, 1956) resultou do projeto Planejamento e Controle de Operações Industriais apoiado pelo escritório de pesquisas da marinha americana (*Office of Naval Research*). Holt *et al.* (1955) formalizaram e quantificaram este problema de decisão através de uma aproximação quadrática para representar a função custo (contudo, esta aproximação nem sempre apresenta uma boa aderência, devendo ser analisada) e calcularam uma solução ótima generalizada para este

problema através de uma regra de decisão linear. Holt et al. (1955) traduziram precisa e matematicamente este problema de decisão permitindo o cálculo da solução do problema de planejamento agregado da produção de uma indústria de tintas. No entanto as demonstrações matemáticas envolvidas para tanto foram apresentadas apenas em Holt et al. (1956). Nesse segundo trabalho, Holt et al. (1956) demonstraram a otimalidade (mínimo custo esperado) das regras de decisão para a função custo quadrática envolvendo estoque, horas extras e custos dos empregados e apresentaram uma forma para o cálculo dos coeficientes numéricos das regras de decisão para qualquer conjunto de parâmetros de custo.

Sendo a função custo da Regra de Decisão Linear HMMS representada por uma aproximação quadrática, a avaliação das conseqüências dos erros provenientes desta aproximação deve ser feita para determinar o grau de sub – otimalidade que a solução encontrada pode apresentar. Holt *et al.* (1960) trataram as conseqüências dos erros dos coeficientes que representam número de empregados, produção e estoques. Contudo o fizeram para apenas um exemplo, que foi considerado por Van de Panne & Bosje (1962) como sendo uma situação particular e sem representatividade. Segundo Van de Panne & Bosje (1962), os resultados obtidos por Holt et al. (1960) para avaliar as conseqüências dos erros dos coeficientes foram obtidos simplesmente através da substituição de várias combinações de erros dos coeficientes de forma que os resultados só são válidos apenas para esses erros específicos. Van de Panne & Bosje (1962) apresentaram um método mais abrangente dentro de uma estrutura de maximização quadrática muito utilizada em diversas aplicações macroeconômicas por Theil (1961).

Na medida em que os modelos matemáticos para o problema de planejamento agregado se desenvolveram e ficaram cada vez mais sofisticados, apresentavam uma característica em comum para grandes aplicações, pequenos incrementos para melhorar o modelo e torná-lo mais próximo da realidade exigiam incrementos exponenciais em complexidade matemática. A partir de então, passam a surgir heurísticas para reduzir a complexidade matemática, passando a existir um *trade-off* entre os erros de modelagem (distância do modelo ao “mundo real”) e o grau de sub – otimalidade (distância da solução encontrada para a solução ótima). Taubert (1968) afirma que os trabalhos anteriores (que buscavam uma solução ótima) tiveram foco em abstrações da situação industrial para um ponto em que os modelos propostos provessessem respostas que pudessem ser provadas ótimas, restringindo o campo de aplicações por serem modelos muito simplificados. Como resultado desta busca por modelos que

provessem soluções ótimas, foram desenvolvidos modelos simples baseados em relações quadráticas e lineares para o custo. Segundo Taubert (1968) estes modelos simplificados de planejamento agregado da produção não se tornaram difundidos nas indústrias. Taubert (1968) justifica a falta de aceitação destes modelos partindo da compreensão de que a solução de um modelo não deve ser melhor do o próprio modelo. Buscando minimizar os erros de modelagem, Taubert (1968) utilizou a Busca por Regra de Decisão ou Search Decision Rule (SRD), um novo modelo para o planejamento agregado, convertendo a função objetivo utilizada por Holt et al. (1960), HMMS, em uma superfície de resposta com dimensão 20 que pode ser explorada através da SDR. Para Taubert (1968), a vantagem de utilizar a abordagem SDR é eliminar as restrições impostas pelos modelos de custos quadráticos e lineares, visando um modelo mais genérico e uma abordagem mais realista para o problema de planejamento agregado da produção.

Observando algumas deficiências das abordagens existentes utilizando as regras de decisão HMMS desenvolvidas até então, Bergstrom & Smith (1970) identificaram que estas se concentravam em duas linhas: métodos para melhorar as estimativas dos coeficientes de custo para o modelo, como Van de Panne & Bosje (1962), Schild (1959) e Kriebel (1967) , ou técnicas computacionais alternativas, Buffa & Taubert (1967) e Taubert (1968). Bergstrom & Smith (1970) propuseram uma extensão do modelo de regras de decisão HMMS utilizando uma formulação multi-item (MDR, *Multi-item Decision Rule*), visando fazer o planejamento dos itens isoladamente otimizando vendas, produção e níveis de estoque para cada item nos períodos de planejamento futuro. Bergstrom & Smith (1970) quebraram o paradigma do planejamento em função da restrição de atendimento a demanda, passando a fazer o planejamento de vendas e de produção em função da receita obtida em cada item. Para isso, removeram a restrição de especificação da demanda e estimaram curvas de receita para cada item nos períodos do planejamento. Dessa forma, o modelo MDR busca uma solução que maximize os lucros da empresa durante o horizonte de planejamento. O modelo de Bergstrom & Smith (1970) utiliza as curvas de receita estimada para planejar e calcular as quantidades ótimas a serem vendidas e ao mesmo tempo, calcula a solução para o problema de planejamento agregado utilizando não uma previsão de demanda, mas sim as quantidades ótimas a serem vendidas buscando a maximização dos lucros da empresa no período. Nesse sentido, a regra de decisão multi-item (MDR) incorpora as condições do mercado às abordagens que utilizam os custos relativos à produção. Numa situação onde a demanda por

todos os itens é superior à capacidade de produção da empresa, são visíveis as vantagens do modelo proposto por Bergstrom & Smith (1970), pois o MDR permite escolher qual combinação de itens deve ser produzida.

No contexto de suavização da produção surgiram abordagens alternativas ao planejamento agregado da produção. Winters (1962) propôs abordagem para planejamento agregado utilizando aspectos da tomada de decisão sobre estoques ou inventário, que consiste em tipos de problemas de decisão: quanto comprar (ou quanto fabricar) e quando comprar (ou quando fabricar). No entanto os tratamentos para estes dois tipos de problema se concentram apenas no inventário de produtos isolados, sem considerar os efeitos destas decisões para o sistema agregado ao qual se refere. Winters (1962) propôs uma abordagem baseada na comparação dos custos de diferentes alternativas de produção desenvolvendo “gatilhos” e em decisões de dimensionamento de lotes consistentes com o planejamento agregado. Winters (1962) apresenta também uma comparação gráfica entre os custos obtidos através das abordagens de otimização e heurística.

A maior parte destas publicações abordavam o contexto industrial. Contudo a atividade de planejamento agregado também é realizada em outros setores como a agricultura e o setor de serviços. Mudahar (1972) utilizou a concepção do planejamento agregado para planejar a produção agrícola, planejando todas as fases desde a preparação do solo para o plantio até a colheita. O modelo de Mudahar (1972) utilizava programação recursiva, atualizando os parâmetros do modelo a cada período para definir o número de trabalhadores, o número de horas extras a ser utilizado, área de plantio e os investimentos a serem feitos ao longo do período de planejamento.

Slack et al. (1996) sugere que o planejamento agregado seja feito de forma integrada com o planejamento da capacidade, buscando uma solução intermediária para a capacidade que reduza o custo fixo quando este possui grande impacto sobre o preço do produto acabado. Os modelos que surgiram de planejamento agregado, já discutidos neste capítulo, não permitem integrar o planejamento agregado com o planejamento da capacidade por não integrar todos os objetivos de cada respectiva atividade de planejamento. No planejamento da capacidade são avaliadas questões financeiras inicialmente para garantir a viabilidade e o retorno financeiro do investimento em capacidade. Já no planejamento agregado, busca-se minimizar os custos operacionais para atender a demanda maximizando os lucros. Ludgren & Schneider (1971) propuseram um modelo de planejamento agregado que permite avaliar

alterações na capacidade através dos custos marginais de cada ação para o aumento da capacidade, ou seja, permite encontrar soluções e estudar o impacto destas se fossem implantadas através do planejamento da capacidade.

3.2 O Estado da Arte

Pan & Kleiner (1995) apresentam uma revisão da literatura sobre as técnicas de planejamento desenvolvidas até então. De acordo com Pan & Kleiner (1995), dentre as técnicas disponíveis, as mais utilizadas pelas empresas são:

- **Técnicas Informais:** são abordagens para o problema de planejamento agregado que consistem no uso de simples planilhas e gráficos que permitem a comparação entre as necessidades da demanda projetada visualmente com a capacidade de produção. Estas técnicas permitem desenvolver planos alternativos e compor cenários para alcançar as metas através de um intervalo intermediário. A desvantagem destas técnicas é que não resultam numa solução ótima para o planejamento agregado;
- **Técnicas Matemáticas:** diversas técnicas matemáticas foram desenvolvidas; algumas dessas técnicas podem ser encontradas em Silver (1972);
- **Programação Linear e extensões:** são aqueles modelos que utilizam programação linear considerando apenas a demanda agregada prevista, desconsiderando a incerteza associada a esta previsão (desvantagem do determinismo). Existe também a dificuldade para obter os custos corretos da função custo, levando às vezes a fazer estimativas para os custos mais relevantes. Além das simplificações citadas, são feitas outras para utilizar o modelo linear.
- **Regras de Decisão Linear:** dentre as simplificações feitas nestes modelos, a principal é a da aproximação quadrática dos custos, apresentando também desvantagens por não permitir a inclusão de restrições para poder aproximar mais o modelo da realidade.
- **Heurísticas e Técnicas de Simulação:** estas abordagens facilitam o desenvolvimento de procedimentos para solução de problemas muito complicados (difíceis de solucionar de forma analítica), fornecendo uma solução

satisfatória. A principal vantagem destes modelos é que eles são mais flexíveis devido à relativa simplicidade matemática, permitindo construir modelos mais próximos da realidade, porém não tão próximos da solução ótima.

- **Abordagem dos Coeficientes Gerenciais:** apresenta um certo “*appeal*” para aqueles que possuem “tino administrativo”, pois este modelo busca utilizar os comportamentos gerenciais do passado para estimar coeficientes em regras de decisão plausíveis. Este modelo é fácil de implementar devido à simplicidade matemática, contudo, a hipótese de que o passado é um bom descritor do futuro pode fazer com que os gerentes demorem a se adaptar às mudanças do ambiente competitivo.
- **Procedimentos de Busca por Simulação:** são métodos utilizados pelos que possuem uma filosofia na qual os resultados obtidos de forma matemática só são válidos se o modelo realmente for uma representação muito próxima da realidade. Assim, através de procedimentos de tentativa e erro as variáveis são varridas até que não haja mais redução no custo total. Estes procedimentos podem incluir SDR (*Search Decision Rule*), planejamento paramétrico da produção e abordagens de técnicas de simulação.

Os trabalhos publicados recentemente sobre o problema de planejamento agregado utilizam conceitos de conjuntos nebulosos (WANG & FANG, 2001; WANG & LIANG, 2005), programação estocástica (KIRA *et al.*, 1997), *tabu search* multiobjetivo (BAYKASOGLU, 2001), algoritmos genéticos e algoritmos genéticos multiobjetivo (LI & MAN, 1998; STOCKTON *et al.*, 2004a; STOCKTON *et al.*, 2004b) , conseqüências contábeis das perdas no planejamento agregado (PIPER & VACHON, 2001),

Apesar de alguns autores utilizarem um enfoque multicritério ou multiobjetivo para o problema de planejamento agregado, não houve trabalhos que buscassem integrar os objetivos ou metas definidos na estratégia de produção aos objetivos e estratégias (aspectos da força de trabalho e os aspectos de custos de estoque, produção, subcontratação e de variação da força de trabalho e outros custos indiretos) do planejamento agregado. Goodman (1974) utilizou programação por metas como uma alternativa para contornar as limitações do modelo HMMS proposto por Holt *et al.* (1960) e do modelo de programação linear proposto por Hanssmann & Hess (1960), utilizando como metas os custos relevantes de produção, inventário e força de

trabalho. Welam (1976) criticou o modelo proposto por Goodman (1974), por tratar modelos não lineares, o que contraria os princípios advogados por Charnes & Cooper, que consideram que a programação por metas deve seguir essencialmente uma estrutura específica de programação linear como uma ferramenta para estudar problemas de decisão com múltiplos critérios, utilizando um conjunto de metas ou sub metas definidos pelo decisor, ao invés de uma única função objetivo a ser otimizada. Pois, fora de uma abordagem de programação linear, deve-se definir uma métrica e utilizá-la na modelagem do problema. A principal crítica de Welam (1976) é a de que Goodman (1974) utilizou um exemplo muito singular para comparar seu modelo com as demais abordagens, e que o modelo de Goodman (1974) é equivalente ao modelo HMMS, no entanto suas equações foram escritas de forma diferente para utilizar a abordagem de programação por metas.

Welam (1978) utilizou um tipo de modelo HMMS interativo que permitia *trade-offs* entre os custos tangíveis e os custos intangíveis que são difíceis de mensurar e, muitas vezes, não podem ser medidos de forma monetária.

4 MODELO PROPOSTO DE PLANEJAMENTO AGREGADO MULTIOBJETIVO

A cada estratégia de atendimento da demanda será associado um custo, portanto o modelo aqui proposto busca encontrar uma estratégia de atendimento da demanda (obtida através do Planejamento Agregado) que esteja alinhada com as estratégias de produção definidas, respeitando a prioridade e as relações estabelecidas entre os objetivos de desempenho.

Dessa maneira o gerente pode fazer o planejamento dos recursos a serem utilizados para atender a demanda priorizando os objetivos de desempenho que melhor refletem os fatores competitivos do negócio, que representam as necessidades dos consumidores.

De acordo com Slack *et. al.* (1996), a função produção pode desempenhar três importantes papéis para prover vantagem competitiva à empresa. O primeiro seria como *apoio* à estratégia empresarial, onde a função produção deve desenvolver objetivos e políticas apropriadas aos seus recursos para que estes forneçam as condições necessárias para permitir que a organização atinja seus objetivos estratégicos. O segundo seria onde a função produção atua como *implementadora* da estratégia empresarial, de tal forma que a função produção é que a coloca em prática transformando decisões estratégicas em realidade operacional. A estratégia empresarial é apenas uma declaração de intenção, sendo a administração da produção responsável por fazê-la acontecer. A implicação deste papel para a função produção é muito significativa, pois uma função produção inepta pode tornar a estratégia mais brilhante e original em algo totalmente ineficaz. No terceiro papel, a função produção atua como *impulsionadora* da estratégia empresarial, fornecendo os meios para proporcionar vantagem competitiva de longo prazo.

O modelo aqui proposto busca fazer com que um problema típico do contexto de planejamento da produção permita que a função produção possa atuar como implementadora da estratégia adotada.

4.1 Modelo de Planejamento Agregado Multiobjetivo (MPAM)

O Modelo de Planejamento Agregado Multiobjetivo permite escolher uma estratégia de atendimento da demanda que considere as prioridades entre todos os objetivos de desempenho, não somente o custo.

Contudo este modelo apresenta algumas restrições que são decorrentes das simplificações feitas na modelagem do problema. Dentre estas simplificações está sendo assumida a hipótese de linearidade, assim como na maioria dos modelos tradicionais.

Depois de definida a estratégia empresarial, os gerentes de produção definem uma estratégia de produção para que a função produção possa vir a desenvolver objetivos e políticas apropriadas aos seus recursos, fornecendo condições necessárias para permitir que a empresa atinja seus objetivos estratégicos. Portanto são definidos os objetivos de desempenho que atuarão como restrições (Objetivos Qualificadores de Pedido; a função produção deve sempre satisfazer a um determinado nível mínimo de desempenho) e os demais que devem ser maximizados ou minimizados através de uma função objetivo (Objetivos Ganhadores de Pedido).

O objetivo de desempenho Custo aparece tradicionalmente nos modelos de Planejamento Agregado, através da minimização do custo total de produção. No contexto de Planejamento Agregado, onde se busca encontrar uma solução agregada para todos os períodos, a função do custo total de produção é a função mais adequada para representar o objetivo de desempenho Custo sem perda da generalidade, podendo-se acrescentar ao modelo diversas restrições que podem servir para modelar características particulares do sistema de produção analisado, como por exemplo, restrições para adequar os custos em cada período aos valores disponíveis no fluxo de caixa da empresa. A Equação 4.1 representa a função do custo total de produção:

$$\min C = \sum_{t=1}^n (C_r r_t + C_h h_t + C_s s_t + C_D D_t + C_A A_t + C_E E_t) \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde n é o número de períodos contidos no horizonte de planejamento, C_r é o custo unitário em regime de produção regular e r_t é o número de unidades produzidas neste regime durante o período t , C_h é o custo unitário em regime de produção em horas extra e h_t é o número de unidades produzidas neste regime de produção durante o período t , C_s é o custo unitário de subcontratação e s_t é o número de unidades subcontratadas durante o período t , C_D é o custo para demitir um funcionário e D_t é o número de funcionários demitidos durante o período t , C_A é o custo para admitir um funcionário e A_t é o número de funcionários admitidos durante o período t , C_E é o custo para estocar uma unidade de produto durante um período e E_t é o número unidades no estoque durante o período t .

Os demais objetivos de desempenho, diferentemente do Custo, são do tipo quanto mais melhor, portanto devem ter suas funções objetivo maximizadas. Para estes objetivos, buscou-se definir uma forma padrão para a função objetivo, que pudesse representá-los sem perda da generalidade. Contudo os parâmetros desta função terão um significado diferente para cada objetivo de desempenho.

Dessa forma, os objetivos de desempenho, Qualidade, Credibilidade, Rapidez e Flexibilidade, podem ser representados no modelo através de uma função que represente o nível médio de desempenho naquele objetivo. A Equação 4.2 representa esta função:

$$\max \quad Obj = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{\alpha_r r_t + \alpha_h h_t + \alpha_s s_t}{r_t + h_t + s_t} \right) \quad \text{Equação 4.2}$$

Esta equação apresenta uma expressão genérica para representar o nível médio de desempenho em um determinado objetivo, onde α_r , α_h , α_s são parâmetros que possuem um significado específico para cada objetivo de desempenho, representando de forma genérica um indicador de desempenho para cada regime de produção em determinado objetivo de desempenho. O resultado desta função objetivo é o valor médio obtido para um determinado objetivo de desempenho ao longo de todo o horizonte de planejamento (n períodos).

Para o objetivo de desempenho Qualidade, os parâmetros α_r , α_h , α_s podem ser interpretados como sendo o complementar do percentual de itens defeituosos, representando o percentual de itens conformes que foram produzidos em cada regime de produção. O comportamento esperado para os parâmetros no objetivo Qualidade em situações normais seria algo similar ao do gráfico da Figura 4.1, onde a produção em regime regular possui um percentual de itens conformes maior que os demais regimes de produção. Isto se justifica por ser uma situação em que é mais fácil controlar a qualidade. Devido à fadiga, ausência dos gerentes e outros fatores que podem comprometer a qualidade na produção, estima-se que o percentual de itens conformes durante a produção em regime de hora extra seja menor ou igual ao percentual de itens conformes durante o regime de produção regular. Por uma questão de bom senso, não se pode achar que a produção subcontratada possua um percentual de itens conformes maior que o da produção interna da empresa, pois as incertezas a cerca da produção subcontratada são maiores que a produção interna, que é controlada de acordo com os padrões de qualidade da empresa. Contudo existem situações em que a produção subcontratada possui percentual de itens conformes maior que o da produção interna da empresa:

- Quando os itens são cem por cento inspecionados, ou seja, só são aceitos itens conformes;
- Quando a função produção é muito deficiente, produzindo um alto percentual de itens não conformes, não sendo suficientemente competente para superar o padrão de qualidade externo;

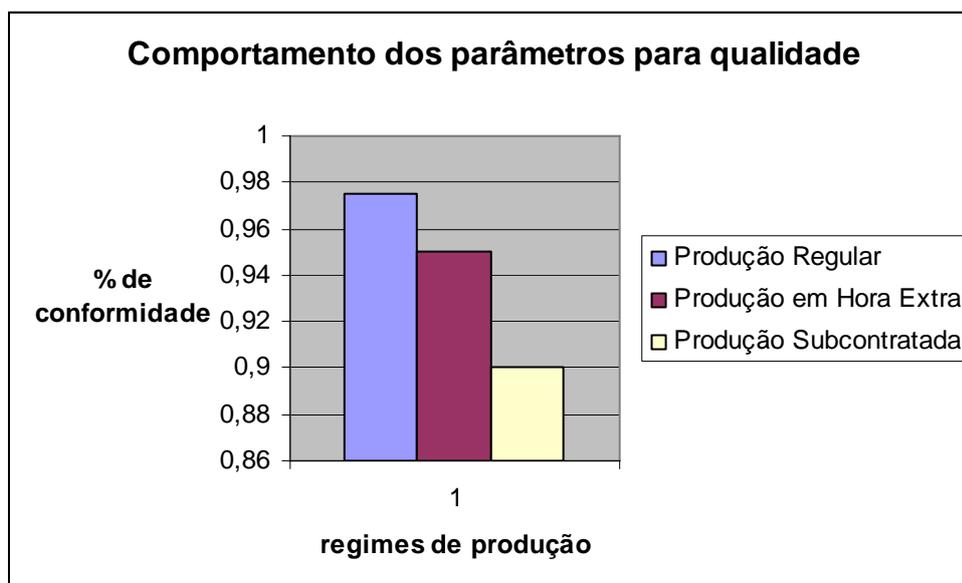


Figura 4.1 – Comportamento dos parâmetros para a Qualidade

Analisando o objetivo de desempenho Credibilidade, observa-se a incerteza associada ao atendimento dos prazos de entrega do produto, portanto, neste objetivo de desempenho, os parâmetros α_r , α_h , α_s podem ser interpretados como a probabilidade de que os pedidos (produtos) em cada respectivo regime de produção sejam entregues no prazo. Novamente pode-se imaginar qual seria o comportamento dos parâmetros, sendo que neste caso para o objetivo Credibilidade. As incertezas que afetam o desempenho da Qualidade também podem afetar o desempenho de Credibilidade, além de outros fatores que fazem com que os parâmetros se comportem de forma similar à descrita para a Qualidade. Além disso o nível de controle da produção exerce grande influência para que os prazos possam ser cumpridos, o que também contribui para que a probabilidade de entrega no prazo seja maior para o regime de produção regular que para o regime de produção em hora extra. Conseqüentemente, espera-se que a probabilidade de entrega no prazo seja maior para a produção interna da empresa que para a produção subcontratada.

Considerando os objetivos de desempenho Rapidez e Flexibilidade, ao parâmetros α_r , α_h , α_s podem ser notas de 0% a 100% atribuídas a cada regime de produção, no sentido de prover uma avaliação global para a função produção nestes dois objetivos de desempenho.

Para o objetivo Rapidez é mais fácil interpretar o que seriam estes parâmetros do que para o objetivo Flexibilidade. O objetivo Rapidez representa a velocidade com que a empresa está apta a processar os pedidos (ordens de produção), ou seja, quanto menor for o tempo de resposta da empresa, melhor será o seu desempenho em Rapidez. Os parâmetros da Rapidez devem incorporar dois fatores:

- A velocidade com a qual o material é processado;
- O tempo de espera na fila de pedidos para iniciar o processamento do pedido;

O primeiro fator diz respeito à eficiência do sistema homem-máquina utilizado na manufatura do produto acabado. O segundo fator se refere à forma como é feito o seqüenciamento das ordens de produção e o tempo decorrido desde o pedido e o início do processamento. A quantificação do parâmetro de Rapidez para a produção subcontratada deve ser feita tomando como referencial a produção interna da empresa, pela razão entre o tempo de resposta caso o pedido fosse processado internamente e o tempo de resposta para que o pedido seja processado externamente.

O desempenho em flexibilidade se refere à facilidade com que a empresa pode se adaptar a novos produtos, novos pedidos e à variedade de pedidos e produtos que recebe. À medida que a empresa terceiriza parte de sua produção, ela aumenta sua flexibilidade, pois passa a contar com máquinas, equipamentos e mão-de-obra diferentes daqueles que possui na própria fábrica. Os pontos fortes e fracos da verticalização e da horizontalização são bastante discutidos na literatura, cabendo à gerência decidir a forma como será feita a terceirização (subcontratação) da produção.

O comportamento esperado dos parâmetros para o objetivo Flexibilidade é que o parâmetro da produção subcontratada seja maior que o parâmetro da produção interna da empresa. Quanto aos parâmetros da produção interna da empresa, é fácil visualizar que durante o regime de produção regular existem mais recursos disponíveis (funcionários e máquinas ligadas, por exemplo) que durante o regime de horas extras (funcionários de folga, máquinas desligadas e máquinas paradas para manutenção preventiva). Este simples fato justifica pensar que o parâmetro do regime de produção regular deve ser maior que o parâmetro do regime de produção em hora extra.

No entanto a expressão da Equação 4.2 não é uma expressão linear, o que viola a hipótese de linearidade considerada para o modelo, levando-nos a uma simplificação que garanta a linearidade. Ao invés de utilizar a expressão sugerida acima, deve ser utilizada uma expressão parecida, que maximize a expressão sugerida anteriormente.

$$\max \quad Obj = \sum_{t=1}^n (\alpha_r r_t + \alpha_h h_t + \alpha_s s_t) \quad \text{Equação 4.3}$$

Esta expressão dá uma medida da performance global referente ao acumulado em todo o período de Planejamento Agregado. Através da Equação 4.3 é possível utilizar a programação linear, permitindo a escolha de um dentre os diversos métodos de programação linear multiobjetivo, otimizando as medidas de performance global dos objetivos de desempenho considerados, conservando o significado particular (para cada objetivo de desempenho) definido para os parâmetros.

Porém pode-se utilizar uma abordagem que estabeleça uma distribuição mais homogênea da performance obtida para o objetivo, evitando soluções em que alguns períodos possuam uma performance muito inferior compensada pela performance elevada dos demais. Para isso deve-se inserir n (número de períodos do horizonte de planejamento) restrições adicionais ao problema, objetivando encontrar o período onde se obteve a menor performance no objetivo e assim maximizar a menor performance, fazendo com que não sejam obtidas performances muito díspares ao longo dos períodos considerados no horizonte de planejamento. A Equação 4.4 ilustra esta outra abordagem:

$$\begin{aligned} \max \quad & Obj = m \\ & s/a \\ & m \leq \alpha_r r_t + \alpha_h h_t + \alpha_s s_t \quad , t = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad \text{Equação 4.4}$$

Os parâmetros índice α_r , α_h , α_s são determinados através do conhecimento da empresa a respeito da performance relativa entre os diferentes regimes de produção no objetivo de desempenho analisado.

Como restrições básicas (mais comuns) para o problema de Planejamento Agregado podem ser sugeridas:

- nível mínimo para a performance do objetivo k (ou seja, o menor valor admitido para a função objetivo) admitida pela empresa ($Obj_k \geq NObj_k$, onde Obj_k é o valor obtido na função objetivo para a performance do objetivo desempenho k).

Esta restrição é mais recomendada para objetivos ganhadores de pedido, pois restringe apenas o valor global para todo o período planejado;

- nível mínimo admitido por período para o objetivo k ($Obj_{kt} \geq NObj_{kt}$, onde Obj_{kt} é o nível de desempenho do objetivo k no período t). Esta restrição é mais recomendada para os objetivos qualificadores de pedido, uma vez que estes devem atender aos requisitos de qualificação em todos os períodos;
- limitações de capacidade para estocar produtos acabados ($E_t < N$);
- capacidade de produção em regime regular por período ($r_t \leq u_r f_t$, sendo $f_t = f_{t-1} + A_t - D_t$);
- capacidade de produção em regime de horas extras por período ($h_t \leq u_h f_t$, sendo $f_t = f_{t-1} + A_t - D_t$);
- capacidade de produção em regime de subcontratação por período ($s_t \leq C_s$);
- demanda a ser satisfeita em cada um dos n períodos ($d_t \leq r_t + h_t + s_t + E_{t-1}$);
- o número de funcionários no período t ($f_t = f_{t-1} + A_t - D_t$);
- a quantidade de produtos estocados no período t ($E_t = E_{t-1} + r_t + h_t + s_t - d_t$)

O modelo apresentado não é um modelo definitivo, de tal forma, que podem ser incorporadas outras restrições ou condições fixadas pela gerência. No entanto o modelo aqui apresentado busca representar uma classe de modelos encontrada na literatura, utilizando as condições (restrições e relações) do contexto do Planejamento Agregado. Um exemplo de tal situação seria a inclusão de diversas opções para o regime de subcontratação que se diferenciavam através das respectivas performances nos objetivos de desempenho considerados para o problema. Outra situação bastante realista são as questões financeiras da empresa, tais como capital de giro e o fluxo de caixa da empresa. As restrições de fluxo de caixa podem ser incluídas no problema através de restrições que representem a disponibilidade financeira nos períodos de interesse. Após estas considerações, o modelo proposto está representado na Equação 4.5.

$$\begin{aligned}
\min \quad & C = \sum_{t=1}^n (C_r r_t + C_h h_t + C_s s_t + C_D D_t + C_A A_t + C_E E_t) \\
\max \quad & Obj_k = \sum_{t=1}^n (\alpha_r r_t + \alpha_h h_t + \alpha_s s_t) \\
s/a \quad & \\
& Obj_k \geq NObj_k \\
& Obj_{kt} \geq NObj_{kt} \\
& E_t \leq N \\
& r_t \leq u_r (f_{t-1} + A_t - D_t) \\
& h_t \leq u_h (f_{t-1} + A_t - D_t) \\
& s_t \leq C_s \\
& r_t + h_t + s_t + E_{t-1} \geq d_t \\
& E_t = E_{t-1} + r_t + h_t + s_t - d_t \\
& f_t = f_{t-1} + A_t - D_t
\end{aligned}$$

Equação 4.5

4.2 Modelo Generalizado de Planejamento Agregado Multiobjetivo (MGPAM)

Para que o modelo proposto de Planejamento Agregado possa ser aplicado com maior liberdade, está sendo proposta a estrutura de um Modelo Generalizado de Planejamento Agregado Multiobjetivo (MGPAM):

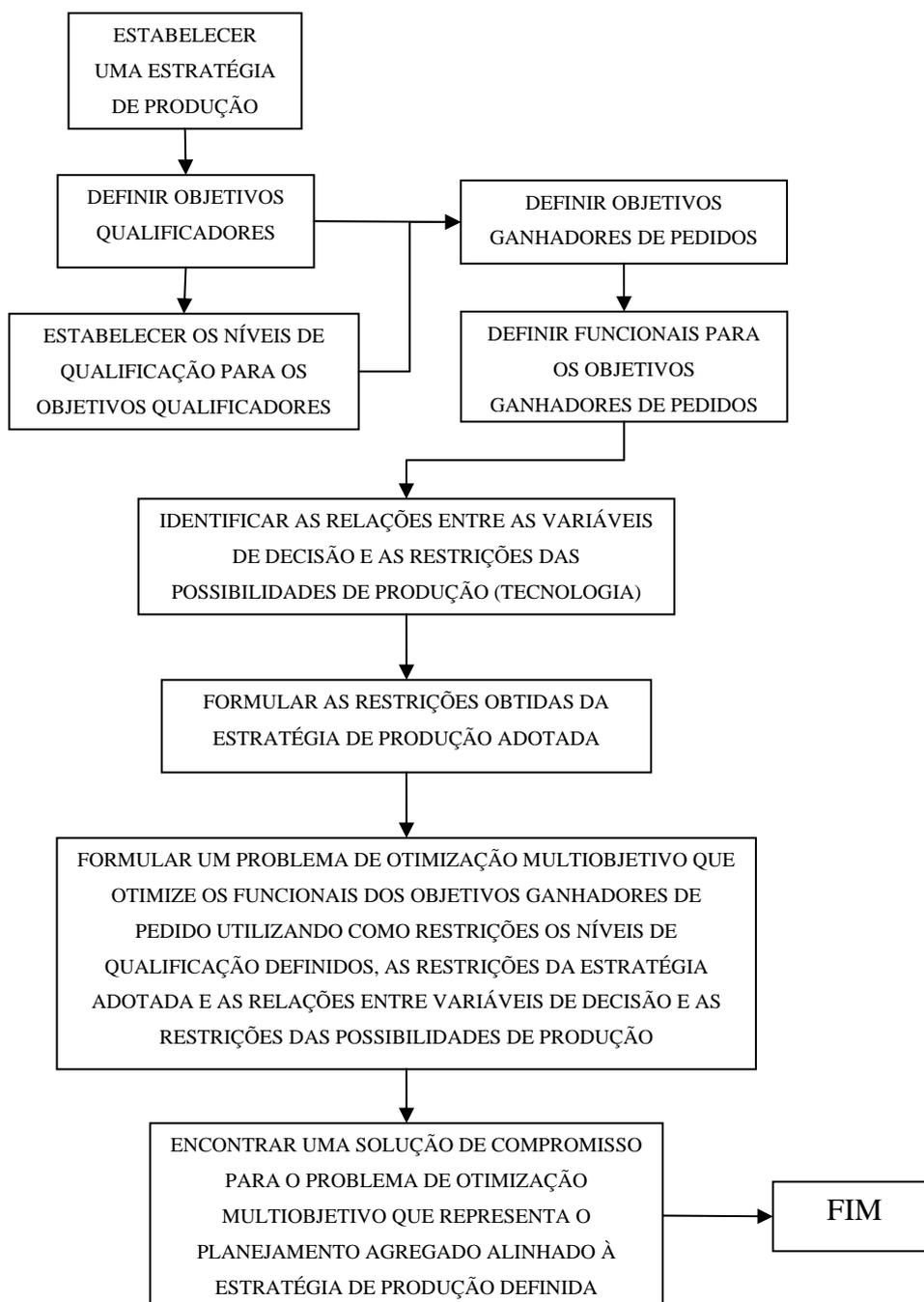


Figura 4.2: Modelo Generalizado de Planejamento Agregado Multiobjetivo (MGPAM)

A Figura 4.2 apresenta uma seqüência de passos generalizados para o modelo proposto de planejamento agregado multiobjetivo. Estruturando o modelo dessa maneira, pode-se aplicar o modelo multiobjetivo com liberdade para escolher o método de otimização multiobjetivo, seja este linear ou não.

O primeiro passo do modelo consiste na estruturação da estratégia de produção a ser implementada. Posteriormente são definidas as metas a serem atingidas e os indicadores que quantificarão as metas. Na segunda etapa os objetivos de desempenho são classificados entre ganhadores e qualificadores de pedidos. Para aqueles classificados como ganhadores de pedido são definidos funcionais objetivos que devem ser otimizados (ou pelo menos se deve buscar otimizá-los).

Para aqueles objetivos classificados como qualificadores de pedido seus indicadores serão utilizados como restrições do modelo, para que estes estejam sempre acima do nível de desempenho mínimo aceitável.

Em seguida são identificadas as relações entre as variáveis de decisão e as restrições tecnológicas, que são incluídas ao problema junto com as restrições da estratégia de produção adotada. A partir de então é formulado um problema de otimização multiobjetivo que busca maximizar os indicadores de desempenho dos objetivos ganhadores de pedido respeitando as restrições estratégicas e tecnológicas da produção. De acordo com as particularidades do problema e as preferências do decisor, um método ou uma abordagem de otimização multiobjetivo deve ser escolhida para que seja encontrada uma solução de compromisso para o problema. Uma vez que esta solução é encontrada e é considerada satisfatória pelo decisor, é feita a recomendação por esta solução de compromisso.

A liberdade para escolher o método de otimização multiobjetivo permite incorporar características particulares do sistema de produção, inclusive de promover maior aproximação entre o modelo de planejamento agregado da produção e a realidade da produção permitindo definir outros funcionais e restrições sem a necessidade da simplificação de linearidade para o modelo.

4.2.1 Desafios

Como desafios para futuros trabalhos, existe a possibilidade de utilizar a mesma concepção do modelo proposto, expandindo a abrangência do modelo buscando atender outras etapas de planejamento além da etapa do planejamento agregado. Para isto, uma abordagem dinâmica pode ser incorporada ao modelo, permitindo considerar os seis fluxos definidos por Forrester (1961): fluxo de material, fluxo de decisões, fluxo financeiro, fluxo de pessoal (força de trabalho), fluxo de recursos (máquinas, ferramentas, espaço) e o fluxo de

informações. A Figura 4.3 dá um exemplo de como estes seis fluxos se comportam nas subdivisões de um sistema produtivo.

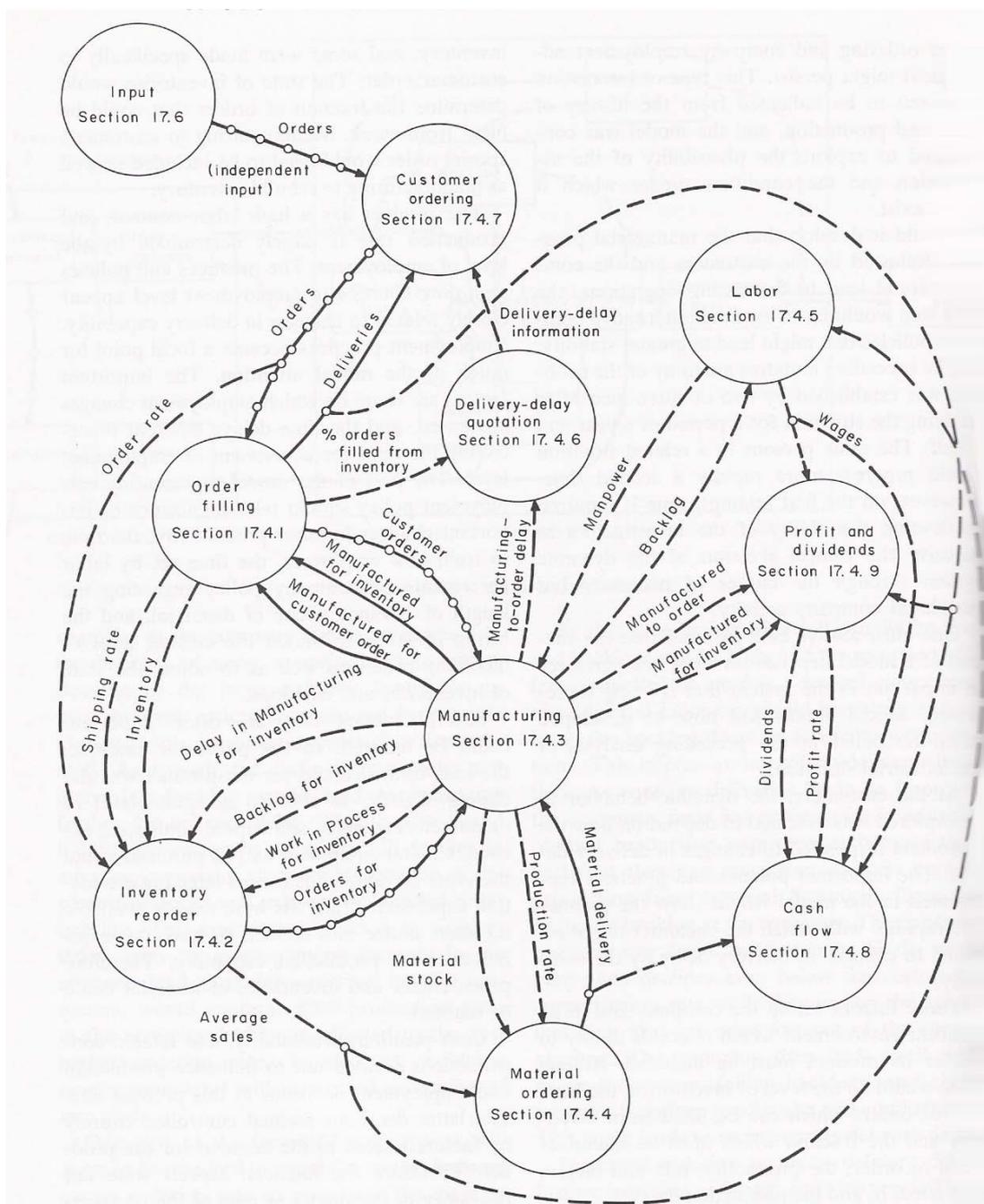


Figura 4.3 – Ilustração dos seis fluxos definidos por Forrester (1967) numa indústria, Fonte: Forrester (1967)

Este tipo de abordagem permite considerar um contexto mais amplo, de tal forma que a atividade de planejamento poderia contemplar desde o ambiente da produção até a entrega dos produtos aos consumidores finais permitindo, também, planejar as atividades de varejo e de

atacado. Tal abordagem se faz bastante útil quando um bom desempenho logístico pode representar vantagem competitiva. A Figura 4.4 ilustra a dinâmica do ambiente da produção até entrega do produto ao consumidor final.

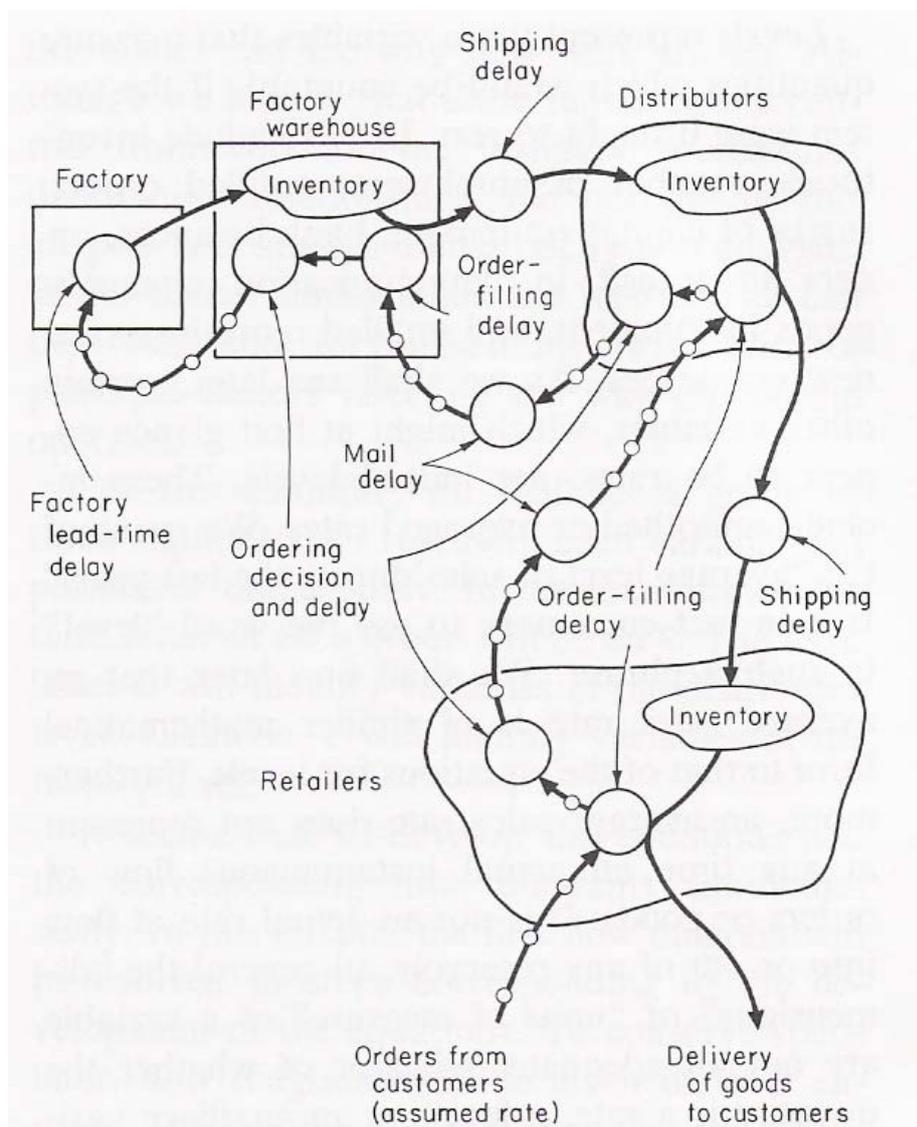


Figura 4.4 – Dinâmica do ambiente da produção até entrega do produto ao consumidor final, Fonte: Forrester (1967)

O enfoque dado nesta dissertação para o planejamento agregado foi o de deslocar a produção para que esta possa atender a demanda. Desta forma, são utilizados recursos que permitam influenciar a produção para poder atender a demanda no momento em que esta se manifesta. Contudo existe um outro enfoque para o planejamento agregado, muito utilizado no setor de serviços, onde não é possível estocar o produto acabado. Este segundo enfoque

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Contextualização do Problema

Nesta seção será feita uma aplicação para ilustrar como o Modelo de Planejamento Agregado Multiobjetivo proposto neste trabalho pode ser utilizado. Para isto, foi elaborado um estudo de caso fictício utilizando dados e características encontradas na literatura sobre o qual será aplicado o modelo ora apresentado.

Considere-se que a empresa fictícia que pertence a um segmento de mercado onde os Objetivos de Desempenho Qualidade, Flexibilidade e Rapidez comportam-se como Critérios Qualificadores de Pedido. Observando essa característica do mercado, é necessário que a empresa fictícia esteja sempre acima dos respectivos níveis de Qualidade, Flexibilidade e Rapidez definidos para este mercado.

Satisfeitas as necessidades de Qualidade, Flexibilidade e Rapidez, os clientes escolhem uma empresa para fazer seus pedidos de acordo com o desempenho dela nos Objetivos de Desempenho que são Critérios Ganhadores de Pedido. Para aumentar sua carteira de pedidos e aumentar suas vendas, esta empresa precisa maximizar seu desempenho nos Critérios Ganhadores de Pedido, que são Custo e Credibilidade.

Dentre as opções de atendimento da demanda, estão disponíveis a produção no regime regular, no regime de horas extra, no regime de subcontratação, o estoque de produtos acabados e a variação do quadro de funcionários dentro do limite máximo de capacidade da estrutura. A tabela abaixo apresenta o Custo unitário de produção para os regimes de produção disponíveis e o custo das demais alternativas para emparelhar a produção e a demanda:

Tabela 5.1 – Custo unitário de produção para os regimes de produção disponíveis

Alternativa	Produção Regular (r)	Produção Hora Extra (h)	Produção Subcontratada (s)	Admissões (A)	Demissões (D)	Estoque (E)
Custo	R\$ 250,00	R\$ 350,00	R\$ 425,00	R\$ 12.500,00	R\$ 36.500,00	R\$ 30,00

Fonte: O autor

A quantificação da Credibilidade é dada pela probabilidade de que o pedido seja entregue no prazo. Será considerada uma probabilidade atribuída através do conhecimento da

empresa sobre a frequência em que ocorrem atrasos nas entregas de cada regime de produção. A tabela abaixo apresenta as probabilidades de que os pedidos sejam entregues dentro do prazo estabelecido para os respectivos regimes de produção, representando os parâmetros de Credibilidade que serão utilizados na função objetivo do modelo neste problema.

Tabela 5.2 – Parâmetros para a função objetivo da Credibilidade

Regime de Produção	Produção Regular (r)	Produção Hora Extra (h)	Produção Subcontratada (s)
$\alpha_r, \alpha_h, \alpha_s$	0,95	0,80	0,70

Fonte: O autor.

Pode-se observar que a maior probabilidade de entrega no prazo pertence ao regime produção regular, pois este regime é aquele em que a empresa possui o maior controle das operações. Além dos produtos serem produzidos dentro da empresa, estes utilizam os recursos no momento em que todos os setores da empresa estão em funcionamento, portanto uma possível parada devido à falha de alguma máquina pode facilmente ser solucionada através das equipes de manutenção. O setor de compras e os demais departamentos envolvidos estariam presentes para solucionar o problema no momento em que ocorreu (caso haja necessidade de comprar alguma peça ou autorizar algum serviço externo, por exemplo).

Durante o regime de produção em horas extras, os trabalhadores estão mais sujeitos aos efeitos da fadiga, o que aumenta a variabilidade do processo. A consequência disto é a redução da produtividade e o aumento da fração de itens defeituosos, aumentando a probabilidade de que ocorram atrasos nas ordens de produção. A ausência dos gerentes durante o período de horas extras também é uma razão para que a empresa tenha menor controle sobre as atividades que ocorrem nesse período, facilitando o não cumprimento dos prazos.

Através do regime de produção subcontratada, o cumprimento dos prazos está sujeito a uma série de variáveis externas sob as quais a empresa não tem controle algum, aumentando as chances de que os pedidos sejam entregues após o prazo determinado pelo cliente. Contudo é necessário utilizar este regime, uma vez que não é possível satisfazer a demanda apenas com as demais alternativas de produção. Geralmente a produção subcontratada é uma alternativa dominada pela produção regular e pela produção em horas extras, no entanto é a saída para os casos onde não é possível atender a demanda sem que sejam feitas expansões da capacidade da produção interna. Portanto é interessante subcontratar apenas o necessário para que a

demanda seja satisfeita. A programação linear multiobjetivo servirá para determinar a quantidade a ser subcontratada considerando todos os fatores relevantes para que a função produção tenha o melhor desempenho e possa proporcionar vantagem competitiva para a empresa.

Existem outros casos onde as empresas se deparam com a superação de paradigmas como conglomeração, integração vertical, integração horizontal e integração interna (BEAUMONT & SOHAL, 2004), passando a concentrar seus recursos e esforços em suas competências essenciais ou atividades-fim. Para isso estendem à empresas subcontratadas, através de terceirização, a produção de componentes ou a realização de atividades acessórias e periféricas em relação ao seu objetivo principal. Esta não é a direção do caso abordado neste problema, mas poderia ser se o regime de subcontratação não fosse um “mal necessário” como é o que ocorre em nosso problema. No problema aqui abordado, a produção obtida através da subcontratação apresenta um Custo superior às demais alternativas de produção e menor Credibilidade nos prazos de entrega. No entanto existem situações em que os produtos subcontratados podem apresentar Custos superiores. Porém estes custos podem ser compensados através de um desempenho superior em Qualidade, por um ganho de Flexibilidade na linha de produção e também, pelo aumento da Velocidade, advindo da redução do tempo perdido com *setups* durante o processo. O resultado conjunto destes fatores justifica o enfoque multicritério nas decisões sobre terceirização, buscando maximizar os benefícios potenciais e minimizar os riscos da terceirização.

A partir destas considerações, pode-se formular dois objetivos que deverão ser otimizados, o Custo e a Credibilidade. A partir do modelo proposto, deve-se escolher qual abordagem utilizar para tratar o Problema de Programação Linear Multiobjetivo a ser resolvido. Conforme visto na Base Conceitual, a literatura dispõe de diversos métodos para tratar problemas de Programação Linear Multiobjetivo, cabendo ao analista escolher aquele que seja mais adequado ao problema. Sobre a escolha do método, Almeida & Costa (2003) destacam que os principais fatores a serem considerados na escolha do método são:

- O problema analisado;
- O contexto considerado;
- A estrutura de preferências do decisor;
- A problemática.

O problema de planejamento agregado da forma como foi abordado neste trabalho, pode ser tratado através de diversos métodos de programação linear multiobjetivo. Dentre os fatores mencionados acima o mais preponderante neste caso foi o contexto do problema. Devido ao número grande de variáveis e restrições do problema, optou-se por um método de fácil implementação e que permite encontrar uma solução levando em consideração as preferências de um possível decisor (através das possíveis interações deste ao longo do processo decisório). A consideração destes fatores levou a escolha do método STEM, contudo existem diversos outros métodos de programação linear multiobjetivo que poderiam ter sido utilizados nesta aplicação.

Considerando as principais restrições para o problema de Planejamento Agregado, vistas no capítulo anterior para este problema de Planejamento Agregado consideraremos as restrições da seguinte forma:

- Nível mínimo de Qualidade admitido pela empresa ($Q_t > NQA$);
- Nível mínimo admitido para Flexibilidade ($F_t > NFA$);
- Nível mínimo admitido para Rapidez ($R_t > NRA$);

Estas três classes de restrições não serão incorporadas nesta aplicação pois será assumida a hipótese de que todos os regimes de produção, qualquer que seja a combinação, não possuem desempenho inferior aos níveis mínimos de desempenho exigidos pelos clientes, portanto não há necessidade de considerar as restrições de qualificadores de pedidos nesta aplicação. Contudo, existem diversas situações onde é necessário considerar as restrições.

- Custo máximo admitido por período (restrições do fluxo de caixa da empresa) ($CP_t < Receita_t$);

Não serão feitas restrições quanto ao fluxo de caixa da empresa, contudo estas restrições são muito importantes, pois sem o capital de giro o sistema de produção pára. Existem diversas situações que podem ser expressas em termos de restrições quanto ao fluxo de caixa da empresa, como por exemplo, em casos em que a empresa adquire empréstimos com amortizações semestrais ou trimestrais.

- Limitações para estoque ($E_t < N$):
 - A capacidade máxima para estocagem é de 1.500 unidades.
- Capacidade de produção em regime regular por período ($r_t \leq C_r$):
 - Cada funcionário pode produzir 90 unidades (u_r) em regime regular de produção por período.

- Capacidade de produção em regime de horas extras por período e pelo número de funcionários ($h_t \leq C_h$):
 - Cada funcionário pode produzir 30 unidades (u_h) em regime de horas extras de produção por período.
- Capacidade de produção em regime de subcontratação por período ($s_t \leq C_s$):
 - O limite para subcontratação é de 600 unidades por período.
- Demanda a ser satisfeita nos n períodos ($d_t \leq r_t + h_t + s_t + E_{t-1}$):
 - A tabela abaixo resume as 12 restrições para o atendimento da demanda prevista:

Tabela 5.3 – Demanda prevista para o horizonte de planejamento

Período (t)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda (d)	1200	1500	1250	1800	1350	2200	2100	2300	1580	1470	1350	1100

Fonte: O autor.

- O quadro inicial de funcionários é composto por 8 funcionários;
 - O número de funcionários em cada período é representado pela expressão: $f_t = f_{t-1} + A_t - D_t$, que deve ser incorporada ao problema através de substituições nas restrições que utilizem o número de funcionários do período;
- O número máximo permitido no quadro de funcionários devido à quantidade de equipamentos disponíveis para a produção ($f_t \leq Nf_t$);
 - O limite máximo do quadro de funcionários é de 10 pessoas;
- Limitações para demitir e contratar funcionários;

As restrições para a contratação de funcionários podem ficar implícitas nas restrições do quadro de pessoal, contudo poderiam também ser feitas restrições quanto ao número de funcionários demitidos, geralmente provenientes de algum acordo sindical. No entanto não é necessário que sejam feitas tais restrições no exemplo aqui abordado, pois mesmo que preenchido totalmente o quadro de funcionários, não seria um número suficiente para satisfazer a demanda, exigindo que fossem adquiridos novos equipamentos para que mais funcionários pudessem ser contratados.

5.2 Aplicação do Modelo

Baseando-se nas considerações feitas na contextualização do problema, pode-se formular o seguinte Problema de Programação Linear Multiobjetivo, para o qual:

$$\min F_1 : C_{Tot} = \sum_{i=1}^n (250r_i + 350h_i + 425s_i + 12500_i + 36500D_i + 30E_i)$$

$$\max F_2 : C_{Cred} = \sum_{i=1}^n 0,95r_i + 0,80h_i + 0,70s_i$$

s / a

$$E_t \leq 1500$$

$$r_t \leq 90(f_{t-1} + A_t - D_t)$$

$$h_t \leq 30(f_{t-1} + A_t - D_t)$$

$$s_t \leq 600$$

$$r_t + h_t + s_t + E_{t-1} \geq d_t$$

$$E_t = E_{t-1} + r_t + h_t + s_t - d_t$$

$$f_t - (f_{t-1} + A_t - D_t) \leq 10$$

$$E_0 = 0$$

$$f_0 = 8$$

onde $t=1,2,\dots,12$.

Equação 5.1

Quando Benayoun et al. (1971) propuseram o STEM, propuseram também um procedimento de cálculo para os pesos, visando que estes levem em conta as ordens de grandeza e a gama de valores das funções objetivo (CLÍMACO et al., 2003). No entanto estes pesos não incorporam as preferências do decisor, não representando nem a importância relativa dos objetivos nem trade-offs para o decisor. Estes pesos são utilizados no cálculo de uma solução eficiente que minimize uma distância ponderada de Tchebycheff à solução ideal.

Através do método STEM, pode-se investigar melhor o problema e aprender mais sobre as suas características. A abordagem de programação linear multiobjetivo interativa visa proporcionar aprendizado sobre o problema através de várias etapas nas quais consistem os algoritmos desses métodos.

O aprendizado sobre o problema possibilita explorar soluções eficientes que poderiam passar despercebidas pelo decisor. Dessa forma, as preferências do decisor são incorporadas ao processo decisório através das iterações do método, permitindo que o aprendizado obtido ao longo do processo decisório possa dar suporte à estrutura de preferências do decisor.

A escolha do método STEM se justifica por ser um método o interativo de simples implementação, o que viabiliza bastante sua aplicação, no qual se podem determinar os pesos

para o cálculo de uma solução eficiente que minimize a distância ponderada de Tchebycheff à solução ideal independentemente do decisor, deixando a subjetividade apenas para a etapa de exploração da fronteira de soluções eficientes ou não dominadas, onde o decisor busca uma solução para o problema fazendo *trade-off* entre os valores obtidos para cada objetivo. Por se tratar de uma aplicação numérica de um exemplo fictício, serão feitas apenas algumas considerações para demonstrar como poderia ser escolhida uma solução eficiente para este problema através deste ou de qualquer outro método de programação linear multiobjetivo.

Utilizando o método STEM, busca-se uma redução progressiva da região admissível através de interações com o decisor, Este informa o quanto está disposto a sacrificar na função objetivo cujo valor já satisfaz as suas necessidades, buscando melhorar aquelas funções objetivo cujos valores obtidos não foram considerados satisfatórios. A cada iteração o decisor faz uma escolha onde renuncia a uma determinada quantidade para um dos objetivos com o intuito de melhorar a performance dos demais considerados. Isto é feito com objetivo de melhorar o valor global da recomendação. Esta etapa de interação do decisor se assemelha a um processo de educação ou elicitación para obter a função de utilidade do decisor sobre as alternativas, sendo que não é obtida uma função analítica para a função de utilidade do decisor. O método STEM não apresenta necessariamente como recomendação o ótimo da função utilidade do decisor, contudo busca através de um processo bastante simplificado identificar um ponto de saciedade para este decisor, onde ele escolhe uma solução que apresente resultados satisfatórios nos objetivos considerados para o problema.

5.3 Resultados

Para conhecer melhor o problema, a primeira etapa do método consiste em otimizar cada uma das funções objetivo. Os ótimos de cada função objetivo compõem uma “meta” a qual se deseja atingir. Esta “meta” seria uma alternativa “ideal” que possui desempenho ótimo em todas as funções objetivo.

O ótimo encontrado para a função objetivo do Custo foi de um custo total anual de R\$ 6.158.500,00. Caso fosse escolhida esta solução, o nível de Credibilidade seria de 85,8%, ou seja, um valor esperado de 16.490 unidades entregues dentro do prazo.

Tabela 5.4 – Solução ótima para o objetivo Custo Total Anual

	Alternativas para Atender a Demanda	Regime de Produção Regular	Regime de Produção em Hora Extra	Regime de Subcontratação	Admissão de novos funcionários	Demissão de funcionários	Unidades em Estoque	Número de Funcionários	Demanda
Meses	0	-	-	-	-	-	0	8	-
	1	900	300	0	2	0	0	10	1200
	2	900	300	500	0	0	200	10	1500
	3	900	300	600	0	0	750	10	1250
	4	900	300	600	0	0	750	10	1800
	5	900	300	600	0	0	1200	10	1350
	6	900	300	600	0	0	800	10	2200
	7	900	300	600	0	0	500	10	2100
	8	900	300	600	0	0	0	10	2300
	9	900	300	380	0	0	0	10	1580
	10	900	300	270	0	0	0	10	1470
	11	900	300	150	0	0	0	10	1350
	12	900	200	0	0	0	0	10	1100
13	-	-	-	-	-	-	0	10	-

Fonte: O autor.

Otimizando a Credibilidade, o nível máximo encontrado foi de 91,4%, ou seja, um valor esperado de 17.550 unidades entregues dentro do prazo. Para alcançar este nível de desempenho em Credibilidade, é necessário um custo total anual de R\$ 6.913.600,00. Este aumento do índice de Credibilidade é alcançado devido ao aumento dos níveis de estoque, que proporcionam uma margem de segurança para a empresa.

Tabela 5.5 – Solução ótima para o objetivo Credibilidade

	Alternativas para Atender a Demanda	Regime de Produção Regular	Regime de Produção em Hora Extra	Regime de Subcontratação	Admissão de novos funcionários	Demissão de funcionários	Unidades em Estoque	Número de Funcionários	Demanda
Meses	0	-	-	-	-	-	0	8	-
	1	900	300	600	2	0	600	10	1200
	2	900	300	600	0	0	900	10	1500
	3	900	300	200	0	0	1050	10	1250
	4	900	300	600	0	0	1050	10	1800
	5	900	300	600	0	0	1500	10	1350
	6	900	300	600	0	0	1100	10	2200
	7	900	300	600	0	0	800	10	2100
	8	900	300	600	0	0	300	10	2300
	9	900	300	600	0	0	520	10	1580
	10	900	300	600	0	0	850	10	1470
	11	900	300	100	0	0	800	10	1350
	12	900	300	600	0	0	1500	10	1100
13	-	-	-	-	-	-	1500	-	-

Fonte: O autor.

Tabela 5.6 – Tabela de ótimos individuais

Custo	% de Credibilidade	Credibilidade
R\$ 6.158.500,00	85,89%	16490
R\$ 6.913.600,00	91,41%	17550
Fonte: o autor.		

A tabela de ótimos individuais é uma tabela $n \times n$, onde n é o número de funções objetivo a serem otimizadas. A Tabela 5.6 é a tabela de ótimos individuais para o problema, no entanto foi alterada para melhorar a compreensão do problema. A tabela exibida é uma tabela 2×3 , onde foi acrescentada uma coluna adicional para esclarecer melhor o critério Credibilidade. Na coluna 2 são apresentados os valores obtidos para o percentual de produtos entregues dentro do prazo acordado com o cliente. Este percentual também pode ser visto como sendo uma aproximação da probabilidade de que um pedido qualquer seja entregue em

conformidade com o prazo acertado com o cliente. Na coluna 3, está um detalhamento da performance obtida por cada alternativa no objetivo Credibilidade, ou seja, a coluna 3 é composta pela quantidade de produtos que se espera entregar no prazo.

A partir da tabela de ótimos individuais pode-se compor a alternativa “ideal” e a alternativa “nadir”. A alternativa “ideal” é uma alternativa fictícia que possui os melhores valores possíveis para cada objetivo. Esta alternativa é composta a partir dos valores da diagonal principal da tabela de ótimos individuais (tabela 2x2, neste caso seria uma tabela com a primeira e a segunda coluna da Tabela 5.6 ou com a primeira e a terceira coluna da Tabela 5.6, dependendo da forma com que se deseje avaliar a Credibilidade). A alternativa “nadir” é uma alternativa que possui o pior desempenho para qualquer um dos objetivos. Neste caso pode-se obter uma alternativa “nadir” utilizando os valores da diagonal secundária da tabela de ótimos individuais.

A solução deste problema multiobjetivo consiste na procura pela solução que mais se distancie da alternativa “nadir” na tentativa de alcançar a alternativa “ideal”. Como a solução “ideal” não é factível, deve-se buscar uma alternativa viável que satisfaça aos objetivos da gerência. O *trade-off* entre a Credibilidade e o Custo vai orientar a decisão da gerência na escolha por um plano agregado de produção. Avaliando o contexto estratégico, a gerência decide o quanto está disposta a pagar para garantir a entrega de seus produtos no prazo. Caso a empresa desejasse adotar uma estratégia para obter um nível de 100% de Credibilidade, seria necessário aumentar a capacidade de estoques ou a capacidade de produção (produção regular e horas extras), para que pudesse ter uma margem de segurança capaz de atender 100% da demanda prevista dentro do prazo. Deve-se também investigar os prováveis erros decorrentes da previsão da demanda, contudo, este estudo não é o tema principal deste trabalho, devendo ser considerado em futuros trabalhos. Outra possibilidade também seria melhorar o processo produtivo, reduzindo a probabilidade de falhas (quebra de máquinas, rejeição de lotes, e outros problemas que podem atrasar a entrega de um pedido) que comprometessem a entrega dos produtos no prazo. Alterando o processo produtivo, as probabilidades de entrega no prazo também seriam alteradas, conseqüentemente alterando os parâmetros do problema.

Nesta etapa, o problema de decisão consiste em encontrar uma alternativa intermediária que esteja mais balanceada entre os dois critérios definidos para o problema. A etapa seguinte da aplicação do método STEM consiste em encontrar uma solução viável que minimize a

distância ponderada de Tchebycheff a alternativa ideal. Os pesos utilizados foram obtidos através do procedimento de cálculo de pesos do método STEM, descrito anteriormente. No entanto a alternativa que minimiza a distância ponderada de Tchebycheff foi a que minimiza o Custo Total Anual, desconsiderando o objetivo Credibilidade. Isto se deve ao fato das variações ocorridas no Custo Total Anual serem muito superiores às ocorridas em Credibilidade.

Um decisor poderia avaliar o *trade-off* entre as perdas decorrentes do aumento dos custos e os ganhos estratégicos obtidos pelo aumento do número de produtos entregues no prazo. Buscando uma solução intermediária e avaliando as possibilidades de custo, arbitrou-se que um custo máximo de R\$ 6.550.000,00 seria considerado satisfatório desde que promovesse aumento do desempenho em Credibilidade que justificasse esse aumento de custo.

Passando a uma etapa do método onde há uma interação com o decisor, este pode estabelecer restrições aos limites que considera satisfatórios. Para isto, foi relaxada a função objetivo do Custo Total Anual para tentar melhorar os valores da função objetivo da Credibilidade que não foram considerados satisfatórios.

A solução obtida pelo relaxamento da função do Custo Total Anual foi que a um custo total de R\$ 6.550.000,00 foi possível obter um nível de Credibilidade de 89,1%, viabilizando um valor esperado de 17.106 itens entregues dentro do prazo.

A Figura 5.1 e a Figura 5.2 apresentam gráficos que comparam as performances da alternativa “ideal” com as performances da alternativa recomendada. Estes gráficos ilustram que a alternativa recomendada é intermediária, com performances balanceadas nos dois objetivos. A solução obtida para a recomendação está descrita na Tabela 5.7.

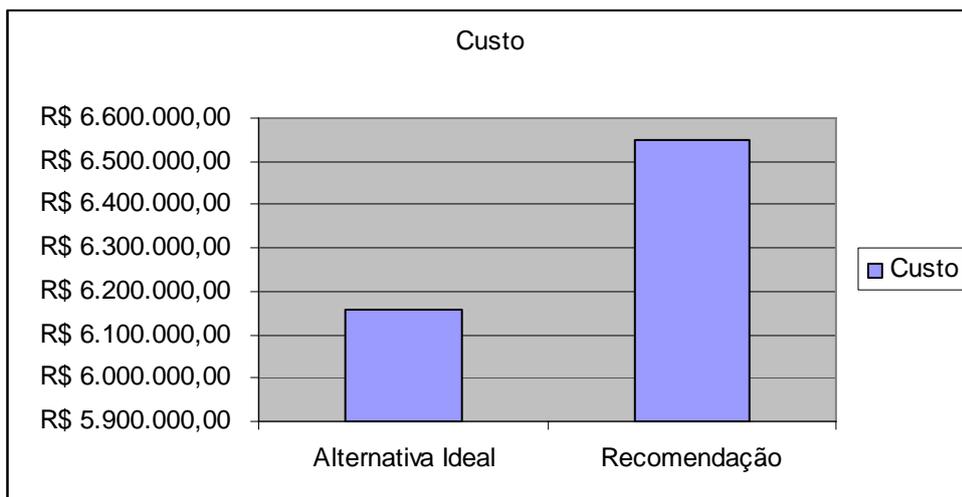


Figura 5.1 – Comparação entre o custo da alternativa “Ideal” e a recomendação

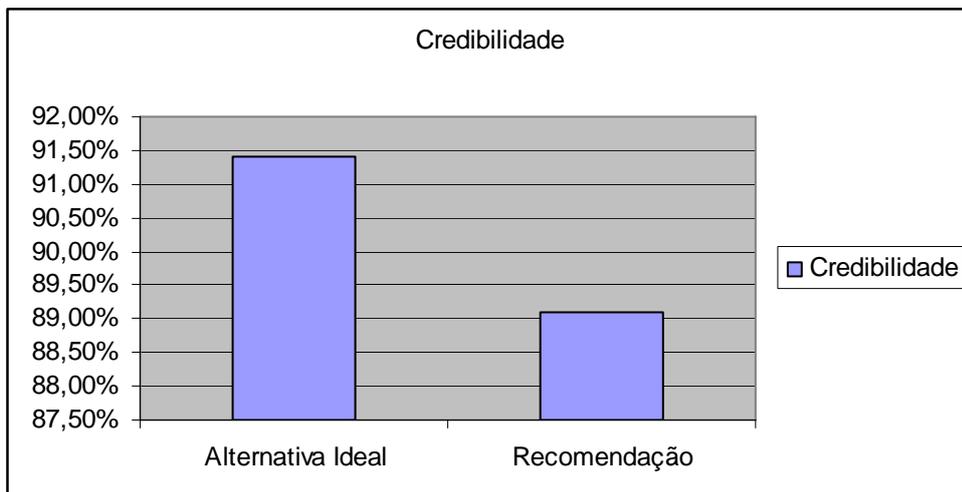


Figura 5.2 – Comparação entre a Credibilidade da alternativa “Ideal” e a recomendação

Tabela 5.7 – Solução final após a relaxação da função objetivo do Custo Total Anual

	Alternativas para Atender a Demanda	Regime de Produção Regular	Regime de Produção em Hora Extra	Regime de Subcontratação	Admissão de novos funcionários	Demissão de funcionários	Unidades em Estoque	Número de Funcionários	Demanda
Meses	0	-	-	-	-	-	0	8	-
	1	900	300	0	2	0	0	10	1200
	2	900	300	500	0	0	200	10	1500
	3	900	300	600	0	0	750	10	1250
	4	900	300	600	0	0	750	10	1800
	5	900	300	600	0	0	1200	10	1350
	6	900	300	600	0	0	800	10	2200
	7	900	300	600	0	0	500	10	2100
	8	900	300	600	0	0	0	10	2300
	9	900	300	380	0	0	0	10	1580
	10	900	300	270	0	0	0	10	1470
	11	900	300	316	0	0	166	10	1350
	12	900	300	600	0	0	866	10	1100
13	-	-	-	-	-	0	866	10	-

Fonte: O autor.

Esta solução foi considerada satisfatória para ilustrar a abordagem proposta neste trabalho para resolver o problema de planejamento agregado alinhado com a estratégia de produção adotada. Contudo um gerente (decisor) ao avaliar este problema também levaria em consideração os possíveis custos advindos de multas contratuais decorrentes de atrasos na entrega antes de fixar um valor considerado satisfatório para o Custo Total Anual, mesmo que estas multas apenas representem custos tangíveis associados aos atrasos.

De uma forma geral a avaliação conjunta de desempenho das alternativas de produção permitiu formular uma estratégia de atendimento da demanda que busca aumentar o desempenho global da empresa nos aspectos competitivos da produção. No entanto, deve-se observar os impactos decorrentes disso.

Para aumentar o desempenho global da empresa nos aspectos competitivos, observa-se como foi visto, que é necessário lançar mão de recursos mais custosos e de estoques, o que

seria um paradoxo para uma empresa que implementou ou que estivesse implementando um processo de produção *Just in Time*.

O *Just in Time* (JIT) é uma técnica que tem por objetivo o atendimento da demanda a partir do instante em que ela se manifesta. Esta técnica surgiu no Japão, contrapondo o conceito ocidental de criação de barreiras de segurança. Estas barreiras de segurança têm por objetivo proteger o sistema produtivo das variações provocadas por eventos de natureza aleatória. Dessa forma nenhum produto é produzido sem que haja um pedido, ou seja, não existem estoques de produto acabado. A implementação do JIT é feita associada a uma metodologia de identificação e solução de problemas ao longo do processo produtivo. A redução de estoques é feita buscando identificar problemas que geralmente são mascarados pela existência de produtos em estoque. Neste caso, os estoques são barreiras de segurança para o sistema produtivo.

A partir do momento em que estes problemas vêm à tona, o processo de produção é interrompido para que o problema seja analisado e inicie um processo de solução de problema.

Uma vez que estes problemas são eliminados do processo produtivo (por exemplo, o aumento da confiabilidade das máquinas e dos equipamentos devido a uma política de manutenção mais eficaz), as probabilidades utilizadas como parâmetro da função objetivo da Credibilidade são alteradas. Isso seria suficiente para que houvesse uma redução do nível de estoques, alterando a solução do problema.

A implantação do JIT pleno considera que as conseqüências das variações provocadas por eventos aleatórios são menores que os custos de manutenção das barreiras de segurança (estoques). Essa é a razão pela qual o JIT prega políticas de estoque zero. O problema abordado neste trabalho representa um caso onde as conseqüências (atrasos de entrega) provenientes de eventos aleatórios (a quebra de uma máquina ou a rejeição de um lote de matéria prima, por exemplo) são consideradas pela gerência maiores que os custos de barreiras de segurança, pois representam um ganho de vantagem competitiva. Isto justifica a escolha de uma alternativa que apresenta um custo mais elevado.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Este trabalho apresentou dois modelos de apoio multicritério a decisão para o problema de planejamento agregado da produção, ambos baseados no mesmo princípio, o de estender as prioridades da estratégia de produção para as decisões a serem tomadas no contexto do planejamento agregado da produção. A aplicação deste modelo permite que as decisões tomadas no planejamento agregado (quantidade de itens a serem produzidos em cada alternativa de produção em cada período do horizonte de planejamento, os níveis de estoque ao longo do horizonte de planejamento e as variações na força de trabalho para que a demanda prevista seja atendida) estejam alinhadas com a estratégia de produção adotada pela empresa, gerando resultados que permitam adquirir vantagem competitiva em operações.

O primeiro modelo proposto consiste em um modelo mais específico, composto por um conjunto de equações que se propõe a quantificar o nível de desempenho da alternativa de produção escolhida nos cinco objetivos de desempenho considerados em estratégia de produção. Este modelo assume linearidade nas relações do sistema de produção para viabilizar a aplicação de técnicas de otimização linear.

O segundo modelo proposto consiste em uma generalização do primeiro, onde é apresentada uma seqüência generalizada de passos para resolver um problema de planejamento agregado multiobjetivo. Estruturado desta maneira, o modelo pode ser aplicado utilizando o método de otimização multiobjetivo mais adequado ao contexto do problema.

Para ilustrar o modelo proposto através de uma aplicação numérica, foram avaliados alguns métodos de apoio multicritério a decisão (métodos de programação linear multiobjetivo) que poderiam ser aplicados no modelo proposto de planejamento agregado da produção. Dentre os métodos existentes na literatura, utilizou-se àquele que permitia uma abordagem interativa, em que se buscou mostrar como um gerente poderia interagir no processo e incorporar alguns aspectos subjetivos inerentes a uma situação real.

Na aplicação numérica foi utilizado um método interativo de programação linear multiobjetivo de fácil implementação, viabilizando a solução do problema através do solver contido no Microsoft Excel, ademais a solução do problema poderia ser obtida através do LINDO, GAMS ou qualquer ferramenta de otimização.

Avaliando outros aspectos, pôde-se perceber que a situação em que o sistema produtivo se encontra pode alterar bastante os resultados obtidos no planejamento agregado multiobjetivo, assim como aumentar a performance da função produção nos objetivos estratégicos de desempenho. O exemplo da aplicação numérica mostra uma situação em que é necessário lançar mão de recursos mais custosos (hora extra e subcontratação) e de estoques.

Para aumentar o desempenho global da empresa nos aspectos competitivos, a recomendação apresentada sugere que sejam utilizados níveis elevados de estoque, o que seria um paradoxo para uma empresa que implementou ou que estivesse implementando um processo de produção *Just in Time*, contudo o que se observa é que foi necessário lançar mão do uso de estoques para compensar as falhas do processo que impediam a entrega dos produtos dentro do prazo devido. À medida que estas falhas no processo forem eliminadas, os parâmetros da função objetivo da Credibilidade serão alterados, alterando o problema e a sua solução.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como direcionamento para futuros trabalhos sugere-se:

- Abordar o problema de planejamento agregado utilizando um enfoque de gerenciamento da demanda, buscando deslocá-la para períodos de baixa demanda;
- O estudo de modelos que considerem a incerteza relativa à demanda prevista, incorporando a abordagem com Teoria da Utilidade;
- Desenvolver modelos que incorporem a possibilidade de uma racionalidade não-compensatória;
- Aplicar os conceitos da abordagem multicritério de apoio a decisão aos métodos que utilizam regras de decisão para efetuar o planejamento agregado;
- Desenvolver modelos que utilizem programação recursiva, agregando informações que permitam melhorar o desempenho global;
- Abordar as restrições de fluxo de caixa da empresa acrescentando uma análise econômica e financeira para as restrições de fluxo de caixa e as alternativas para o custo total dos n períodos;

- Aplicar programação dinâmica para criar modelos de planejamento da produção que permitam estudar os efeitos das oscilações das variáveis de entrada, de forma que se possa efetuar o controle da produção através de uma abordagem de controle ótimo.
- Desenvolver modelos que possam ser aplicados às situações onde não é possível presumir a linearidade para o modelo, buscando apoio em métodos iterativos não lineares que considerem múltiplos objetivos;
- Investigar a aplicação da programação estocástica ao modelo com o objetivo de tratar as incertezas relacionadas aos custos e a demanda prevista.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. T. (Org.) & COSTA, A. P. C. S. (Org.), 2003. *Aplicações com Métodos de Apoio Multicritério a Decisão*. Editora Universitária.
- BAYKASOGLU, A., 2001. “MOAPPS 1.0: Aggregate Production Planning Using the Multiple Objective Tabu Search”, *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 16, p. 3685-3702.
- BEAUMONT, N. & SOHAL, A., 2004. “Outsourcing in Australia”, *International Journal of Operation and Production Management*, Vol. 24, No. 7, p.688 – 700.
- BENAYOUN, R., MONTGOLFIER, J., TERGNY, J. & LARICHEV, O., 1971. “Linear Programming with Multiple Objective Functions: Step Method (STEM)”, *Mathematical Programming*, Vol. 1, p. 366-375.
- BERGSTROM, G. L. & SMITH, B. E., 1970. “Multi-Item Production Planning – An Extension of HMMS Rules”, *Management Science*, Vol. 16, No. 10, p. B614-B629.
- BOWMAN, E. H., 1956. “Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programming”, *Operations Research*, Vol.4, pp 100-03.
- BUFFA, E. S. & TAUBERT, W. S., 1967. “Evaluation of Direct Computer Search Methods for the Aggregate Planning Problem”, *Industrial Management Review*, p. 19-36.
- CHARNES, A. & COOPER, W., 1977. “Goal Programming and Multiple Objective Optimization – part I”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 1, No. 1.
- CLÍMACO, J. N., ANTUNES, C. H. & ALVES, M. J. G., 2003. *Programação Linear Multiobjectivo*, Imprensa de Coimbra.

- CORRÊA, H. L., GIANESI, I. G. N. & CAON, M., 2001. *Planejamento, Programação e Controle da Produção*, Ed. Atlas, São Paulo.
- CUNHA, N. O. Da & POLAK, E., 1967. “Constrained Minimization Under Vector-Valued Criteria in Finite Dimensional Spaces”, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 19, pp. 103-124.
- DAVIS, M.M, AQUILANO, N.J. & CHASE, R.B., 2001. *Fundamentos de Administração da Produção*, Bookman.
- EHRGOTT, M. (Org.) & GANDIBLEUX, X. (Org.). 2002, *Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliography Surveys*, Kluwer Academic Publishers.
- EILON, S., 1975. “Five Approaches to Aggregate Production Planning”. *AIIE Transactions*. Vol.7, N. 2, p. 118-131.
- FORRESTER, J. W., 1961. *Industrial Dynamics*. Productivity Press.
- GAITHER, N & FRAZIER, G., 2001. *Administração da produção e Operações*. Editora Pioneira.
- GARVIN, D. A., 2002. *Gerenciando a Qualidade: A Visão Estratégica e Competitiva*, Ed. Qualitymark.
- GOMES, L., F., A.; GOMES, C., F., S. & ALMEIDA, A. T. de., 2002. *Tomada de Decisão Gerencial: O Enfoque Multicritério*, Ed. Atlas.
- GOODMAN, D. A., 1974. “A Goal Programming Approach to Aggregate Planning of Production and Work Force”, *Management Science*, Vol. 20, No. 12, p. 1569-1575.
- HANSSMANN, F. & HESS, S. W., 1960. “A Linear Programming Approach to Production and Employment Scheduling”, *Management Technology*, Vol. 1, No. 1, p. 46-51.

- HEIZER, J. & RENDER, B., 1993. *Production and Operations Management: Strategies and Tactics*, New Jersey, Prentice Hall.
- HILL, T., 1993. *Manufacturing Strategy*, Ed Macmillan.
- HOLT, C. C., MODIGLIANI, F. & SIMON, H. A., 1955. "A Linear Decision Rule for the Production and Employment Scheduling", *Management Science*, Vol. 2, No. 1, p.1-30.
- HOLT, C. C., MODIGLIANI, F. & MUTH, J. F., 1956. "Derivation of a Linear Decision Rule for Production and Employment", *Management Science*, Vol.2, No. 2, p. 159-177.
- HOLT, C. C., MODIGLIANI, F., MUTH, J. F. & SIMON, H. A., 1960. *Planning Production, Inventories, and Work Force*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- IGNIZIO, J. P., 1985. "Introduction to Linear Goal Programming", *Sage University Papers Series in Quantitative Applications in the Social Sciences*, No. 07-056, Sage Publications.
- KIRA, D., KUSY, M. & RAKITA, I., 1997. "A Stochastic Linear Programming Approach to Hierarchical Production Planning", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 48, No. 2, pp. 207-211.
- KRIEBEL, C. H., 1967. "Coefficient Estimation in Quadratic Programming Models", *Management Science*, Vol. 13, No. 8, p. B473-B486.
- LI, Y. & MAN, K. F., 1998. "Scheduling and Planning Problem in Manufacturing Systems with Multiobjective Genetic Algorithm", In Proceedings of the 24th Annual Conference of IEEE (IECON '98), p. 274-279. (Industrial Electronics Society).
- LUDGREN, E. F. & SCHNEIDER, J. V., 1971. "A Marginal Costo Model For the Hiring-Overtime Decision", *Management Science*, Vol. 17, No. 6, pp. B399-B405.

- MILLER, J. G.; HAYSLIP, W., 1989. "Implementing Manufacturing Strategic Planning", *Planning Review*, Vol. 17, No 4, p.22.
- MILLER, J. G.; ROTH, A. V., 1994. "A taxonomy of manufacturing strategies", *Management Science*, Vol. 40, No 3, p 285-304.
- MONKS, J. G., 1987. *Administração da produção*, McGraw-Hill.
- MOREIRA, D. A., 2000. *Administração da Produção e Operações*, Ed. Pioneira.
- MUDAHAR, M. S. 1972. "Recursive Programming Models of the Farm Sector with Emphasis on Linkages with Nonfarm Sectors: The Punjab, India", *The University of Wisconsin, Ph.D Thesis*, University Microfilms Inc., Ann Arbor, Michigan.
- PAN, L. & KLEINER, B. H., 1995. "Aggregate Planning Today", *Work Study*, Vol. 44, No. 3, p. 4-7.
- PIPER, C. J. & VACHON, S., 2001. "Accounting for Productivity Losses in Aggregate Planning", *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 17, p. 4001-4012.
- SHILD, A., 1959. "On Inventory, Production and Employment Scheduling", *Management Science*, Vol. 5, No. 2, p. 157-168.
- SILVER, E. A., 1972. "Medium-range Aggregate Production Planning: State of the Art", *Production and Inventory Management*, p. 15-39.
- SLACK, N., CHAMBERS, S., HARLAND, C., HARRISON, A. & JOHNSTON, R., 1996. *Administração da Produção*, Ed. Atlas.
- SLACK, N., 2002. *Vantagem Competitiva em Manufatura*, Ed. Atlas.

- STEUER, R., 1986. *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*. Ed. Wiley.
- STOCKTON, D. J., QUINN, L. & KHALIL, R. A., 2004a. "Use of Genetic Algorithms in Operations Management Part 1: Applications", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, p. 315-327.
- STOCKTON, D. J., QUINN, L. & KHALIL, R. A., 2004b. "Use of Genetic Algorithms in Operations Management Part 2: Results", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 218, p. 329-343.
- TAUBERT, W. H., 1968. "A Search Decision Rule for the Aggregate Scheduling Problem", *Management Science*, Vol. 14, No. 6, p. B343-B359.
- THEIL, H., 1961. *Economic Forecasts and Policy*. North-Holland Publishing Company.
- VAN DE PANNE, C. & BOSJE, P., 1962. "Sensitivity Analysis of Cost Coefficient Estimates: The Case of Linear Decision Rules for Employment and Production", *Management Science*, Vol. 9, No. 1, p. 82-107.
- WANG, R.-C. & FANG, H.-H., 2001. "Aggregate Production Planning with Multiple Objectives in a Fuzzy Environment", *European Journal of Operational Research*, Vol. 133, p. 521-536.
- WANG, R.-C. & LIANG, T.-F., 2005. "Aggregate Production Planning with Multiple Fuzzy Goals", *International Journal Adv. Manufacturing Technology*, Vol. 25, p. 589-597.
- WELAM, U. P., 1976. "Comments on Goal Programming for Aggregate Planning", *Management Science*, Vol. 22, No. 6, p. 708-712.

WELAM, U. P., 1978. “An HMMS Type Interactive Model for Aggregate Planning”,
Management Science, Vol. 24, No. 5, p. 564-575.

WHEELWRIGHT, S. C., 1984. “Manufacturing Strategy: Defining the Missing Link”,
Strategic Management Journal, Vol. 5, p.77-91.

WINTERS, P. R., 1961. “Constrained Inventory Rules for Production Smoothing”,
Management Science, Vol. 8, No. 4, p. 470-481.

ZELNY, M., 1982, *Multiple Criteria Decision Making*. MacGraw-Hill.