JULIANA KEIKO SAGAWA

Análise da dinâmica e da prática do Planejamento e Controle da
Produção: uma abordagem combinada de estudo de caso e
Modelagem de Sistemas Dinâmicos

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Doutor
em Engenharia de Produção

Área de Concentração: Processos e Gestão
de Operações

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Seido
Nagano

São Carlos
2013

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

S129a	<p>Sagawa, Juliana Keiko</p> <p>Análise da dinâmica e da prática do planejamento e controle da produção : uma abordagem combinada de estudo de caso e modelagem de sistemas dinâmicos / Juliana Keiko Segawa; orientador Marcelo Seido Nagano. São Carlos, 2013.</p> <p>Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.</p> <p>1.Planejamento e controle da produção. 2. Programação de operações. 3. Integração. 4. Incerteza. 5. Qualidade da informação. 6. Desempenho. 7. Modelagem de sistemas dinâmicos. 8. Teoria de controle. 9. Grafos de ligação. 10. Simulação. I. Título.</p>
-------	--

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **JULIANA KEIKO SAGAWA**.

Título da tese: "Análise da dinâmica e da prática do planejamento e controle da produção: uma abordagem combinada de estudo de caso e modelagem de sistemas dinâmicos".

Data da defesa: 01/10/2013

Comissão Julgadora:

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

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

Prof. Titular **Eduardo Morgado Belo**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Mauro Speranza Neto**
(Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/PUC-RJ)

Prof. Dr. **Horácio Hideki Yanasse**
(Universidade Federal de São Paulo/UNIFESP)

Resultado:

Aprovada

Aprovada

Aprovada

APROVADA

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Prof. Titular **Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

À minha família, com amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Seido Nagano pela orientação, pelas importantes contribuições, pela confiança e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Mauro Speranza Neto pela coorientação, pelo incentivo e pelas valiosas sugestões e encaminhamentos feitos durante o andamento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Walther Azzolini Junior pela contribuição com os dados necessários à modelagem e pelas observações construtivas realizadas na defesa de qualificação.

Ao Prof. Dr. Eduardo Morgado Belo pelas sugestões e observações construtivas realizadas na defesa de qualificação.

Ao meu marido Branco, pela presença, contribuição e carinho em todos os momentos.

Aos meus pais Jorge e Ana, os que primeiro (e sempre) me incentivaram a estudar.

Ao meu irmão Fernando pela amizade e apoio.

Aos meus amigos Tavares, Fabio, Fabiane, Fernanda e Adriana, por compartilharem bons momentos comigo, durante esta etapa.

Ao Lourenço, Ivan, Rafael, Fabio, Leonardo, Felipe e Luciano, pela recepção atenciosa e pela participação na pesquisa realizada.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia de Produção da EESC - USP e aos meus colegas docentes e funcionários do Departamento de Engenharia de Produção da UFSCar.

A Deus, fonte primária de todas as coisas, ainda que não consigamos vivenciar, na maioria dos momentos, o real significado disso.

Nada existe a conquistar. A vida é conhecida somente quando você começa a se entregar.

Osho

RESUMO

SAGAWA, J. K. **Análise da dinâmica e da prática do Planejamento e Controle da Produção: uma abordagem combinada de estudo de caso e Modelagem de Sistemas Dinâmicos.** 2013. 297p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Os paradigmas de mercado e produção têm-se alterado sensivelmente nos últimos cinquenta anos. Nesse novo contexto, para que as empresas tenham um desempenho competitivo, deve-se considerar fatores como integração, qualidade da informação e incertezas do ambiente. Um dos objetivos principais deste trabalho é analisar as inter-relações entre esses três fatores citados, no âmbito do Planejamento e Controle da Produção (PCP), bem como avaliar seu impacto no desempenho do PCP e da empresa. O desempenho do PCP foi avaliado considerando-se o nível de reprogramações, ou seja, o nível de modificações na programação da produção, e considerando-se o atendimento das metas definidas para os indicadores dessa função. Essa pesquisa qualitativa e descritiva foi feita por meio da metodologia de estudo de casos múltiplos. Como resultados, foram observadas evidências da existência de relações positivas entre os constructos analisados, ou seja, integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho. Além disso, foram identificados diferentes mecanismos de integração utilizados nas empresas, e foram observadas diferentes causas para as reprogramações. O segundo objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo dinâmico para controle da produção de múltiplos produtos, capaz de responder às incertezas que afetam estabilidade dos sistemas produtivos. O objeto da modelagem foi um sistema com fluxo *job shop* destinado à produção de embalagens de polipropileno, pertencente a uma empresa dos setores têxtil e petroquímico. O modelo foi desenvolvido com base na Modelagem de Sistemas Dinâmicos e na Teoria de Controle. Para obtenção do equacionamento matemático, utilizou-se a metodologia dos Grafos de Ligação. A implementação e simulação do modelo foi realizada com o auxílio do módulo Simulink[®], do software Matlab[®]. O objetivo de controle consiste no ajuste da frequência de operação das máquinas de forma a atender as demandas previstas e, simultaneamente, manter os níveis estabelecidos de estoque em processo. No presente trabalho, focou-se na análise da resposta do sistema com controle no regime transiente, com os estoques iniciais nulos. Os melhores resultados foram observados com a utilização de um controlador híbrido, que estabelece uma produção constante em um período inicial e passa posteriormente a atuar como um controlador proporcional. O modelo dinâmico desenvolvido neste trabalho é coerente com resultados obtidos na pesquisa qualitativa e com prática do PCP, pois está alinhado aos indicadores de desempenho desta função, promove a melhoria da qualidade das informações disponíveis ao planejamento e é capaz de responder a incertezas que afetam o fluxo de produção.

Palavras-chave: Planejamento e Controle da Produção, Programação de Operações, integração, incerteza, qualidade da informação, desempenho, Modelagem de Sistemas Dinâmicos, Teoria de Controle, Grafos de Ligação, simulação.

ABSTRACT

SAGAWA, J. K. **Analysis of the dynamics and practice of the Production Planning and Control: an approach combining case study and System Dynamics modeling.** 2013. 297p. Thesis (PhD) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

The production paradigm has considerably changed over the last fifty years. In this new context, factors such as integration, information quality and ability to respond to uncertainties must be pursued by companies that want to remain competitive. Thus, one of the main objectives of this research is to analyze the relationships among these three factors mentioned, in the level of the Production Planning and Control (PPC) function, as well as to assess their impact on the performance of the PPC function and on the overall business performance. The performance of the PPC function was measured by means of the rescheduling frequency, i.e., the frequency with which the production activities have to be rescheduled, and by means of the degree of accomplishment of organizational goals, that is, the extent to which the PPC metrics are accomplished. This qualitative and descriptive research was carried out as a multiple case study. Evidences of the existence of a positive relationship among the analyzed constructs, i.e., integration, uncertainty, information quality and performance, were found. In addition, different integration mechanisms and different rescheduling causes were observed on the studied cases. The second main objective of this work is the development of a dynamic model for the production control of multi-product systems, i.e, a model that could respond to the environmental and internal uncertainties that affect the production flow. A job shop production system of propylene bags from a manufacturing company of the textile and petrochemical industry was modeled. The model was developed using Control Theory, System Dynamics modeling, and, more specifically, the Bond Graph technique. The mathematical formulation of the system was derived from the Bond Graphs. System implementation and simulation was performed with the aid of Simulink[®] and Matlab[®] software. The control objective was to adjust the operation frequency of the machines to attend the required demand while simultaneously keeping the work in process at the desired levels. In this current work, the focus of the analysis was placed on the transient response of the controlled system, with initial inventory levels set to zero. The best results were achieved with a hybrid controller, which leads the machines to operate at constant frequency in the initial period and, later on, starts to perform as a proportional controller. The proposed dynamic model is compatible with the findings of the qualitative research and with the PPC practice, since it is aligned with the PPC metrics, it improves the quality of information available for planning and it can respond to the uncertainties that may affect the production flow.

Key words: Production Planning and Control, *Scheduling*, integration, uncertainty, information quality, performance, System Dynamics Modeling, Control Theory, Bond Graph, simulation.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Representação esquemática dos objetivos do trabalho.</i>	32
<i>Figura 2.1 – Dimensões da integração, agrupadas a partir das definições de diferentes autores. Fonte: próprio autor.</i>	39
<i>Figura 2.2 – Dimensões do conceito de incerteza, agrupadas a partir das definições de diferentes autores. Fonte: próprio autor.</i>	43
<i>Figura 2.3 – Classificação da Qualidade da Informação de acordo com Wang e Strong (1996).</i>	45
<i>Figura 2.4 – Dimensões representativas do desempenho, agrupadas a partir das definições de diferentes autores. Fonte: próprio autor.</i>	51
<i>Figura 2.5 – Estrutura conceitual representando as relações exploradas nos estudos empíricos. Fonte: próprio autor.</i>	63
<i>Figura 3.1 – Equações de nível e de taxa de acordo com o paradigma do Industrial Dynamics. Fonte: Forrester, 1961.</i>	71
<i>Figura 3.2 – Diagrama de blocos de um sistema de produção e estoques. Fonte: adaptado de Wikner (1994).</i>	72
<i>Figura 3.3 – Subáreas de classificação dos Modelos de Planejamento e Controle da Produção baseados na Teoria de Controle</i>	81
<i>Figura 3.4 – Sistema de controle e programação de operações assistido por computador. Fonte: Adaptado de Li et al. (2011)</i>	83
<i>Figura 3.5 – Conceito de alavanca para uma linha com m máquinas. Fonte: adaptado de Li et al (2011)</i>	84
<i>Figura 3.6 – Estrutura de controle de malha fechada do DATC. Fonte: Cho e Erkoç, 2009.</i>	85
<i>Figura 3.7 – Trajetórias das datas de chegada e término no DATC no espaço dos estados. Simulação feita em Matlab com base no trabalho de Cho e Erkoç (2009). Fonte: próprio autor.</i>	87
<i>Figura 3.8 – Curvas logísticas mostrando a interdependência entre desempenho, lead time e estoque em processo (WIP). Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).</i>	95
<i>Figura 3.9 – Modelo contínuo para um sistema de máquina única. Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).</i>	97
<i>Figura 3.10 – a) Gráficos de tempo de reação para mudanças de capacidade; b) gráficos de tempo mínimo de permanência da capacidade instalada.</i>	100
<i>Figura 3.11 – Conceito do controlador automático de backlog. Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).</i>	100
<i>Figura 3.12 – Conceito de um controlador automático de estoque em processo. Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).</i>	101
<i>Figura 3.13 – Conceito do controlador combinado de backlog e WIP. Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).</i>	102
<i>Figura 3.14 – Impacto da inserção de uma ordem urgente sobre os parâmetros de controle: b) para o sistema com controle. Fonte: Adaptado de Wiendahl e Breithaupt (2000).</i>	104
<i>Figura 3.15 – Representação de uma ligação em um grafo de ligação</i>	108
<i>Figura 3.16 – Representação da causalidade em uma ligação.</i>	108
<i>Figura 3.17 – Representação de um resistor.</i>	109
<i>Figura 3.18 – Representação de um capacitor com causalidade integral.</i>	110

<i>Figura 3.19 – Representação do elemento inércia com causalidade integral.</i>	111
<i>Figura 3.20 – Fontes ideais de esforço e de fluxo, e suas respectivas causalidades.</i>	111
<i>Figura 3.21 – Representação do elemento transformador com duas possibilidades de causalidade: a) possibilidade 1, b) possibilidade 2.</i>	112
<i>Figura 3.22 – Representação da junção 0 e junção 1.</i>	112
<i>Figura 3.23 – modelo de estoque em grafos de ligação. Fonte: Ferney (2000).</i>	115
<i>Figura 3.24 – modelo de máquina. Fonte: Ferney (2000).</i>	117
<i>Figura 3.25 – modelo de interface entre estoque e máquina. Fonte: Ferney (2000).</i>	118
<i>Figura 3.26 – modelo de estação a) detalhado b) simplificado.</i>	119
<i>Figura 3.27 – modelo de fonte a) de fluxo livre; b) de fluxo imposto. Fonte: Ferney (2000).</i>	120
<i>Figura 3.28 – modelo de um tanque de capacidade infinita (estoque final). Fonte: Ferney (2000).</i>	120
<i>Figura 3.29 – Modelo de junção convergente. Fonte: Ferney (2000).</i>	121
<i>Figura 3.30 – Modelo de junção divergente. Fonte: Ferney (2000).</i>	121
<i>Figura 3.31 – Sistema simples de manufatura. Fonte: Ferney (2000).</i>	122
<i>Figura 3.32 – Diagrama de grafos de ligação do sistema. Fonte: Ferney (2000).</i>	122
<i>Figura 3.33 – Níveis de estoque durante o acoplamento estoque-máquina (regime transiente). Fonte: Ferney (2000).</i>	126
<i>Figura 3.34 – Evolução dos níveis de estoque no tempo. Fonte: Ferney (2000).</i>	126
<i>Figura 3.35 – Evolução do fluxo de produção da última estação no tempo. Fonte: Ferney (2000).</i>	127
<i>Figura 3.36 – Evolução do fluxo de suprimento das fontes e do fluxo de produção da última estação. Fonte: Ferney (2000).</i>	127
<i>Figura 3.37 – Evolução dos níveis de estoques no tempo, obtidos a partir da reprodução da simulação proposta por Ferney (2000). Fonte: próprio autor.</i>	127
<i>Figura 4.1 – Dimensões da integração investigadas nos estudos de caso.</i>	137
<i>Figura 4.2 – Aspectos da incerteza ambiental investigados.</i>	137
<i>Figura 4.3 – Dimensões da qualidade da informação investigadas nos casos.</i>	138
<i>Figura 4.4 – Diferentes definições e dimensões do desempenho a serem investigadas: a) perspectiva das reprogramações.</i>	139
<i>Figura 4.4 – Diferentes definições e dimensões do desempenho a serem investigadas: b) perspectiva dos fatores competitivos; c) perspectiva do desempenho geral da empresa.</i>	140
<i>Figura 4.5 – Principais aspectos a serem investigados no estudo de casos múltiplos</i>	141
<i>Figura 4.6 – Principais proposições do estudo de casos múltiplos</i>	141
<i>Figura 4.7 – Estrutura para condução do estudo de caso. Fonte: Cauchick Miguel (2010).</i>	142
<i>Figura 4.8 – Processo de modelagem. Fonte: adaptado de Morabito e Pureza (2010).</i>	143
<i>Figura 4.9 – Etapas da Modelagem de Sistemas Dinâmicos. Fonte: Speranza Neto e Silva (2005).</i>	144
<i>Figura 4.10 – Estrutura geral de desenvolvimento da pesquisa.</i>	146
<i>Figura 5.1 – Estrutura organizacional da área de PCP na empresa 1.</i>	164
<i>Figura 5.2 – relação entre incerteza e reprogramações, observada na empresa 4</i>	199

<i>Figura 5.3 – relação observada entre integração, qualidade da informação e desempenho, moderada pela incerteza</i>	200
<i>Figura 5.4 – relação observada entre integração, qualidade da informação e desempenho na empresa 4</i>	201
<i>Figura 6.1 – Embalagens de rafia.</i>	206
<i>Figura 6.2 – Fluxograma simplificado da produção de embalagens de rafia. Fonte: adaptado de Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	208
<i>Figura 6.3 – Seções 01 a 07 da extrusora. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	209
<i>Figura 6.4 – Matriz e torre. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	210
<i>Figura 6.5 – Cilindros do primeiro, segundo e terceiro estiros. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	211
<i>Figura 6.6 – Bobinadeiras. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	211
<i>Figura 6.7 – Duas vistas distintas dos teares da empresa. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	212
<i>Figura 6.8 – Laminadora. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	214
<i>Figura 6.9 – Impressoras. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	214
<i>Figura 6.10 – Máquina de corte e costura. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).</i>	215
<i>Figura 6.11 – Modelo físico do sistema de produção de embalagens de rafia.</i>	220
<i>Figura 6.12 – Diagrama de grafos de ligação do sistema de embalagens de rafia: a) parte 1.</i>	224
<i>Figura 6.12 – Diagrama de grafos de ligação do sistema de embalagens de rafia: b) parte 2.</i>	225
<i>Figura 6.12 – Diagrama de grafos de ligação do sistema de embalagens de rafia: c) parte 3.</i>	226
<i>Figura 6.13 – Modelo de simulação elaborado no Simulink®.</i>	235
<i>Figura 6.14 – Resultados da simulação 1: níveis de estoque.</i>	241
<i>Figura 6.15 – Resultados da simulação 1: frequências de operação das máquinas.</i>	241
<i>Figura 6.16 – Resultados da simulação 2: níveis de estoque.</i>	242
<i>Figura 6.17 – Resultados da simulação 2: frequências de operação das máquinas.</i>	242
<i>Figura 6.18 – Resultados da simulação 4: níveis de estoque.</i>	243
<i>Figura 6.19 – Resultados da simulação 5: níveis de estoque.</i>	244
<i>Figura 6.20 – Resultados da simulação 6: níveis de estoque.</i>	245
<i>Figura 6.21 – Resultados da simulação 6: frequências de operação das máquinas.</i>	245
<i>Figura 6.22 – Detalhe dos gráficos da simulação 6 nos momentos iniciais: a) frequências de operação das máquinas; b) níveis de estoque.</i>	246
<i>Figura 6.23 – Resultado da simulação 7: níveis de estoque q_j (resposta do sistema sem controle).</i>	248
<i>Figura 6.24 – Resultados da simulação 8: níveis de estoque.</i>	250
<i>Figura 6.25 – Resultados da simulação 9: níveis de estoque.</i>	251
<i>Figura 6.26 – Resultados da simulação 9: frequências de operação das máquinas.</i>	251
<i>Figura 6.27 – Resultados da simulação 10: níveis de estoque.</i>	252
<i>Figura 6.28 – Resultados da simulação 10: frequências de operação das máquinas.</i>	253
<i>Figura 6.29 – Resultados da simulação 10: erros relativos.</i>	253
<i>Figura 6.30 – Resultados da simulação 11: níveis de estoque.</i>	255
<i>Figura 6.31 – Resultados da simulação 11: frequências de operação das máquinas.</i>	255
<i>Figura 6.32 – Resultados da simulação 11: erros relativos.</i>	256

<i>Figura 6.33 – Resultados da simulação 12: níveis de estoque.</i>	258
<i>Figura 6.34 – Resultados da simulação 12: frequências de operação das máquinas.</i>	258
<i>Figura 6.35 – Resultados da simulação 12: erros relativos.</i>	259
<i>Figura 6.36 – Resultados da simulação 13: níveis de estoque.</i>	261
<i>Figura 6.37 – Resultados da simulação 13: frequências de operação das máquinas.</i>	261
<i>Figura 6.38 – Resultados da simulação 13: erros relativos.</i>	262
<i>Figura 6.39 – Resultados da simulação 13b: erros relativos.</i>	263
<i>Figura 6.40 – Resultados da simulação 13b: frequências de operação das máquinas.</i>	263
<i>Figura 6.41 – Resultados da simulação 14: níveis de estoque.</i>	264
<i>Figura 6.42 – Resultados da simulação 14: frequências de operação das máquinas.</i>	264
<i>Figura 6.43 – Resultados da simulação 14: erros relativos.</i>	265
<i>Figura B.1 – Detalhamento da função utilizada na simulação.</i>	295

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 6.1 – Temperatura nas seções do canhão da extrusora.</i>	209
<i>Tabela 6.2 – Largura dos diferentes tipos de fios e quantidade produzida a partir do filme de polipropileno.</i>	210
<i>Tabela 6.3 – Máquinas utilizadas na produção de embalagens de ráfia.</i>	215
<i>Tabela 6.4 – Dados de demanda e mix. Fonte: adaptado de Minotti (2011).</i>	218
<i>Tabela 6.5 – Normalização das porcentagens de fluxo nas junções (pesos), obtidas a partir do mix de produtos da empresa.</i>	222
<i>Tabela 6.6 – Dados de produção das máquinas em paralelo e porcentagens de divisão de fluxo.</i>	223
<i>Tabela 6.7 – Soluções do sistema no regime permanente.</i>	233
<i>Tabela 6.8 – Verificação do atendimento das demandas no regime permanente.</i>	234
<i>Tabela 6.9 – Valores obtidos para os estoques intermediários com o sistema sem controle (malha aberta).</i>	249
<i>Tabela 6.10 – Valores para análise da relação entre estoque, frequência de operação da máquina antecedente e fração de fluxo.</i>	249

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 3.1 – Comparação entre os modelos automáticos de controle para Programação de Operações e Controle da Produção</i>	<i>129</i>
<i>Quadro 5.1 – Características gerais das empresas estudadas.</i>	<i>148</i>
<i>Quadro 5.2- Resumo dos aspectos investigados no estudo de caso</i>	<i>149</i>
<i>Quadro 5.3 – Resumo das observações relativas à empresa 1.</i>	<i>159</i>
<i>Quadro 5.4 – Resumo das observações relativas à empresa 2.</i>	<i>169</i>
<i>Quadro 5.5 – Resumo das observações relativas à empresa 3.</i>	<i>181</i>
<i>Quadro 5.6 – Resumo das observações relativas à empresa 4.</i>	<i>193</i>
<i>Quadro 5.7 – Mecanismos de integração presentes nas empresas estudadas</i>	<i>196</i>
<i>Quadro 5.8 – Resumo comparativo das informações obtidas em relação aos constructos do estudo</i>	<i>197</i>
<i>Quadro 6.1 – Classificação dos produtos em famílias segundo seu roteiro de processo.</i>	<i>216</i>
<i>Quadro 6.2 – Dados para cálculo das porcentagens de fluxo na junção 2.</i>	<i>221</i>
<i>Quadro 6.3 – Resumo dos parâmetros e resultados das simulações.</i>	<i>239</i>
<i>Quadro 6.3 – Resumo dos parâmetros e resultados das simulações (continuação).</i>	<i>240</i>
<i>Quadro 6.4 – Alinhamento entre a pesquisa qualitativa realizada e o modelo dinâmico desenvolvido.</i>	<i>269</i>

LISTA DE SIGLAS

APC – Automatic Production Control

APIOBPCS - Automatic Pipeline, Inventory and Order Based Production Control System

APT - Average Processing Time

APT-LVR - Average Processing Time - Leverage

ATP - Available To Promise

BOM - Bill of Materials

CAD/CAM - Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing

DATC - Distributed Arrival Time Controller

DIAC - Double Integral Arrival Time Controller

ERP - Enterprise Resource Planning

FCFS - First Come, First Served (primeiro a chegar, primeiro a ser servido)

IPT - Information Processing Theory (Teoria do Processamento de Informação)

IQ - Information Quality

GQT - Gestão da Qualidade Total

MIS - Management of Information Systems

MRP - Material Requirements Planning (Planejamento das Necessidades de Material)

MRT - Matriz de Recursos e Tarefas

MSD - Mean Squared Deviation

MTO - Make To Order (produzir sob encomenda)

MTS - Make To Stock (produzir para estocar)

PCP - Planejamento e Controle da Produção

PD - Proporcional Derivativo

PDCA - Plan, Do, Control, Act (tipo de método de análise e solução de problemas, utilizado na área de Qualidade)

PI - Proporcional Integral

PID - Proporcional Integral Derivativo

PPC - Production Planning and Control (Planejamento e Controle da Produção)

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

QI - Qualidade da Informação

ROI - Return on Investment

SCI - Supply Chain Integration

SKU - Stock Keeping Unit

S&OP - Sales and Operations Planning (Planejamento de Vendas e Operações)

TBC - Time-Based Competition

TI - Tecnologia da Informação

VPL - Valor Presente Líquido

WIP - Work In Process (estoque em processo)

SUMÁRIO

<u>1. INTRODUÇÃO</u>	27
1.1 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES	33
<u>2. INTEGRAÇÃO, INCERTEZA, QUALIDADE DA INFORMAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM O DESEMPENHO</u>	35
2.1 DEFINIÇÕES DOS CONSTRUCTOS ABORDADOS	36
2.1.1 INTEGRAÇÃO	36
2.1.2 INCERTEZA	41
2.1.3 QUALIDADE DA INFORMAÇÃO (IQ) E TEORIA DO PROCESSAMENTO DA INFORMAÇÃO	44
2.1.4 DESEMPENHO	46
2.2 RELAÇÕES ENTRE INTEGRAÇÃO, INCERTEZA, QUALIDADE DA INFORMAÇÃO E DESEMPENHO	51
2.3 DISCUSSÕES E DIAGRAMA CONCEITUAL	62
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA ANÁLISE REALIZADA	65
<u>3. MODELOS DE CONTROLE DA PRODUÇÃO BASEADOS NA MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS E TEORIA DE CONTROLE</u>	69
3.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO E ESTOQUE EMBASADOS NA TEORIA DE CONTROLE E DINÂMICA DE SISTEMAS	69
3.2 EXTENSÃO VERTICAL DOS MODELOS (ABORDAGEM HIERÁRQUICA)	75
3.3 LACUNAS E OPORTUNIDADES DE PESQUISA NA ÁREA DE CONTROLE APLICADO A SISTEMAS DE PRODUÇÃO	79
3.4 TEORIA DE CONTROLE E MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS APLICADA À PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES (<i>SCHEDULING</i>) E AO CONTROLE DE PRODUÇÃO DE CURTO PRAZO	82
3.4.1 SISTEMA DE CONTROLE E PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES BASEADO NA HEURÍSTICA DA ALAVANCA	82
3.4.2 SISTEMAS DE CONTROLE E PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES BASEADOS EM CONTROLADORES DAS DATAS DE CHEGADA DAS TAREFAS	85
3.4.3 SISTEMA DE CONTROLE BASEADO EM UM MODELO DE FLUXO CONTÍNUO	91
3.4.4 MODELAGEM E CONTROLE DA PRODUÇÃO UTILIZANDO GRAFOS DE LIGAÇÃO E EQUAÇÕES DE ESTADO	104
3.4.5 O MODELO DE FERNEY (2000) PARA SISTEMAS DE MANUFATURA	113
3.4.6 ANÁLISE CRÍTICA DOS MODELOS DE PROGRAMAÇÃO DE OPERAÇÕES E CONTROLE DA PRODUÇÃO APRESENTADOS	128

4. METODOLOGIA DE PESQUISA	133
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	133
4.2 UNIDADE DE ANÁLISE DOS ESTUDOS DE CASO E DOS ATORES DA PESQUISA	135
4.3 VARIÁVEIS E PROPOSIÇÕES DO ESTUDO DE CASO	136
4.4 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS	142
4.5 ESTRUTURA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASOS	142
4.6 METODOLOGIA UTILIZADA NA MODELAGEM	143
5. DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASOS MÚLTIPLOS	147
5.1 ASPECTOS GERAIS DO DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS EMPRESAS ESTUDADAS	147
5.2 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS NA EMPRESA 1	150
5.2.1 FLUXO DE ATIVIDADES DO PCP	150
5.2.2 QUESTÕES CRÍTICAS RELACIONADAS AO PCP	151
5.2.3 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL	152
5.2.4 MECANISMOS DE INTEGRAÇÃO	152
5.2.5 REPROGRAMAÇÕES: FREQUÊNCIA E CAUSAS	154
5.2.6 OBJETIVOS DE DESEMPENHO E INDICADORES	155
5.2.7 OUTRAS OBSERVAÇÕES	156
5.2.8 QUADRO RESUMO E AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS CONSTRUCTOS	156
5.3 ANÁLISE DA EMPRESA 2	161
5.3.1 FLUXO DE ATIVIDADES DO PCP	161
5.3.2 QUESTÕES CRÍTICAS RELACIONADAS AO PCP	162
5.3.3 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL	163
5.3.4 MECANISMOS DE INTEGRAÇÃO	164
5.3.5 REPROGRAMAÇÕES: FREQUÊNCIA E CAUSAS	165
5.3.6 OBJETIVOS DE DESEMPENHO E INDICADORES	167
5.3.7 QUADRO RESUMO E AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS CONSTRUCTOS	167
5.4 ANÁLISE DA EMPRESA 3	171
5.4.1 FLUXO DE ATIVIDADES DO PCP	171
5.4.2 QUESTÕES CRÍTICAS RELACIONADAS AO PCP	171
5.4.3 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL	173
5.4.4 MECANISMOS DE INTEGRAÇÃO	173
5.4.5 REPROGRAMAÇÕES: FREQUÊNCIA E CAUSAS	176
5.4.6 OBJETIVOS DE DESEMPENHO E INDICADORES	177
5.4.7 QUADRO RESUMO E AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS CONSTRUCTOS	178

5.5 ANÁLISE DA EMPRESA 4	183
5.5.1 FLUXO DE ATIVIDADES DO PCP	183
5.5.2 QUESTÕES CRÍTICAS RELACIONADAS AO PCP	184
5.5.3 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL	186
5.5.4 MECANISMOS DE INTEGRAÇÃO	186
5.5.5 REPROGRAMAÇÕES: FREQUÊNCIA E CAUSAS	188
5.5.6 OBJETIVOS DE DESEMPENHO E INDICADORES	189
5.5.7 QUADRO RESUMO E AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE OS CONSTRUCTOS	190
5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CASOS	195
<u>6. DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO DO MODELO DINÂMICO PARA CONTROLE DA PRODUÇÃO DE MÚLTIPLAS FAMÍLIAS DE PRODUTOS</u>	<u>205</u>
6.1 O SISTEMA DE PRODUÇÃO DE EMBALAGENS DE RÁFIA	205
6.1.1 O PROCESSO PRODUTIVO	208
6.1.2 AGRUPAMENTO EM FAMÍLIAS SEGUNDO ROTEIROS DE PROCESSO	216
6.2 MODELAGEM	219
6.2.1 MODELO FÍSICO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DAS NOVE FAMÍLIAS DE PRODUTOS	219
6.2.2 GRAFOS DE LIGAÇÃO DO SISTEMA	223
6.2.3 EQUACIONAMENTO DO MODELO	227
6.2.4 OBTENÇÃO DA RESPOSTA DO SISTEMA EM REGIME PERMANENTE	232
6.3 SIMULAÇÃO DO MODELO E ESTUDO DA RESPOSTA COM CONTROLE	234
6.3.1 SIMULAÇÕES INICIAIS COM A REGRA DE CONTROLE PROPOSTA POR FERNEY	237
6.3.2 OBSERVAÇÃO DO SISTEMA SEM CONTROLE E SEGUNDA RODADA DE SIMULAÇÕES	248
6.3.3 SIMULAÇÕES COM UM CONTROLADOR PROPORCIONAL E COM UM CONTROLADOR PROPORCIONAL HÍBRIDO - TERCEIRA RODADA	252
6.4 DISCUSSÕES	266
<u>7. CONCLUSÃO</u>	<u>271</u>
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	278
<u>REFERÊNCIAS</u>	<u>281</u>
<u>APÊNDICE A - PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS DO ESTUDO DE CASO</u>	<u>291</u>
<u>APÊNDICE B - DETALHAMENTO DAS FUNÇÕES E ROTINAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO</u>	<u>295</u>

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos 60 anos assistiu-se a algumas mudanças no paradigma de produção. Uma destas mudanças, destacada por muitos pesquisadores, gerentes e analistas, refere-se à internacionalização das empresas e dos mercados de consumo e fornecimento. Outra transformação relevante concerne os tipos de produtos fabricados, partindo-se da ideia de padronização para um contexto em que predominam a variedade e a personalização.

No Pós-Guerra, os Estados Unidos se destacaram economicamente com o fornecimento de bens à Europa e ao Japão em reconstrução, bem como a outros mercados do mundo. O chamado sistema de produção americano desenvolveu-se neste contexto. Conforme mencionado por Sipper e Bulfin (1997), a população desgastada com a guerra e com privações estava disposta a comprar quase qualquer coisa. Como resultado disso e da ausência de competição mundial, foram criados sistemas voltados à eficiência, orientados à produção.

Com o aperfeiçoamento dos métodos de produção e de gestão, as empresas começaram a operar em outros países, atraídas por vantagens em relação a impostos e custos de mão-de-obra e insumos. Isso possibilitou que esses países tivessem acesso aos métodos de produção e gestão americanos. Além disso, muitas mudanças estavam ocorrendo no ambiente. Um dos pontos principais é que os consumidores estavam se tornando mais sofisticados e mais exigentes com relação a preço, qualidade e variedade. A competição assumiu um nível mundial e passou a envolver mercados heterogêneos. O ciclo de vida dos produtos se reduzia, surgiam novos processos de manufatura e novas tecnologias, como as máquinas comandadas por controle numérico, por exemplo. Observavam-se modificações na cultura do trabalhador e na composição dos custos de produção: os volumes gastos com bens de capital superavam os custos de mão-de-obra. Sipper e Bulfin (1997) denominam os sistemas que nascem dentro desse novo paradigma de sistemas dirigidos ao mercado.

O ponto central da gestão desses sistemas é o consumidor. Na busca da satisfação das necessidades deste consumidor, a dimensão tempo tem se destacado cada vez mais como uma fonte de vantagem competitiva. Nessa conjuntura, a flexibilidade também é um fator competitivo, ou seja, as empresas devem ter a habilidade de responder rapidamente a

mudanças nas necessidades do consumidor ou instabilidades do ambiente, com esforço e custo não muito elevados.

As atividades de gestão da produção estão diretamente ligadas ao atendimento dos pedidos dos clientes e, assim, representam uma função primordial de qualquer empresa de manufatura ou serviços. Uma gestão da produção eficaz tem uma importância estratégica não só para a sobrevivência da empresa, mas para a obtenção de vantagens competitivas que, em última análise, devem levar a um desempenho superior. No cenário destacado, com as mudanças nos paradigmas culturais, tecnológicos, de produção, consumo e suprimento, o desenvolvimento destas vantagens competitivas torna-se crucial.

Acompanhando a evolução do paradigma de produção, foram criados diversos métodos e ferramentas para o planejamento e controle da produção, para a gestão da cadeia de suprimentos e para a realização de melhorias. Na literatura, dispõe-se de muitas análises e estudos de caso que comprovam a eficácia destas metodologias e melhores práticas. Por outro lado, alguns exemplos também comprovam seu insucesso. Conforme destacam autores como Hayes et al (2008), tais metodologias e práticas não são uma panaceia para todos os males ligados à gestão da produção.

Independentemente da metodologia ou sistema adotados, a integração, tanto dos processos internos de Planejamento e Controle da Produção (PCP) quanto da área de PCP com outras áreas funcionais, aparece como uma variável importante. Além da integração de funções de negócio dentro de uma mesma planta, o paradigma atual requer a integração de plantas geograficamente dispersas ou mesmo de empresas distintas que formam a cadeia de suprimentos de um determinado produto. A integração é uma questão estrutural, não apenas pontual, e forma uma base sólida para que a empresa realize seus processos de atendimento ao cliente e implante as melhores práticas de maneira eficaz.

As transformações em curso também implicam que as empresas tenham de lidar com alto volume e diversidade de informações. Assim, gerentes e pesquisadores têm se voltado cada vez mais para melhoria da qualidade da informação disponível para o planejamento e tomada de decisões. A Qualidade da Informação (QI) tem se tornado um tópico importante da área de pesquisa em Gestão de Sistemas de Informação, conforme destacam Lee et al (2002).

A flexibilidade e o dinamismo, como dito anteriormente, também são atributos que a maioria das empresas deve apresentar. Em alguns ambientes, há uma pressão pela redução de custo e *lead time* concorrentemente ao aumento do nível de serviço. Atingir tais objetivos torna-se complexo quando se consideram as diversas perturbações que podem afetar a produção e o desempenho, tais como modificações nos padrões da demanda, quebra de

máquinas, flutuações financeiras, e outras. Assim, a incerteza é uma variável que deve ser ponderada.

Neste trabalho, considera-se que estes três fatores – integração, qualidade da informação e incerteza – podem influenciar o desempenho da empresa. Os dois primeiros fatores estão relacionados à crescente complexidade dos sistemas de produção, enquanto o último está associado à natureza intrínseca do ambiente de produção atual. A importância dessas três variáveis tem sido reconhecida em estudos conceituais e empíricos. Mais especificamente, há um conjunto de pesquisas empíricas que abordam as relações entre tais variáveis e o desempenho. Wong et al (2011) destacam que muitos desses trabalhos têm apresentado resultados, de certa forma, conflitantes. Isso se deve, segundo o autor, a fatores como a não uniformidade de abordagem conceitual das variáveis, o que inviabiliza comparações. Além disso, os diferentes trabalhos desenvolvidos exploram a integração em níveis diferentes, isto é, em níveis funcionais ou em níveis mais globais, como, por exemplo, dentro do PCP ou dentro da cadeia de suprimentos.

A partir da comparação desses estudos, observa-se que há ainda espaço a ser explorado no que tange às correlações entre essas variáveis: integração, incerteza, qualidade das informações do planejamento e desempenho. Em especial, um ponto ainda não muito explorado refere-se à influência conjunta da integração e da incerteza na estabilidade e eficácia do planejamento e controle da produção, especificamente. Nesse trabalho considera-se que esta estabilidade de planejamento pode ser avaliada por meio do nível de reprogramações, isto é, o nível de alterações nos planos de produção de curto prazo. A eficácia, por outro lado, pode ser medida pelo grau com o qual as metas dos indicadores de desempenho específicos do PCP são alcançadas. A obtenção de um planejamento e controle eficazes, por sua vez, deve contribuir para o alcance dos objetivos estratégicos de desempenho da empresa como um todo. Estas discussões estão associadas às seguintes questões que pesquisa:

Como é medido o desempenho da função de Planejamento e Controle da Produção (PCP), ou seja, quais são os indicadores de desempenho relevantes à essa função?

No âmbito da função de PCP, qual é a influência da integração, incerteza e qualidade de informação na estabilidade do planejamento, ou seja, no nível de reprogramações?

Qual é a influência das três variáveis supracitadas no cumprimento das metas definidas para os indicadores de desempenho do PCP?

Como o nível de reprogramações está relacionado ao desempenho da empresa, em termos de fatores competitivos e financeiros?

Conforme mencionado anteriormente, os padrões de consumo exigem atualmente maior variedade de produtos, além de rápida capacidade de resposta a mudanças no ambiente produtivo e a mudanças nas necessidades do cliente. Para se atender a essas demandas, os sistemas de gestão e controle devem permitir que se trabalhe com incertezas e condições dinâmicas. Não obstante, um conjunto considerável de modelos desenvolvidos para o Planejamento e Controle da Produção baseia-se em médias e condições de estado estacionário. Modelos dinâmicos de controle são necessários em ambientes nos quais há uma pressão pela redução de *lead times*, ao mesmo tempo em que há perturbações que frequentemente afetam a produção, como mudanças constantes no volume e no *mix*, e quebras de máquinas, surgimento de trabalhos urgentes, etc.

As áreas de Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle, extensamente aplicadas a sistemas mecânicos e eletrônicos, são também aplicáveis a estes ambientes dinâmicos de produção. Conforme será apresentado no capítulo 3, alguns autores propuseram sistemas de produção e estoques baseados na Teoria de Controle; outros, utilizaram ferramentas de Controle e Modelagem de Sistemas Dinâmicos para estudar a dinâmica cadeia de suprimentos. Uma terceira vertente de pesquisas aborda a aplicação dessas ferramentas a etapas do Planejamento Hierárquico da Produção, como, por exemplo, o desdobramento do programa mestre de produção em um plano de necessidades de material. Entretanto, há um conjunto ainda reduzido de trabalhos que exploram a aplicação de princípios de Controle e Modelagem de Sistemas Dinâmicos à Programação de Operações e controle da produção de curto prazo, demonstrando que existem oportunidades de desenvolvimento nessa área. Isso suscita os seguintes questionamentos:

Como desenvolver um modelo de controle da produção que seja capaz de lidar dinamicamente com reprogramações, utilizando a Teoria de Controle e a Modelagem de Sistemas Dinâmicos?

Como incorporar, nesse modelo, alguns dos elementos citados nas demais questões de pesquisa apresentadas, como indicadores do PCP, integração e incerteza?

Com o intuito de responder aos questionamentos apresentados, foram definidos, para este trabalho, os seguintes objetivos:

1. verificar, na prática, quais são as métricas de desempenho importantes para a função de Planejamento e Controle da Produção nas empresas de manufatura;
2. examinar a influência das variáveis integração, incerteza e qualidade da informação no desempenho do Planejamento e Controle da Produção (PCP), em termos de nível de reprogramações;

3. observar como esse nível de reprogramações está relacionado ao desempenho da empresa em termos de fatores competitivos e financeiros;
4. desenvolver um modelo dinâmico para controle da produção que seja capaz de executar reprogramações e ajustes, automaticamente, em resposta a incertezas e modificações nas condições de produção;
5. incorporar, nesse modelo, variáveis relevantes à função de Planejamento e Controle da Produção e alinhá-lo às principais métricas de desempenho dessa função.

O primeiro objetivo apresentado concerne à investigação das métricas de desempenho mais comumente cobradas da função de PCP em empresas de manufatura. Além disso, busca-se analisar como o nível e os mecanismos de integração presentes nas empresas impactam a estabilidade de seu planejamento da produção e a forma como elas respondem às mudanças do ambiente. Nesta análise, considera-se também a incerteza em seus diversos tipos e a qualidade da informação como variáveis influentes. Entende-se que a estabilidade do planejamento esteja diretamente ligada ao nível de reprogramações das atividades. Como um terceiro objetivo, busca-se então observar se existe relação entre esse nível de reprogramações e algumas das dimensões competitivas da Produção, como custo, qualidade, velocidade, confiabilidade e flexibilidade. Além disso, deseja-se avaliar uma possível relação entre essa estabilidade do planejamento e o desempenho geral da empresa, em termos financeiros.

Buscar-se-á alcançar os três primeiros objetivos citados por meio de um estudo de múltiplos casos a ser conduzido em empresas de manufatura do estado de São Paulo. A partir da revisão de pesquisas empíricas realizadas sobre o tema exposto, observou-se que nenhuma delas aborda conjuntamente as três variáveis – integração, incerteza e qualidade da informação – e sua relação com desempenho, no âmbito do Planejamento e Controle da Produção. Assim, a pesquisa deverá ter um cunho exploratório e descritivo. A metodologia de estudo de caso foi escolhida ao invés de uma pesquisa do tipo *survey* por permitir captar melhor as diferentes nuances de comportamento das variáveis observadas em contextos distintos. Os principais envolvidos nos estudos de caso foram os funcionários da área de PCP de diferentes níveis gerenciais, como líderes, supervisores e gerentes. Além da avaliação individual dos casos, pretende-se realizar uma análise comparativa, visando identificar pontos comuns e divergentes entre eles. Mais detalhes sobre o planejamento dos casos são apresentados no capítulo 4 - Metodologia de Pesquisa.

Os dois últimos objetivos apresentados tratam do desenvolvimento de um modelo matemático que seja capaz de responder a incertezas e condições dinâmicas de produção. A

Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle serviram de embasamento para o desenvolvimento do modelo. Quando se trata do desenvolvimento desses modelos para aplicações práticas, deve-se ressaltar a importância da aderência e alinhamento desses modelos às principais condições reais presentes no contexto da aplicação. Morabito e Pureza (2010) destacam a existência histórica desse hiato entre teoria e prática na área de Pesquisa Operacional. Para que essa distância seja minimizada, os modelos matemáticos para controle e planejamento de curto prazo da produção devem estar alinhados à praxis do PCP, ou seja, devem considerar as principais variáveis e métricas relativas a essa função de negócio. Estas variáveis e métricas relevantes para o PCP deverão ser obtidas como resultado das observações empíricas realizadas para se atingir os objetivos 1, 2 e 3. Assim, observa-se que os objetivos desse trabalho são interdependentes e integrados entre si. Para desenvolvimento do modelo dinâmico e atribuição de seus parâmetros, também serão utilizados dados reais de um sistema de produção de embalagens pertencente a uma empresa de manufatura.

Na Figura 1.1 a seguir, os objetivos do trabalho são apresentados de forma gráfica.

Figura 1.1 - Representação esquemática dos objetivos do trabalho.

1.1 Justificativa e contribuições

As principais motivações e justificativas desse trabalho estão associadas ao contexto apresentado no início do capítulo. O planejamento e controle da produção é uma função vital, uma vez que o objetivo principal das empresas é a entrega de bens e serviços aos clientes, com nível de serviço e custo adequados. Por outro lado, observa-se ainda a existência de questões não respondidas no âmbito dessa função. Como mencionado, há vários estudos conceituais e empíricos enfatizando a importância da integração, especialmente no nível de cadeia de suprimentos, e relacionando-a a diferentes aspectos do desempenho das empresas. Entretanto, há ainda poucos estudos observando como se dá a prática da integração, no contexto do PCP em especial, e como essa integração pode ser considerada em conjunto às incertezas do ambiente e à crescente complexidade dos sistemas produtivos.

Dispõe-se também de ampla variedade de modelos de programação de operações (*Scheduling*) voltados à otimização de métricas específicas de desempenho dos programas gerados, como o *makespan*, o atraso médio das tarefas, a utilização das máquinas, etc. Por outro lado, De Snoo, Wezel e Jorna (2011) destacam que este conjunto de métricas avalia os resultados, o produto do processo de programação, mas não o processo em si, as atividades que o compõe e as pessoas envolvidas. O processo está muito mais relacionado a aspectos organizacionais e comportamentais, os quais, segundo os autores mencionados, não podem ser mitigados com modelos avançados e *software* que focam somente na obtenção de programações ótimas. Assim, este trabalho busca contribuir para essa segunda vertente de pesquisas, menos explorada, por meio da investigação de alguns aspectos organizacionais, internos e ambientais que influenciam na programação e reprogramação de operações.

A maioria dos modelos dedicados à análise de sistemas de produção e estoques baseia em médias ou condições de estado estacionário (ORTEGA; LIN, 2004). Por outro lado, autores como Ferney (2000), Wiendahl e Berithaupt (2000) e Li et al. (2011) têm recentemente enfatizado a importância do desenvolvimento de modelos dinâmicos, capazes de responder de forma autônoma às mudanças na demanda do consumidor, às instabilidades do ambiente, às incertezas internas do próprio sistema de produção e aos avanços tecnológicos. Wiendahl (1995) destaca que um requisito básico para os “novos” sistemas de programação e controle de operações deve ser a capacidade de modelar um sistema de manufatura como um processo estocástico. Além disso, o autor supracitado ainda ressalta a necessidade da existência de um laço de controle, para que se possa verificar a qualidade da execução e

realimentar o sistema. Entretanto, as pesquisas nessa área de modelos estocásticos com laço de controle ainda são incipientes se comparadas às pesquisas na área tradicional de otimização da Programação de Operações. Assim, busca-se, de alguma forma, diminuir essa lacuna.

Considerando as justificativas e objetivos apresentados, este trabalho busca contribuir para a ampliação do conhecimento existente das seguintes formas:

- realizando um estudo de casos múltiplos para observar, simultaneamente, as quatro variáveis – integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho – e suas inter-relações no âmbito do Planejamento e Controle da Produção;
- estendendo as aplicações das áreas de Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle na Engenharia de Produção e, em especial, na área de Planejamento e Controle da Produção;
- alinhando um modelo matemático de controle da produção às variáveis e métricas observadas qualitativamente nos estudos de caso.

O presente trabalho está organizado segundo a estrutura descrita a seguir.

No capítulo 2 apresentam-se as diversas definições dos constructos de integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho constantes na literatura. Ainda neste capítulo realiza-se um mapeamento das relações entre esses constructos que foram testadas por meio de pesquisas empíricas. Em seguida, apresenta-se uma revisão cronológica dos modelos de controle da produção baseados na Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle, no capítulo 3. Alguns modelos considerados relevantes para esse trabalho são analisados com maior detalhamento. A metodologia de pesquisa é discutida no capítulo 4. No capítulo 5, aborda-se a execução e os resultados do estudo de casos múltiplos. O desenvolvimento do modelo dinâmico para controle da produção, bem como os resultados das simulações realizadas, são discutidos no capítulo 6. Por fim, encerra-se o trabalho com o capítulo 7, que traz as principais conclusões da pesquisa qualitativa e da modelagem realizadas.

Capítulo 2

Integração, incerteza, qualidade da informação e sua relação com o desempenho

Como se sabe, o surgimento do conceito de intercambiabilidade de componentes industriais no século XVIII desencadeou uma ruptura significativa no modo de produção. No sistema anteriormente vigente, a figura central do artesão era responsável por todas as etapas de produção, desde a concepção até a entrega do produto. A intercambiabilidade dos componentes deu espaço à especialização e divisão do trabalho. A partir daí, o processo total de produção e entrega passou a ser, por natureza, fragmentado. Tal característica foi sendo intensificada com a crescente complexidade dos sistemas de produção e, em alguns casos, com o crescimento das empresas, em termos de tamanho e número de pessoas envolvidas. Assim, surge a necessidade de se reintegrar sistemas, pessoas e processos.

Conforme mencionado no capítulo 1, a incerteza também é um elemento presente no contexto produtivo atual devido a fatores como mudanças socioeconômicas, culturais e de consumo, alta concorrência, mercados globais de consumo e fornecimento, entre outros. Além disso, tais incertezas ambientais, aliadas ao alto volume de informações que permeiam os sistemas de produção, fazem com que a qualidade da informação circulante seja um fator crítico ao funcionamento eficaz desses sistemas. Além de destacarem conceitualmente a importância desses fatores, vários pesquisadores têm realizado pesquisas empíricas com o intuito de comprovar a influência dos mesmos no desempenho das empresas.

Assim, este capítulo é dedicado a uma revisão bibliográfica dos estudos empíricos que tratam das relações entre integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho. Antes de se buscar traçar este conjunto de relações, são apresentadas as definições de diversos autores dadas a cada um dos constructos considerados. Ao invés de uma revisão extensa, busca-se discutir estudos significativos para a área com certo nível de detalhe, demonstrando como os resultados de tais estudos se complementam ou se contrapõem. O escopo da revisão engloba trabalhos de aproximadamente uma década atrás até o momento atual, publicados principalmente em periódicos internacionais. Referências anteriores também foram incluídas visando-se retomar algumas definições clássicas sobre os conceitos abordados.

Ao final do capítulo, apresenta-se um diagrama conceitual elaborado com base na análise da revisão, que busca representar: 1) as várias relações entre os fatores mencionados que já foram verificadas nos trabalhos empíricos existentes; 2) o âmbito da análise realizada nestes trabalhos; 3) as teorias fundamentais que dão embasamento às hipóteses formuladas. Além disso, estes três aspectos são utilizados como critérios de classificação dos trabalhos revisados.

2.1 Definições dos constructos abordados

Integração, qualidade da informação, incerteza e desempenho são definidos como constructos multidimensionais por vários autores. Algumas dessas definições são apresentadas nos próximos subitens, com o intuito de permitir a comparação entre os resultados dos diversos estudos empíricos existentes sobre estes tópicos. Apesar de similares, observam-se variações de autor para autor, demonstrando certa heterogeneidade no entendimento de tais conceitos.

2.1.1 Integração

O conceito de integração está associado a termos como colaboração, cooperação, coordenação, comunicação, troca de informações, acordo mútuo, decisões compartilhadas, etc. O’Leary-Kelly e Flores (2002) definem o nível de integração como a extensão com a qual duas partes distintas trabalham juntas de maneira cooperativa para chegar a resultados mutuamente aceitáveis.

A integração pode ser analisada sob várias dimensões. Segundo Pagell (2004), tal constructo tem sido utilizado para estudar diversos fenômenos organizacionais, sendo definido de maneiras diferentes, ainda que inter-relacionadas entre si. Alguns autores realizam pesquisas com essa temática sem estabelecer uma definição formal para este conceito. O resultado é um constructo que não possui uma definição única e de aceitação generalizada (PAGELL, 2004). Uma primeira divisão do conceito de integração refere-se às dimensões interna e externa. A integração externa é aquela que ocorre entre as empresas ou

organizações, enquanto a interna associa-se à interação entre várias partes ou áreas funcionais de uma única organização. Estas definições são adotadas por vários autores como Pagell (2004), Gustavsson (2008), Flynn, Huo e Zhao (2010), Bagchi e Skjoett-Larsen (2002), entre outros. Os relacionamentos na cadeia de suprimentos estão diretamente ligados ao conceito de integração externa. Na realidade, Flynn, Huo e Zhao (2010) e Wong, Boon-itt e Wong (2011) consideram 3 tipos de Integração na Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Integration, SCI*): a integração com fornecedores, a integração com clientes e também a integração interna, sendo que esta última funciona como um suporte para a SCI.

As dimensões de integração com fornecedores e com clientes também estão presentes no trabalho de Droge, Jayaram e Vickery (2004). Nesse trabalho, a análise é realizada no âmbito do desenvolvimento de produto. Assim, a integração externa é denominada integração estratégica de projeto, e representa um conjunto de práticas que engloba: (1) parecerias com fornecedores; (2) desenvolvimento de fornecedores, e (3) relações com clientes mais próximos. De acordo com os autores, este conjunto de práticas gera uma rede sinérgica que facilita as atividades de desenvolvimento de produto.

A integração interna pode ser definida como o sistema estratégico de cruzamento de funções e responsabilidade coletiva entre funções de uma organização (FOLLETT¹, 1993 apud WONG; BOON-ITT; WONG, 2011). Segundo Kahn e McDonough (1997) e Kahn e Mentzer (1998), o cerne do conceito de integração está associado a dois componentes: interação e colaboração. O' Leary-Kelly e Flores (2002) elaboram uma definição que considera estes dois componentes, acrescentando a questão dos resultados mutuamente aceitáveis. Para eles, a integração se refere à extensão com a qual partes separadas trabalham juntas de maneira cooperativa para chegar a resultados mutuamente aceitáveis. Pagell (2004) apresenta um estudo sobre a integração entre três funções internas de uma planta: manufatura, compras e logística. Dessa forma, o autor adota a definição de O' Leary-Kelly e Flores (2002), adaptando-a para o contexto mais específico de sua pesquisa. Uma revisão mais ampla dos usos do constructo integração na literatura também pode ser encontrada no trabalho de Pagell (2004).

Deve-se notar que a integração interna pode ser analisada em vários níveis. Gustavsson (2008), por exemplo, estuda a integração no âmbito da função de Planejamento e Controle da Produção, definindo integração interna como a interface que apoia a troca de

¹ FOLLETT, M.P. **Freedom and Coordination**: Lectures in Business Organization. Garland Publishing: New York, 1987(originally published in 1949).

informações de planejamento entre dois ou mais processos de PCP. Droge, Jayaram e Vickery (2004) analisam tal integração no contexto do desenvolvimento de produto, definindo-a como um conjunto de práticas focado na expansão das fronteiras internas entre engenharia (projeto) e manufatura. Essa integração do processo de desenvolvimento de produto, por sua vez, é subdividida em: (1) engenharia simultânea, (2) projeto para manufatura, (3) padronização, e (4) projeto e manufatura apoiados por computador (CAD/CAM). Estas dimensões da integração são bem específicas do contexto em que o autor citado analisa a integração.

Pagell (2004) apresenta ainda outra categorização para a integração interna. Com base na literatura, ele assinala que a integração tem sido examinada em três níveis de análise: o nível estratégico, o nível inter-funcional e o nível intra-funcional. Nessa classificação, pode-se posicionar os trabalhos de Droge, Jayaram e Vickery (2004) e Gustavsson (2008) no nível intra-funcional. No nível estratégico, o chamado alinhamento estratégico tem sido associado já há algum tempo a vantagens competitivas. Segundo o modelo de Hayes e Wheelright (1984) e Hayes et al (2008), para que a empresa seja competitiva, as estratégias dos níveis funcionais devem formar um todo coeso e devem ser internamente consistentes, de forma a apoiar a estratégia de negócios. Segundo Pagell (2004), além desta linha que aborda a integração estratégica, há um crescente corpo de pesquisa examinando a integração entre funções. A análise é geralmente feita em pares, ou seja, foca-se na integração de duas ou mais funções de negócio. Algumas das relações já exploradas envolvem as seguintes funções: desenvolvimento de produto (P&D) e manufatura, *Marketing* e manufatura, compras e manufatura, estratégia de RH e estratégia de manufatura, entre outros. Para referências desses trabalhos pode-se consultar Pagell (2004).

Além dos aspectos interno e externo, uma segunda grande dimensão da integração relaciona-se ao seu aspecto técnico ou organizacional (GUSTAVSSON, 2008; LEMAHIEU et al, 2005). A integração técnica é relativa à tecnologia de informação e comunicação, ou seja, os meios tecnológicos que permitem a comunicação, como, por exemplo, internet, EDI, fax e telefone. Quanto ao aspecto organizacional, a integração é definida de diferentes formas entre os autores. Lemahieu et al (2005) discutem de forma minuciosa o conceito de empresa estendida, a qual consiste num conjunto de firmas que buscam estabelecer relações de troca repetidas e duradouras entre si. Esta forma de integração organizacional é intermediária em relação a dois pólos opostos: um pólo que representa as relações puramente de mercado entre as empresas e outro pólo que representa a firma altamente centralizada.

Com base no trabalho de vários outros autores, Lemahieu et al (2005) destacam ainda que estas empresas estendidas ou redes de empresas possuem uma característica importante:

uma orientação ética e de valores entre os parceiros baseada na reciprocidade. Assim, predominam os valores de interdependência e altruísmo, e a presença ou ausência desta ética é que determina a diferença entre colaboração e cooperação. Segundo Bowersox, Closs e Stank (2003), a colaboração é mais do que cooperação e requer, dessa forma, maior esforço, desenvolvimento de habilidades, quebra de paradigmas e mesmo remodelagem da estrutura organizacional. A partir desses conceitos, Lemahieu et al (2005) definem dois tipos de empresas estendidas: as colaborativas e as cooperativas.

Deve-se observar que, nos trabalhos discutidos, trata-se da integração organizacional externa, ou seja, entre empresas. Seguindo esta mesma linha de raciocínio, é possível utilizar os mesmos conceitos de colaboração e reciprocidade para definir a integração organizacional dentro da empresa. Assim, neste trabalho, a integração organizacional é associada à colaboração e à reciprocidade nas relações entre os departamentos e funções da empresa. Isto, por sua vez, está relacionado às práticas e mecanismos colaborativos ligados à cultura da empresa que levam ao compartilhamento de decisões e entendimento comum dos objetivos.

Um resumo das várias dimensões da integração é apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Dimensões da integração, agrupadas a partir das definições de diferentes autores. Fonte: próprio autor.

2.1.1.1 O Planejamento de Vendas e Operações como mecanismo de integração

O estudo de caso a ser desenvolvido nesse trabalho situa-se no âmbito da função de Planejamento e Controle da Produção nas empresas. Nesse âmbito, o Planejamento de Vendas e Operações (*Sales & Operations Planning* - S&OP) é destacado na literatura como um relevante mecanismo de integração entre as funções de *Marketing* e PCP, bem como um

mecanismo de alinhamento estratégico entre as estratégias funcionais e entre estas e a estratégia de negócio. Assim, uma breve revisão de literatura sobre este tópico será apresentada na sequência.

O Planejamento de Vendas e Operações é um processo de negócio bastante difundido no meio gerencial e acadêmico, por meio do qual as empresas buscam conciliar a demanda externa por produtos e o seu suprimento. Este planejamento, em geral, é realizado no nível agregado, ou seja, para famílias de produtos, e cobre um horizonte de médio prazo, que pode variar de 1 a 18 meses. O S&OP possibilita a criação de um plano consensual entre as áreas funcionais da empresa buscando atender às previsões de demanda. As principais áreas envolvidas são a Produção, o PCP, o setor financeiro e as áreas de Vendas e *Marketing*. Na literatura, destaca-se que a importância deste plano como elemento de ligação entre a estratégia da empresa e suas atividades operacionais. Mais do que isso, deve-se ressaltar que este planejamento, quando bem realizado, consiste em um importante mecanismo de integração interna nas empresas, conforme já mencionado.

Grimson e Pyke (2005), com base nos estudos de Lapide (2004, 2005a e 2005b) realizaram um estudo exploratório para investigar o grau de maturidade do processo de Planejamento de Vendas e Operações em diferentes empresas. Com base em entrevistas realizadas em empresas de manufatura, os autores definem dimensões e parâmetros relevantes para avaliar essa maturidade e, como resultado final, apresentam um modelo de 5 estágios de evolução, ou seja, 5 estágios de maturidade. As dimensões consideradas na avaliação dessa integração são: reuniões e colaboração, organização, métricas, tecnologia de informação e integração dos planos de vendas e operações.

A primeira dimensão refere-se basicamente à frequência de realização das reuniões de planejamento de vendas e operações, bem como às pessoas e funções envolvidas. A segunda dimensão foca na estrutura corporativa de S&OP. Segundo essa perspectiva, verifica-se a presença ou ausência de um grupo funcional formal responsável pelo planejamento. Além disso, examina-se se a estrutura organizacional da empresa dá suporte a esse processo. Como terceira dimensão, observa-se se as empresas realizam a medição dos resultados e da efetividade do processo de S&OP. Grimson e Pyke (2005) consideram essas três dimensões como sendo essencialmente relativas a processos de negócio. A tecnologia de informação e a integração dos planos de vendas e operações são classificadas como processos de informação. Os autores citados definem que a “integração dos Planos de Vendas e Operações” mede o quão efetivamente a empresa constroi seus planos de vendas e seus planos de produção, e

quão boa é a interface entre esses planos. Esta integração é o objetivo final que deve ser atingido por meio das outras 4 dimensões citadas.

No estudo realizado, foram buscadas correlações entre o tamanho da empresa e o estágio de maturidade em que se encontra, bem como entre o estágio de maturidade e o tipo de processo de produção, ou seja, *flow shop*, *job shop*, etc. Não foram encontradas relações significativas entre essas variáveis. Grimson e Pyke (2005), entretanto, destacam que os processos de negócio, em geral, precedem a integração dos planos de vendas e operações. Mais ainda, os autores sugerem que estas três dimensões citadas funcionam como mecanismos de integração do S&OP, ou seja, possibilitam essa integração. Por outro lado, de acordo com os resultados, a tecnologia de informação desenvolve-se simultaneamente à integração dos planos. Os autores citados concluem que os estágios mais baixos de maturidade não requerem a presença de soluções de TI avançadas. É mais relevante, nesse caso, ter os processos de negócio adequados. Os autores reconhecem, entretanto, que os resultados obtidos fornecem apenas indícios dessas relações, mas não dão embasamento completo para provar relações de causalidade. Dessa forma, observa-se novamente a existência de oportunidades de aprofundamento das pesquisas no tema.

Estabelecendo um paralelo com as definições de integração interna, técnica e organizacional apresentadas, pode-se afirmar que, para Grimson e Pyke (2005), a integração organizacional, ou seja, a integração dos processos de negócio, se mostrou ser mais relevante do que a integração técnica na obtenção de planos de vendas e operações mais efetivos. Assim, para obter melhorias nesses planos, os gerentes devem buscar criar uma organização que facilita a integração, e isto não depende do porte da empresa nem de investimentos financeiros vultuosos.

2.1.2 Incerteza

O paradigma atual de produção exige velocidade e flexibilidade, ou seja, a capacidade de responder a mudanças nas necessidades do consumidor com tempo e custo não muito elevados. Nesse contexto, é mister considerar as características dinâmicas que afetam a gestão da produção, ou seja, as incertezas. Mudanças constantes na demanda, que por sua vez acarretam mudanças no volume e no *mix*, quebras de máquinas, surgimento de trabalhos urgentes, etc., são perturbações que frequentemente permeiam a gestão da produção.

A incerteza é uma das variáveis consideradas dentro da Teoria da Contingência, conforme mostram Sousa e Voss (2008) e Anand e Ward (2004), entre outros. Segundo esta escola do pensamento administrativo, as organizações adaptam suas estruturas para manterem-se ajustadas ao ambiente, ou seja, ajustadas a fatores dinâmicos do contexto no qual estão inseridas, conseguindo obter, dessa forma, melhor desempenho. Segundo Duncan (1972), a incerteza pode ser definida como a dificuldade de se prever com acurácia os resultados das decisões e a inability de atribuir probabilidades a eventos futuros.

Nas pesquisas empíricas realizadas, aparecem diferentes classificações ou subdivisões do conceito de incerteza. Ho (1989) e Mula et al (2006) classificam as diversas perturbações que afetam os sistemas de produção em dois grupos: incerteza ambiental e incerteza do sistema. O primeiro grupo inclui incertezas que estão além do processo de produção, como a incerteza na demanda externa e a incerteza no fornecimento externo. O segundo grupo, ao contrário, é relativo às incertezas presentes dentro do sistema de produção, como a incerteza de volume final produzido, de *lead times* de produção, de qualidade, de falhas em partes do sistema, etc. Snoo, Wezel e Jorna (2011) e Field et al (2005) consideram, além da incerteza ambiental, a incerteza executacional. Tal conceito é mais específico da área de planejamento e controle da produção, e refere-se à incerteza na execução do plano ou programa que impede que tal programa seja executado exatamente conforme o pretendido. Exemplos deste tipo de incerteza seriam interrupções de produção, falta de matéria-prima, absenteísmo, etc. Pode-se observar que os conceitos de incerteza de sistema ou executacional são semelhantes; os autores somente empregam terminologias distintas.

Vokurka e O’Leary-Kelly (2000) analisam o conceito de incerteza de forma um pouco diferente. O ambiente no qual as empresas competem pode ser classificado de acordo com três fatores gerais: objetos, atributos do ambiente e incerteza percebida (BURGEOIS, 1980 apud Vokurka e O’Leary-Kelly, 2000). O primeiro fator refere-se aos diferentes aspectos do ambiente de uma empresa, como os padrões de demanda do consumidor, a confiabilidade dos fornecedores ou a duração do ciclo de vida de produtos. Vê-se novamente a semelhança entre este fator e a definição de incerteza ambiental adotada por outros autores. O segundo fator, atributos, subdivide-se em três dimensões gerais: complexidade, munificência e dinamismo (Dess e Beard, 1984 apud Vokurka e O’Leary-Kelly, 2000). A dimensão complexidade relaciona-se à quantidade e diversidade de fatores externos que a empresa enfrenta em seu ambiente, enquanto a munificência está relacionada à disponibilidade de recursos no ambiente, representando uma medida de quanto tal ambiente pode apoiar o crescimento das empresas nele inseridas. A terceira dimensão ligada a atributos, o dinamismo, representa o

grau de instabilidade ou a natureza turbulenta do mercado no qual a empresa compete. O terceiro fator geral desta classificação, a incerteza percebida, refere-se à habilidade ou inabilidade dos gerentes de prever eventos futuros do ambiente com acurácia. As diferentes classificações para o conceito de incerteza são mostradas na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Dimensões do conceito de incerteza, agrupadas a partir das definições de diferentes autores. Fonte: próprio autor.

A literatura que aborda a incerteza na gestão da produção é bastante vasta. Mula et al (2006) realizam uma revisão abrangente dos modelos de planejamento da produção já desenvolvidos para lidar com diversos tipos de incertezas. Os modelos analisados são divididos em quatro tipos: modelos conceituais, como aqueles que utilizam estoques ou *lead times* de segurança; modelos analíticos, como os que utilizam programação matemática; modelos baseados em inteligência artificial; e modelos baseados em simulação e heurísticas. Além disso, os modelos também são classificados segundo a função ou área do PCP que abordam, como, por exemplo, planejamento agregado, MRP ou planejamento de capacidade, entre outras. Segundo os autores citados, espera-se que modelos de planejamento da produção que não consideram a incerteza gerem decisões de planejamento inferiores quando comparados aos modelos que a incluem explicitamente como uma variável.

A incerteza também está presente em pesquisas empíricas de cunho correlacional, seja sob a forma de variável independente, seja como variável moderadora da relação entre duas outras variáveis distintas, como em Wong, Boon-itt e Wong (2011). Algumas destas relações entre esta variável e as demais apresentadas serão discutidas mais adiante.

2.1.3 Qualidade da informação (IQ) e teoria do processamento da informação

Empresas que produzem e comercializam alta diversidade de produtos e que possuem mercados globais de consumo e fornecimento geralmente tem que processar alto volume e alta diversidade de informações. Assim, cada vez mais a Qualidade da Informação (*Information Quality* - IQ) tem sido alvo de atenção de organizações e pesquisadores da área de Gestão dos Sistemas de Informação (*Management of Information Systems* – MIS). As dimensões utilizadas pelos diferentes pesquisadores para representar a qualidade da informação variam. Em revisões de literatura, foram identificadas até 23 dimensões distintas. Lee et al (2002) apresentam um quadro-resumo com alguns dos principais trabalhos na área, juntamente com as respectivas dimensões da qualidade da informação abordadas. Com base neste quadro, pode-se observar que algumas dimensões comumente consideradas por vários pesquisadores são: acurácia, consistência, completude, pontualidade, inteligibilidade e acessibilidade. Os autores mencionados investigaram a visão tanto dos acadêmicos quanto dos envolvidos com a informação nas empresas.

Wang e Strong (1996) definem empiricamente um conjunto mais amplo de dimensões para representar a Qualidade da Informação, com base na relevância dessas dimensões para os consumidores da informação. Os autores classificam tais dimensões em 4 categorias: intrínseca, contextual, representacional e acessível. Na Figura 2.3 são apresentadas estas 4 categorias, bem como as dimensões associadas a elas.

A primeira categoria está associada à acurácia, credibilidade, reputação e objetividade da informação, ou seja, características que conferem qualidade à informação diretamente, de forma independente do contexto ou de outros fatores. A segunda categoria, ao contrário, considera aqueles requisitos para a qualidade da informação que devem ser analisados dentro do contexto da utilização, e inclui a relevância, a completude, a pontualidade e a quantidade. As duas últimas categorias referem-se às questões de representação e acesso, estando relacionadas aos sistemas computacionais que armazenam e proveem acesso à informação. Desse modo, o sistema deve apresentar uma informação que seja fácil de interpretar, entender e manipular, e que seja representada de forma concisa e consistente. Além disso, o sistema deve ser acessível, porém seguro.

Figura 2.3 – Classificação da Qualidade da Informação de acordo com Wang e Strong (1996).

A qualidade de informação é um aspecto essencial para qualquer planejamento. As informações de planejamento são trocadas nas interfaces da organização, internamente, entre os processos de Planejamento e Controle da Produção, por exemplo, ou externamente, entre empresas. Segundo Gustavsson (2008), quando os processos são inadequados, surgem deficiências de informação nas interfaces. Tais deficiências podem ser analisadas com base no conceito de qualidade da informação. Com base em pesquisas anteriores nessa área, o autor avalia a qualidade da informação com base em 10 dimensões, a saber: completude, concisão, confiabilidade, pontualidade, validade, acessibilidade, quantidade, credibilidade, relevância e facilidade de entendimento. Tal análise é feita no nível das atividades de planejamento e controle da produção. Algumas dessas dimensões estão associadas ao sistema de planejamento em si, o qual inclui regras, políticas e *software*, enquanto outras estão mais relacionadas aos usuários da informação e às suas percepções. De forma similar, Forslund e

Jonsson (2007) examinaram especificamente a questão da Qualidade da Informação no contexto do planejamento da Cadeia de Suprimentos, porém, considerando somente quatro dimensões: pontualidade, acurácia, conveniência de acesso e confiabilidade.

A Teoria do Processamento da Informação (*Information Processing Theory*, IPT), por sua vez, pode ser utilizada para embasar o estudo da relação entre os constructos Qualidade da Informação e incerteza. Segundo esta teoria, as organizações devem desenvolver mecanismos de processamento de informação capazes de lidar com fontes internas e externas de incerteza (TUSHMAN; NADLER², 1978 apud SNOO; WEZEL; JORNA, 2011). Assim, é necessário que a organização melhore sua capacidade de processamento de informação quando submetida a altas incertezas (GALBRAITH³, 1973 apud WONG; BOON-ITT; WONG, 2011).

O objetivo final de toda a organização que desenvolve mecanismos de integração, que aplica técnicas de processamento da informação ou tenta reduzir incertezas é obviamente a melhoria de seu desempenho. Antes de se entender as relações entre esses elementos e o desempenho da empresa, serão analisadas a seguir as diferentes perspectivas adotadas para a caracterização do desempenho.

2.1.4 Desempenho

Para alguns autores da área de Estratégia da Produção, uma etapa da elaboração da estratégia consiste na identificação dos objetivos de desempenho da produção, ou seja, dos aspectos de desempenho que satisfazem os requisitos do mercado no qual a empresa atua. Segundo Slack e Lewis (2009), não há um consenso sobre a terminologia empregada para se referir a estes objetivos. Eles podem ser denominados “‘critérios de desempenho’, ‘dimensões estratégicas’ de operações, ‘dimensões de desempenho’, ‘prioridades competitivas’, ‘prioridades estratégicas’” (SLACK; LEWIS, 2009, p.39). Embora existam algumas diferenças entre os autores sobre quais são exatamente estas dimensões, há algumas categorias comumente usadas (SLACK; LEWIS, 2001). Hayes e Wheelwright (1984), Slack e Lewis (2001) e Hayes et al (2005) definem tais objetivos de desempenho como sendo custo,

² TUSHMAN, M.L., NADLER, D.A. Information processing as an integrating concept in organizational design. *Academy of Management Review*, v. 3, n. 3, p. 613–624, 1978.

³ GALBRAITH, J. R. *Designing Complex Organizations*. Addison-Wesley: Reading, MA, 1973.

qualidade, confiabilidade, velocidade e flexibilidade. Tais dimensões constituem-se elementos de diferenciação competitiva das empresas (HAYES et al, 2005). De forma similar, Schmenner e Swink (1998) destacam quatro elementos na composição do desempenho operacional: entrega, custo de produção, qualidade do produto e flexibilidade de produção. Vickery et al (1997) definem o fator de desempenho “entrega” como consistindo de flexibilidade de volume, velocidade e confiabilidade na entrega. Os autores supracitados analisam a relação entre essas dimensões de desempenho e o crescimento financeiro, medido por métricas como o Retorno sobre o Investimento (*Return on Investment*, ROI). Os cinco objetivos de desempenho mencionados inicialmente serão discutidos nos próximos parágrafos.

Em um sentido amplo, a qualidade pode ter diferentes significados dentro de cada negócio. Segundo Slack e Lewis (2001), esta ideia inclui dois conceitos: um relacionado ao nível das especificações de produtos e serviços, definidas em projeto; outro, à habilidade de consistentemente produzir mercadorias em conformidade com as especificações. Assim, este conceito pode estar relacionado tanto à qualidade externa, percebida pelo consumidor, quanto à qualidade interna das operações.

No contexto da estratégia da produção, o custo pode ser definido, de forma simplificada, como “qualquer entrada financeira para a operação que lhe permite produzir seus produtos e serviços” (SLACK; LEWIS, 2001, p. 70). Tais entradas financeiras podem ser divididas em três categorias: gastos operacionais, gastos de capital (instalações) e capital de giro. A redução de custos é sempre um objetivo atrativo, independentemente se a empresa compete a partir da liderança em custos ou da diferenciação, duas das tradicionais estratégias genéricas definidas por Porter (1980). No primeiro caso, a redução de custos é o foco fundamental; no segundo, contribui para a ampliação das margens de lucro do produto.

Velocidade é outro parâmetro importante para se avaliar o desempenho da produção. Nesse contexto, ela representa o tempo decorrido entre o início de um processo e seu término. Uma resposta rápida ao consumidor implica rapidez na tomada de decisão, no fluxo das informações internas e na movimentação de materiais. Esta dimensão está diretamente ligada ao encurtamento dos *lead times* das operações. Vollmann (2005) destaca que a velocidade de processamento reduz estoques em processo e reduz riscos, pois as decisões e ações são menos dependentes de previsões de longo prazo e mais baseadas em pedidos e informações atuais.

A confiabilidade implica produtos entregues no prazo prometido e clientes informados sobre as datas de entrega (SLACK; LEWIS, 2001). Esta dimensão também está relacionada à capacidade da empresa de mobilizar recursos para assegurar que qualquer falha seja corrigida

rapidamente. Internamente, a confiabilidade está associada à entrega pontual de materiais e informações entre as operações do sistema produtivo e, sendo assim, representa um aspecto essencial uma vez que garante estabilidade e previsibilidade às operações. Como se pode observar, a confiabilidade está ligada à velocidade. As empresas podem tentar compensar uma baixa confiabilidade com a promessa de longos prazos de entrega; entretanto, a ineficácia desta estratégia é clara. Os tempos das operações tendem a inflar para preencher todo o tempo disponível, gerando um círculo vicioso denominado por Suri (1998) de efeito espiral do tempo. “Longos tempos de entrega frequentemente são resultado de uma resposta interna vagarosa, muito material em processo e pouco valor agregado” (SLACK; LEWIS, 2009, p. 68).

Uma definição de flexibilidade adotada por alguns autores como Mascarenhas, 1981, Utpon 1995, e Vokurka e O’Leary-Kelly, 2000 refere-se à habilidade de se responder rapidamente às necessidades dos clientes, bem como aos eventos imprevisíveis advindos de pressões competitivas ou instabilidade ambiental. Entretanto, o conceito de flexibilidade não é único e pode representar, na realidade, uma classe geral de variáveis. Vokurka e O’Leary-Kelly (2008), com base na revisão de diversos trabalhos sobre o tema, apresentam quinze diferentes dimensões para este conceito. Algumas das dimensões comumente abordadas são a flexibilidade de introdução de novos produtos, a flexibilidade de *mix* e de volume de produção e a flexibilidade de entrega (HAYES; WHEELRIGHT, 1984; SLACK; LEWIS, 2001; OKE, 2005).

Os cinco objetivos de desempenho discutidos influenciam-se mutuamente. Slack e Lewis (2001) destacam que a melhoria dos objetivos de desempenho qualidade, velocidade, confiabilidade e flexibilidade leva à redução de custo. Por exemplo, quanto maior a confiabilidade interna das operações, maior é a qualidade e menor o custo, pois menos tempo e recursos são desperdiçados com reprogramações e correções. Por outro lado, deve-se destacar um lado não considerado pelo autor citado: para se obter alta confiabilidade, faz-se geralmente necessário investir mais em melhorias de processos, em sistemas de planejamento e coordenação e em capacidade extra, admitindo-se, por exemplo, níveis mais baixos de utilização. Isso frequentemente gera resistência por parte de gerentes, conforme destaca Suri (1998). Tais investimentos se justificam quando o objetivo de desempenho em questão é crítico para o mercado, e, por conseguinte, quando o aumento potencial dos negócios e dos retornos supera os gastos.

Os objetivos de desempenho da produção apresentados neste subitem são utilizados em pesquisas empíricas envolvendo integração e desempenho, como em Swink, Narasimhan e

Wang (2007) e Wong, Boon-itt e Wong (2011). Por outro lado, alguns autores também definem constructos mais específicos para representar desempenho, derivados destes objetivos gerais. Droge, Jayaram e Vickery (2004), por exemplo, avaliam o desempenho do processo de desenvolvimento de produto com base no *time-to-market*, no ciclo total de entrega do produto e na responsividade dos fornecedores. Segundo estes autores, o *time-to-market* está associado à habilidade de minimizar o tempo de desenvolvimento de novos produtos e minimizar o tempo necessário para realizar melhorias e modificações aos produtos existentes. O ciclo total de entrega do produto, por sua vez, está relacionado ao tempo de aquisição de matérias-primas e componentes, ao *lead time* de produção e à velocidade da entrega propriamente dita. No quesito responsividade dos fornecedores, são considerados fatores como: serviço de pré-venda, i.e., a habilidade de apoiar o cliente durante o processo de decisão de compra; suporte ao produto e assistência pós-vendas; habilidade de atender a reclamações, confirmar pedidos e fornecer informações à empresa-cliente com rapidez. Estas medidas adotadas por Droge, Jayaram e Vickery (2004) são relativas à teoria da Competição Baseada em Tempo (*Time-Based Competition*, TBC), discutida por Blackburn (1991) e outros.

Forslund e Jonnson (2007) também propõem dimensões específicas para avaliar o desempenho da Cadeia de Suprimentos. De acordo com os autores, este desempenho pode ser medido em termos de nível de serviço ao cliente, ações corretivas e ações preventivas. Ações corretivas são ações não planejadas do fornecedor para corrigir deficiências no serviço ao cliente relacionado a um pedido específico (FORSLUND; JONNISON, 2007). Lindau e Lumsden⁴ (1993 apud FORSLUND; JONNISON, 2007) e Mattsson⁵ (2002 apud FORSLUND; JONNISON, 2007), elencam as seguintes ações corretivas: subcontratação, ordens urgentes, redução de tamanho de lote de produção ou de transporte, reprogramação, quebra de reserva, horas extras e transporte expresso. Ações corretivas implicam custos extras. Por outro lado, as ações preventivas são aquelas que resultam em aumento do capital imobilizado. Lindau e Lumsden³ (1993 apud FORSLUND; JONNISON, 2007) e Fahlén⁶ (1997 apud FORSLUND; JONNISON, 2007), classificam como ações preventivas os seguintes elementos: estoques de segurança de matérias-primas e produtos acabados, capacidade de segurança (folga de capacidade), *lead times* de segurança e demanda

⁴ LINDAU, R. AND LUMSDEN, K. **Disturbance Absorption Actions Used in Material Flow Systems** – A Pilot Study, Department of Transportation and Logistics, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1993.

⁵ MATTSSON, S-A. **Logistik i försörjningskedjor**, Studentlitteratur, Lund, 2002 (in Swedish).

⁶ FAHLÉN, K. **Störningars konsekvenser för tillverkande företags effektivitet** – identifiering, analys och hantering av störningar. Handelshögskolan, Göteborgs universitet, Göteborg, 1997 (in Swedish).

superestimada. Tanto as ações corretivas quanto preventivas podem auxiliar a se atingir bom desempenho em termos de nível de serviço ao cliente. Por esta razão, Forslund e Jonnson (2007) consideram o efeito combinado dessas três dimensões para avaliar o desempenho da Cadeia de Suprimentos.

Há ainda um conjunto de estudos empíricos nos quais os resultados da integração e da melhoria na qualidade da informação são medidos em termos de desempenho geral do negócio ou desempenho da empresa. Neste caso, métricas financeiras ou estratégicas, como crescimento nas vendas, crescimento nos lucros, retorno sobre o investimento (ROI), parcela de mercado e satisfação do consumidor são geralmente adotadas como parâmetros de avaliação. Droge, Jayaram e Vickery (2004), Swink, Narasimhan e Wang (2007), Germain, Claycomb e Droge (2008) e Flynn, Huo e Zhao (2010), entre outros, adotam este tipo de medida.

A Figura 2.4 apresenta um resumo das diferentes dimensões relacionadas ao desempenho, discutidas até então. É interessante ressaltar que, para alguns constructos, vários pesquisadores apresentam definições e dimensões similares, adotando também terminologias comuns para estas dimensões. Essa homogeneidade de definição ocorre especialmente para o termo “integração”, e, em menor grau, para a “incerteza” e a “qualidade de informação”. Por outro lado, o termo geral “desempenho” pode estar associado a significados e métricas muito distintos, conforme se pode observar.

Figura 2.4 – Dimensões representativas do desempenho, agrupadas a partir das definições de diferentes autores. Fonte: próprio autor.

2.2 Relações entre integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho

As relações entre integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho tem sido foco de pesquisas empíricas recentes conduzidas por vários autores. Nesta seção, procura-se apresentar e discutir os resultados dessas pesquisas, esboçando-se um mapa dessas relações com base na análise da literatura internacional da área. Foram levantados trabalhos publicados desde 2001, aproximadamente, até 2012.

O ramo mais significativo das pesquisas empíricas realizadas consiste na relação entre os constructos integração e desempenho. As bases conceituais da relação entre integração interna e desempenho encontram-se na literatura da área de Gestão da Qualidade Total (GQT), desenvolvimento de produto e estratégia da produção, conforme mencionado por Wong, Boon-itt e Wong (2011). Segundo Pagell (2004), a integração interna está ligada ao

conceito de consenso estratégico, o qual garante que as estratégias de nível funcional da empresa se apoiem entre si e apoiem a estratégia de negócio. Essa ideia de alinhamento estratégico entre o nível funcional e o de negócio é um conceito tradicional e que tem sido explorado na literatura desde o modelo de Hayes e Wheelright (1984), na área de estratégia da produção. Pagell (2004), no entanto, enfatiza a diferença entre consenso e alinhamento. O alinhamento estratégico ocorre quando as múltiplas funções da empresa perseguem os mesmos objetivos; o consenso estratégico, por sua vez, ocorre quando os gerentes funcionais estão conscientes de que estão buscando os mesmos objetivos.

Ao se examinar esse binômio integração desempenho, dois diferentes escopos ou níveis de análise podem ser inicialmente considerados: o interfuncional e o intrafuncional. Droge, Jayaram e Vickery (2004), por exemplo, investigam esse binômio sob a perspectiva do desenvolvimento de produto, ou seja, a partir de um foco intrafuncional. Os autores analisam as relações entre: (1) a integração interna e externa (no desenvolvimento de produto), (2) o desempenho baseado no tempo (*time-based performance*), entendido como uma medida intermediária, e (3) o desempenho geral da empresa, definido com um resultado final. As definições desenvolvidas pelos autores para os constructos multidimensionais de integração interna e externa, bem como para o desempenho baseado em tempo são apresentadas nos itens 2.1.1 e 2.1.4, respectivamente. Retomando brevemente, como dimensões da integração interna no processo de desenvolvimento de produto, Droge, Jayaram e Vickery (2004) consideram a engenharia simultânea, o projeto para manufatura, o projeto assistido por computador, entre outras. Como práticas de integração externa, são consideradas as parcerias com fornecedores e com clientes no desenvolvimento de produto. O desempenho geral da empresa é avaliado a partir da perspectiva financeira e da parcela de mercado. Os autores supracitados verificaram que cada uma das dimensões da integração interna e externa apresenta uma relação positiva com os constructos de desempenho baseado no tempo. Além disso, foram examinados os efeitos destes constructos intermediários de desempenho em relação ao desempenho geral da empresa, e observou-se que o ciclo de entrega do produto, discutido no item 2.4, parece influenciar significativamente a parcela de mercado, enquanto a alta responsividade dos fornecedores tende a causar melhora no desempenho financeiro da empresa.

Assim, de acordo com Droge, Jayaram e Vickery (2004), foram identificadas duas rotas indiretas que partem da integração interna e externa e conduzem à melhoria do desempenho geral da empresa: a primeira passa pelo ciclo de entrega do produto, que por sua vez influencia a parcela de mercado, e a segunda passa pela alta responsividade, a qual acaba por impactar o desempenho financeiro. Estes resultados foram obtidos a partir de um

levantamento (*survey*) com fornecedores de montadoras automotivas, na qual as respostas foram avaliadas por meio de regressão e regressão hierárquica. Os autores supracitados também investigaram os efeitos diretos da integração no desempenho geral da empresa, verificando que a integração externa exerce um impacto positivo direto sobre a parcela de mercado, mesmo depois que os efeitos indiretos da rapidez no ciclo de entrega do produto sobre a parcela de mercado tenham sido contabilizados. Por fim, examinou-se também o efeito da interação entre integração interna e externa sobre os indicadores gerais de desempenho financeiro e parcela de mercado. Os resultados sugerem que a existência conjunta destes dois tipos de integração produz um efeito sinérgico sobre o desempenho geral da empresa.

O’Leary-Kelly e Flores (2002) também examinam o binômio integração interna e desempenho, porém, no nível interfuncional. O estudo foca-se no efeito da integração das decisões das áreas de *Marketing*/vendas e manufatura em relação ao desempenho financeiro da empresa. Mais especificamente, os autores analisaram a integração entre as decisões de *Marketing*/vendas e as decisões de manufatura. O primeiro grupo inclui decisões relativas ao desenvolvimento de produto e plano de vendas, enquanto o segundo grupo refere-se às decisões de desenvolvimento de processo e planejamento da produção. Na análise dessa interface, considera-se ainda o efeito moderador da incerteza na demanda e da estratégia de negócio da empresa.

Quando se trata de integração, não devem ser ignorados os custos associados, tais como aqueles resultantes do desenvolvimento de mecanismos estruturas e infra-estruturais necessários para propiciar a integração. A premissa básica do estudo de O’Leary-Kelly e Flores (2002) é que pode não ser benéfico integrar as decisões entre manufatura e vendas em todas as circunstâncias. Ao contrário, os benefícios dependem do contexto estratégico e ambiental no qual a empresa está competindo. Assim, observa-se que a análise dos autores está embasada no princípio da Contingência Organizacional, o qual estabelece que o desempenho da empresa depende do alinhamento entre sua estrutura e o ambiente, conforme já mencionado.

Como resultado do trabalho mencionado, foi possível associar um melhor desempenho à integração das decisões de *Marketing*/vendas em empresas sujeitas a altos níveis de incerteza na demanda. Essa relação positiva não foi observada quando se considerou a integração das decisões de manufatura, ou seja, o desenvolvimento de processo e o planejamento de produção. Resumindo, no que tange à integração das decisões de *Marketing*/vendas, ou seja, o desenvolvimento de produto e o planejamento de vendas, os

resultados foram condizentes com as hipóteses formuladas. Em relação à integração das decisões de manufatura, os resultados indicaram a direção oposta, isto é, as hipóteses inversas foram confirmadas. O’Leary-Kelly e Flores (2002) destacam ainda a existência de vários estudos conceituais envolvendo estes temas, de alguns estudos analíticos, mas de muito poucos estudos empíricos.

Além do efeito moderador da incerteza na demanda, os autores utilizaram a estratégia de negócio da empresa como outra variável moderadora da relação entre integração e desempenho, sendo que tal variável foi desmembrada em cinco dimensões: diferenciação via inovação de produtos, liderança em custos, pontualidade na entrega, qualidade superior de produto e diversidade de produtos. Em resumo, observou-se uma relação positiva entre a integração das decisões de desenvolvimento de produto entre *Marketing* e manufatura nas empresas com foco na estratégia de inovação de produtos. Entretanto, para estas mesmas empresas, a integração em relação às decisões de desenvolvimento de processo não levou à melhoria de desempenho. De maneira similar, para empresas que empregam a estratégia de pontualidade na entrega, uma maior integração nas decisões de planejamento de vendas foi associada a um melhor desempenho, enquanto o aumento da integração no planejamento de produção não surtiu o mesmo efeito.

O’Leary Kelly e Flores (2002) apresentaram duas possíveis razões para os resultados conflitantes. A primeira delas se refere à existência de um “diferencial temporal” entre as decisões de *Marketing*/vendas e as decisões de manufatura, uma vez que as decisões da área de *Marketing* são geralmente tomadas como dados de entrada para as decisões relacionadas à manufatura. Assim, é mais vantajoso que a integração das decisões ocorra em um estágio anterior, isto é, durante o planejamento de vendas. Quando se espera para integrar as decisões na etapa de planejamento da produção, há menos tempo disponível para realizar mudanças em resposta ao plano de vendas. Se a empresa já começou a executar tal plano, resta pouca ou nenhuma oportunidade para aplicar as melhorias sugeridas pela manufatura. Vale ressaltar que é devido a estas questões que vários autores destacam a importância do processo de Planejamento de Vendas e Operações como mecanismo de integração, pois, nesse processo, o ajuste destes planos ocorre simultaneamente e depende do consenso entre ambas as áreas.

A segunda razão que pode explicar os resultados obtidos, de acordo com O’Leary-Kelly e Flores (2002), refere-se à diferença de percepção dos dois grupos de respondentes, os gerentes de *Marketing* e os gerentes de produção, em relação ao nível de integração entre estas duas áreas da empresa. Os gerentes têm percepções enviesadas em relação ao nível de integração entre as áreas de decisão que eles tradicionalmente controlam. No trabalho de

Pagell (2004) busca-se minimizar estas diferenças de percepção com a utilização de uma abordagem qualitativa e comparativa, baseada em entrevistas em profundidade. O nível de integração das áreas funcionais de uma dada empresa, nesse caso, é determinado por dois entrevistadores externos independentes, com base nas respostas a um conjunto determinado de questões.

Outro tópico que tem recebido atenção substancial nesta última década refere-se ao impacto positivo da integração da cadeia de suprimentos (*Supply Chain Integration*, SCI) sobre o desempenho operacional e estratégico da empresa. O’Leary-Kelly e Flores (2002), Droge, Jayaram e Vickery (2004), Narasimhan e Kim (2002), Swink, Narasimhan e Wang (2007), Flynn, Huo e Zhao (2010) e Wong, Boon-itt e Wong (2011) são alguns dos autores que estudam este binômio, sendo que os dois primeiros abordam a perspectiva da integração interna, conforme foi apresentado, enquanto os demais consideram ambas as dimensões, interna e externa.

No trabalho de Narasimhan e Kim (2002), não se examina diretamente a relação entre integração e desempenho; a integração é considerada como uma variável moderadora da relação entre a estratégia de diversificação de produtos e o desempenho. Segundo os autores, existe uma relação curvilínea com concavidade para baixo entre a diversificação e o desempenho, sendo que a fundamentação teórica para esta relação pode ser encontrada na Visão Baseada em Recursos e na Teoria dos Custos de Transação. De uma perspectiva conceitual, sabe-se que níveis crescentes de diversificação influenciam positivamente o desempenho devido a economias de escopo e escala, redução de riscos e aprendizado. Se a diversificação perseguida encontra-se dentro do escopo de recursos e habilidades específicas da empresa, rendimentos crescentes em longo prazo devem ser obtidos. Estes argumentos justificam a parte crescente da curva que relaciona diversificação e desempenho. Por outro lado, quando a diversificação aumenta de tal forma que passe a ter apenas uma ligação tênue com a linha de negócios principal da empresa, o aprendizado e os recursos podem ser insuficientes para garantir a competitividade neste novo ramo, e a dificuldade de administração interna tende a crescer devido à falta de economias de escopo. A porção decrescente da curva está relacionada a estes fatores (NARASIMHAN; KIM, 2002). Nessa última situação, o aumento dos custos de transação supera os efeitos positivos da diversificação.

É possível para as empresas que adotam a estratégia de diversificação não-relacionada alcançar altos níveis de desempenho se conseguirem diluir os riscos da complexidade interna por meio da interação e coordenação efetivas entre as várias unidades funcionais. Assim,

Narasimhan e Kim (2002) propõem a hipótese de que a integração interna entre produção, logística e *Marketing* influencia positivamente a relação entre diversificação não-relacionada de produtos e desempenho. Esta hipótese foi confirmada a partir da análise dos dados coletados. De forma similar, os autores observaram que a integração externa com consumidores e clientes exerce esse mesmo efeito positivo sobre a relação entre o desempenho e a diversificação de mercados, ou seja, a venda de produtos para mercados internacionais. A integração da Cadeia de Suprimentos, em suas dimensões interna e externa, leva à adoção de novas formas organizacionais e relacionamentos, os quais, por sua vez, podem estender as capacidades estratégicas da empresa e facilitar seus esforços de diversificação (NARASIMHAN; KIM, 2002).

Em alguns estudos, como os de O'Leary-Kelly e Flores (2002) e Fynes et al. (2004), examina-se diretamente a relação entre a integração da Cadeia de Suprimentos (SCI) e o desempenho, acrescentando-se a incerteza como fator moderador dessa relação. Entretanto, Flynn, Huo e Zhao (2010) e Wong, Boon-itt e Wong (2011) ressaltam que alguns resultados encontrados nesse ramo de estudos são aparentemente conflitantes, já que nem sempre estas relações entre SCI e desempenho parecem ser moderadas pela incerteza ambiental. Também não há um consenso sobre a direção na qual a incerteza afeta essas relações – se as intensifica ou enfraquece – nem sobre quais dimensões do desempenho são afetadas. Segundo os autores supracitados, este conflito aparente se deve, em parte, às diferentes abordagens utilizadas para definição dos constructos, as quais inviabilizam comparações diretas.

Para contornar o problema mencionado, Flynn, Huo e Zhao (2010) e Wong, Boon-itt e Wong (2011) propõem que os conceitos de integração e desempenho sejam definidos de forma multidimensional. Conforme apresentado na seção 2.1, estes autores subdividem o conceito de integração em integração interna, integração com fornecedores e integração com clientes. Como dimensões do desempenho, Flynn, Huo e Zhao (2010) consideram o desempenho operacional e o de negócio, ou seja, o desempenho estratégico. Assim, são testadas neste trabalho as hipóteses da existência de relações positivas entre cada uma das dimensões da integração e cada uma das dimensões de desempenho. Além disso, enfatiza-se a importância da integração interna como um pré-requisito para a integração com fornecedores e clientes, ideia também apresentada por Vollman (2005) ao discutir os estágios de integração e o conceito da orquestração da cadeia de suprimentos. As incertezas e ligações externas devem ser absorvidas internamente em uma organização e o impedimento primário para alcançar os benefícios da integração externa são as barreiras intra-organizacionais (FLYNN; HUO; ZHAO, 2010). Segundo os autores supracitados, um relacionamento próximo entre

clientes e empresa oferece oportunidades para a melhoria na acurácia da previsão de demanda, o que reduz os tempos de desenvolvimento de produto, os tempos de planejamento da produção e a obsolescência dos estoques, possibilitando uma maior responsividade às necessidades do consumidor. Koufteros et al (2005) demonstraram que este tipo de integração com clientes está relacionado indiretamente ao desempenho, por meio da ligação com o desenvolvimento de produto e inovação. Por outro lado, o desenvolvimento de parcerias estratégicas com fornecedores facilita seu entendimento e antecipação das necessidades da empresa cliente. Flynn, Huo e Zhao (2010) revisam um conjunto de estudos empíricos nos quais investigou-se a relação entre diferentes tipos de integração e o desempenho. Vários desses estudos demonstraram haver relação entre a integração com fornecedores e o desempenho no desenvolvimento de produtos; em outros, no entanto, concluiu-se não haver relação entre este tipo de integração e o desempenho operacional. Os resultados do trabalho de Flynn, Huo e Zhao (2010) demonstraram que a integração interna e com o cliente são diferenciais para um bom desempenho, enquanto a integração com o fornecedor não se mostrou positivamente relacionada com o desempenho. Estes resultados, em geral, estão alinhados àqueles obtidos em estudos anteriores, entretanto, ainda permanecem algumas contradições.

Wong, Boon-itt e Wong (2011) também realizam uma análise similar, baseada na Teoria da Contingência, entretanto, eles subdividem o desempenho em quatro dimensões: custo, qualidade, entrega e flexibilidade. A hipótese geral apresentada pelos autores é a de que cada uma das três dimensões de integração – interna, com fornecedores e com clientes – influencia positivamente cada uma dessas quatro dimensões de desempenho. Segundo eles, a incerteza ambiental afeta essas relações de forma diferente em cada caso, o que auxilia a explicar, em parte, os resultados conflitantes encontrados em alguns trabalhos anteriores. Assim, Wong, Boon-itt e Wong (2011) propõem que, num contexto de alta incerteza ambiental, as associações entre integração interna - custo de produção e integração interna - qualidade do produto são fortalecidas, sendo que o mesmo não ocorre com as relações bilaterais da integração interna com a entrega e a flexibilidade. A integração com clientes e a integração com fornecedores, por outro lado, são duas dimensões da integração externa. Assim, quando há alta incerteza ambiental, as relações bilaterais de cada uma dessas dimensões com o desempenho em entrega e a flexibilidade tendem a se fortalecer, enquanto o mesmo não ocorre para as relações dessas dimensões com o custo e a qualidade.

Como abordagem alternativa à Teoria da Contingência no estudo da relação integração-desempenho, Flynn, Huo e Zhao (2010) utilizam a Teoria da Configuração. Esta

teoria descreve uma organização como um conjunto de atividades inter-relacionadas. Ao invés de se considerar relações bilaterais, entre pares de constructos, como na abordagem da contingência, enxerga-se o alinhamento com o ambiente em termos de configurações de vários elementos e relações entre tais elementos. Assim, foca-se no estabelecimento de padrões ou perfis e busca-se desenvolver uma taxonomia com base na aplicação de ferramentas analíticas, como análise de clusters. Este tipo de abordagem permite que outros padrões que não constam na tipologia teórica possam emergir. Flynn, Huo e Zhao (2010) acreditam que tal análise pode levar a um melhor entendimento dos padrões de integração na cadeia de suprimentos e de como eles estão relacionados ao desempenho. Frohlich e Westbrook (2001) desenvolveram uma taxonomia com diferentes padrões ou “arcos” de SCI e observaram ser possível associar diferenças de desempenho a cada um desses padrões. As empresas dão ênfase em diversos graus a determinadas dimensões dessa integração na cadeia de suprimentos e, assim, vários padrões de configuração podem existir. De acordo com Flynn, Huo e Zhao (2010), tais padrões podem ser descritos em termos de força e equilíbrio. A força representa a extensão e intensidade com a qual as atividades de integração são realizadas. Essa força foi avaliada em estudos anteriores, como os de Frohlich e Westbrook (2001) e Narasimhan e Kim (2002), provendo um referencial para comparação. Por outro lado, o equilíbrio está associado ao desenvolvimento balanceado das três dimensões da integração na cadeia de suprimentos, ou seja, a integração interna, a integração com clientes e a integração com fornecedores. Ainda segundo Flynn, Huo e Zhao (2010), a literatura indica que as empresas não depositam igual ênfase em cada dimensão da SCI. Assim, os autores desenvolvem uma taxonomia de categorização das empresas com base em seus padrões de integração e, a partir dessa taxonomia, propõem que tais padrões estejam relacionados ao desempenho operacional e estratégico da empresa dentro da cadeia de suprimentos. Esta hipótese está embasada na Teoria da Configuração, a qual defende que as organizações têm melhor desempenho quando desenvolvem as melhores configurações de interconexão entre os elementos. Assim, de acordo com Flynn, Huo e Zhao (2010), a relação entre a SCI e o desempenho da empresa pode ser determinada pelo padrão de integração em termos da força e equilíbrio das três dimensões. Empresas nas quais a integração em termos das três dimensões é mais forte tendem a ter o melhor desempenho. Os resultados obtidos mostraram que o equilíbrio não afeta o desempenho de forma sistemática, uma vez que tanto empresas que apresentaram uma configuração equilibrada entre as dimensões quanto empresas que apresentaram uma configuração com predominância de integração interna e integração com o cliente obtiveram os melhores desempenhos.

Pode-se observar que a maioria das pesquisas empíricas envolvendo os quatro constructos mencionados é de natureza correlacional e utiliza o método de pesquisa do tipo *survey*. Poucos estudos seguem uma abordagem mais qualitativa e empregam a metodologia de estudo de caso. Dentre esse segundo grupo, destaca-se o trabalho de Pagell (2004), no qual se busca constroir um modelo contendo os direcionadores da integração interna entre manufatura, compras e logística. O foco da investigação é determinar os fatores facilitadores e inibidores da criação de integração entre as funções citadas. Tal estudo busca cobrir uma lacuna existente na literatura, fornecendo diretrizes sobre como as empresas podem de fato criar integração e representando um primeiro passo para mover-se da esfera descritiva para a prescritiva.

Pagell (2004) observou que a comunicação formal e informal e os sistemas de medição e recompensa são os principais antecedentes facilitadores da integração. Assim, o autor constatou, conforme esperado, que o nível de integração interna aumenta na medida em que a comunicação entre gerentes de diferentes funções aumenta. Além disso, observou-se que a comunicação informal exerce um efeito maior sobre a integração do que a comunicação formal e planejada. A análise dos dados também sugere que para se estimular a integração, as recompensas devem ser baseadas em objetivos no nível de unidade de negócio e não somente em objetivos funcionais ou individuais.

O nível de comunicação, por sua vez, é influenciado por fatores como rotação de funções entre gerentes, formação de times multifuncionais e arranjo físico da fábrica. Ainda no modelo de Pagell (2004), a estrutura organizacional e a cultura da empresa são importantes direcionadores do processo de comunicação e do processo de avaliação e recompensa. O autor propõe que plantas com estruturas que criam um descompasso entre fluxo de físico de trabalho e fluxo de informação através do sistema terão níveis baixos de comunicação em relação a empresas nas quais esse descompasso não ocorre. Tal desencontro também tende a originar sistemas de medição que não apoiam os objetivos gerais da empresa, mas sim objetivos funcionais conflitantes. A cultura tem um efeito similar sobre a comunicação e os sistemas de avaliação. Empresas com culturas que removem o poder dos indivíduos ou os colocam uns contra os outros tendem a ter baixos níveis de comunicação interfuncional e sistemas de avaliação e recompensa inadequados para apoiar a integração.

Como se pode notar, há um corpo crescente de conhecimentos acerca da correlação entre integração e desempenho, moderada pela incerteza. Outros campos de estudo um pouco menores referem-se à ligação entre qualidade da informação e desempenho, bem como à relação entre integração e qualidade da informação. A incerteza também pode ser incluída

nessas relações como uma variável contingencial, especialmente quando se analisa o binômio qualidade da informação – desempenho.

Forslund e Jonsson (2007) realizaram uma pesquisa empírica sobre a qualidade da informação no contexto da manufatura e do planejamento da produção. O estudo investigou a qualidade dos dados de previsão de demanda trocados entre pares fornecedor-cliente em uma cadeia de suprimentos. Foram analisadas a extensão do acesso do fornecedor aos dados de previsão e a qualidade percebida da informação. A partir daí, buscou-se investigar o impacto do acesso à informação e o impacto da qualidade dessa informação sobre o desempenho da cadeia de suprimentos. O desempenho da cadeia foi avaliado em termos de nível de serviço, ações corretivas e ações preventivas, conforme descrito no item 2.1.4. Em relação à qualidade da informação, foram mensuradas as seguintes dimensões: acurácia, pontualidade, facilidade de acesso e confiabilidade.

Como resultado do estudo mencionado, foram observadas deficiências em todas as dimensões da qualidade da informação; a confiabilidade foi considerada a dimensão mais deficiente, enquanto a acurácia mostrou-se ser a característica mais forte. A única diferença significativa observada no desempenho dos fornecedores com e sem acesso às previsões relacionou-se à utilização de estoques de segurança de produtos finais: fornecedores sem acesso às previsões utilizavam estoques de segurança com mais frequência do que os fornecedores com acesso aos dados. Na amostra pesquisada, não se observou a existência de uma correlação positiva entre o desempenho da cadeia de suprimentos e a qualidade da informação das previsões. Uma das possíveis explicações dos autores para este resultado reside na possibilidade de a demanda dos clientes envolvidos na amostra ser relativamente previsível. A qualidade da informação enviada aos fornecedores, neste caso, pode não ser muito relevante quando a demanda é previsível. Outra questão relaciona-se ao tamanho e heterogeneidade da amostra. Segundo os autores mencionados, o estudo foi limitado em termos da quantidade de empresas de mesmo tipo selecionadas. Esse panorama demonstra que há para estudos empíricos adicionais acerca desses tópicos específicos.

Gustavsson (2008) analisou a integração na esfera do Planejamento e Controle da Produção, investigando o impacto da integração dos processos de PCP na Qualidade de Informação disponibilizada para o planejamento. Para tanto, foram realizados dois estudos de caso em indústrias da área aeroespacial. No trabalho citado, avaliou-se a integração interna e externa, sendo que cada um desses constructos foi ainda subdividido nas dimensões técnica e organizacional. Já a qualidade de informação foi avaliada a partir das dez dimensões citadas no item 2.1.3. Nos casos em que se constatou haver alta Qualidade de Informação foram

observados também altos níveis de integração organizacional. Esta possível correlação é a primeira das hipóteses proposta por Gustavsson (2008). Além disso, as dimensões completude, quantidade adequada, relevância e facilidade de utilização-inteligibilidade não se apresentaram deficientes em nenhuma das interfaces estudadas. Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos anteriores, como em Forslund e Jonsson (2007). A confiabilidade e pontualidade da informação foram identificadas como dimensões problemáticas, o que também está de acordo as pesquisas de Closs et al. (1997), Daugherty et al. (1999) e Forslund e Jonsson (2007). Com base nestes resultados, Gustavsson (2008) propõe que o efeito individual e combinado de estratégias de integração organizacional na qualidade da informação percebida seja diferente para as várias dimensões da informação.

Deve-se ressaltar que o estudo citado apresenta indícios da correlação entre integração e qualidade da informação, entretanto, esta relação deve ainda ser mais explorada e validada. As proposições já formuladas podem fornecer um ponto de partida para estas pesquisas.

De Snoo, Wezel e Jorna (2011), por outro lado, focam seu estudo no constructo incerteza, investigando a influência desta na definição das métricas de desempenho da atividade de Programação de Operações (*Scheduling*). Tal atividade geralmente pertence à esfera de PCP. Primeiramente, os autores apresentam uma categorização dos critérios e métricas de desempenho comumente empregados para avaliar esta atividade, com base em pesquisas empíricas em empresas de manufatura e serviços com perfis distintos. Muitas das métricas apresentadas na literatura específica referente a este tema buscam avaliar apenas o desempenho da programação obtida, como o *makespan*, o tempo total de espera e o atraso médio das tarefas, a utilização das máquinas, por exemplo. Este conjunto de métricas pode ser utilizado para avaliar os resultados, o produto do processo, mas não o processo em si e as atividades que o compõem. De acordo com os autores citados, tais critérios avaliam a qualidade da execução antecipada da programação, fato que é criticado por vários pesquisadores como sendo uma perspectiva muito estreita.

Na categorização apresentada por De Snoo, Wezel e Jorna (2011), as métricas de desempenho da atividade de *Scheduling* são divididas em duas categorias: produto e processo, sendo o produto o resultado da atividade e o processo, a atividade em si. Como resultado da pesquisa empírica, observou-se que o desempenho do *Scheduling* em termos de produto é determinado pela extensão na qual as restrições internas e externas são atendidas, enquanto o desempenho relativo ao processo é determinado pela confiabilidade, flexibilidade e velocidade de resposta na elaboração dos planos, bem como capacidade de comunicação e harmonização dos programadores. Um dos resultados obtidos no trabalho citado refere-se à

influência condicional da incerteza em relação ao foco da empresa na avaliação de desempenho do *Scheduling*. Tomando-se a incerteza como uma variável de contingência, os autores observaram que em situações com alta incerteza de informações, a velocidade de resposta era muito mais importante que a otimização da programação, ou seja, nesses casos, o desempenho do processo de programação pode ser mais importante do que o desempenho do produto resultante desse processo, ou seja, a programação propriamente dita. Este resultado está de acordo com a Teoria do Processamento da Informação (*Information Processing Theory*, IPT), a qual defende que a empresa deve melhorar sua habilidade de processar informação quando sujeita a alta incerteza, conforme discutido na seção 2.1.3.

O conjunto de trabalhos empíricos que abordam os constructos de integração, incerteza, qualidade de informação e desempenho, bem como as relações entre eles, é relativamente vasto e diverso, como se pode ver. Com o intuito de apresentar uma síntese dos diferentes escopos desses trabalhos, propõe-se, na próxima seção, um diagrama de representação e classificação dos mesmos.

2.3 Discussões e diagrama conceitual

Com base na análise da literatura, elaborou-se um diagrama conceitual para representar os diferentes escopos dos trabalhos empíricos realizados na área, bem como as relações já examinadas pelos pesquisadores envolvendo os constructos de integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho. Este modelo é apresentado na Figura 2.5.

Primeiramente, o corpo de trabalhos existentes pode ser dividido em três classes: 1) estudos que focam no entendimento e investigação de cada um dos constructos individualmente, na situação prática em que estão envolvidos; 2) estudos nos quais se analisam as correlações positivas ou negativas entre os constructos, análise que é geralmente feita em pares; 3) estudos nos quais se examina a relação entre algum dos constructos e o desempenho considerando-se o efeito de uma variável moderadora, a qual usualmente é a incerteza.

Figura 2.5 – Estrutura conceitual representando as relações exploradas nos estudos empíricos. Fonte: próprio autor.

Os estudos de Pagell (2004) e Lee et al. (2002) pertencem a essa primeira categoria, explorando a integração e a qualidade da informação, respectivamente. Na segunda categoria, a maioria dos trabalhos revisados abordam a relação entre integração e desempenho, como é o caso de Frohlich e Westbrook (2001), Narasimhan e Kim (2002), Droge, Jayaram e Vickery (2004) e Swink, Narasimhan e Wang (2007). Pode-se observar que este é um ramo de pesquisa em crescimento. Também podem ser classificados nesta categoria estudos que relacionam a qualidade da informação à integração, como o trabalho de Gustavsson (2008), ou ao desempenho, como é o caso de Forslund e Jonsson (2008). Na terceira categoria, os pesquisadores buscam agregar conhecimentos ao corpo já explorado na segunda categoria. Assim, eles avançam na investigação da relação entre integração e desempenho considerando a incerteza como fator moderador desta relação. Nesta classe se situam os trabalhos de O’Leary-Kelly e Flores (2002), Fynes et al. (2004), Germain, Claycomb e Droge (2008), Flynn, Huo e Zhao (2010) e Wong, Boon-itt e Wong (2011).

Conforme já mencionado, as bases teóricas para as hipóteses formuladas nesta terceira categoria de trabalhos encontram-se na Teoria da Contingência, segundo a qual a estrutura da organização é moldada pelo ambiente externo. Em alguns estudos, como os de Frohlich e Westbrook (2001) e Flynn, Huo e Zhao (2010), utilizou-se uma abordagem alternativa baseada na Teoria da Configuração para se examinar a relação entre integração e desempenho, sem se considerar a influência da incerteza. Os fundamentos da Teoria de Processamento da Informação também foram empregados nas pesquisas relativas à incerteza e qualidade da informação. De acordo com esta teoria, as organizações devem melhorar a qualidade da informação e sua capacidade de processar essa informação quando sujeitas a fontes internas e externas de incerteza. A pesquisa de De Snoo et al. (2011) se alinha com este princípio. Estas teorias que dão embasamento às diferentes relações estudadas são também mostradas na Figura 2.5.

Outro fator de classificação que pode ser derivado da análise da literatura refere-se ao nível de análise ou escopo dos estudos. A maioria das pesquisas envolvendo os constructos selecionados foi conduzida em um dos três níveis: nível de cadeia de suprimentos ou externo (entre empresas), nível de empresa ou interno e nível intrafuncional, isto é, relativo às atividades de uma função específica de negócio, como o PCP ou o desenvolvimento de produtos. A maioria dos estudos, como foi possível observar, foca-se no nível de cadeia de suprimentos, considerando tanto o nível externo (fornecedor e cliente) quanto o nível interno de análise. Este é o caso dos trabalhos de Frohlich e Westbrook (2001), Narasimhan e Kim (2002), Swink, Narasimhan e Wang (2007), Germain, Claycomb e Droge (2008), Flynn, Huo e Zhao (2010) e Wong, Boon-itt e Wong (2011). Por outro lado, há alguns estudos cujo escopo abrange apenas a dimensão externa de análise. Para referências adicionais, deve-se consultar Flynn, Huo e Zhao (2010). Na categoria das pesquisas que abordam o nível interno de análise, ou seja, relativo à empresa em si, podem ser incluídos os estudos de O'Leary-Kelly e Flores (2002) e Pagell (2004). Este nível interno pode ser ainda subdividido em interfuncional ou estratégico. Na revisão realizada focou-se apenas na perspectiva interfuncional, ou seja, nas relações entre diferentes funções da empresa, uma vez que a estratégia constitui-se outro campo maior de estudos, muito amplo para ser considerado no escopo desse trabalho. No nível mais baixo de análise, o intrafuncional, as pesquisas visam examinar as relações entre os constructos no contexto de uma função de negócio específica, como a função de Planejamento e Controle da Produção, por exemplo, abordada nos estudos de Gustavsson (2007) e De Snoo et al. (2011). O trabalho de Droge, Jayaram e Vickery

(2004) também se situa nesse nível de análise, uma vez que analisa integração interna e externa no âmbito específico do desenvolvimento de produto.

Em resumo, o diagrama proposto mostra as relações já investigadas por meio de pesquisas empíricas que envolvem os constructos de integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho. Adicionalmente, são retratadas as bases teóricas da formulação das hipóteses, bem como os diferentes níveis de análise considerados nos estudos.

2.4 Considerações finais da análise realizada

Neste capítulo apresentou-se a revisão e discussão dos principais estudos empíricos que abordam as relações entre os constructos integração, qualidade da informação, incerteza e desempenho. Além disso, elaborou-se um diagrama conceitual para representar: as relações examinadas pelos pesquisadores, o nível de análise ou âmbito da investigação e as teorias fundamentais que suportam as hipóteses testadas. Os trabalhos revisados foram então classificados em categorias com base nesses fatores. A análise e classificação do conhecimento existente revelaram os seguintes pontos:

- Há atualmente um corpo crescente de conhecimento acerca das relações entre integração e desempenho.
- Em muitos dos estudos analisados, a Teoria da Contingência é utilizada como um suporte à investigação do efeito da incerteza sobre o binômio integração-desempenho.
- Ainda há incongruências entre alguns resultados obtidos nos trabalhos revisados. Isto pode ser parcialmente explicado pelo fato de os pesquisadores utilizarem diferentes definições para a integração e o desempenho, o que dificulta comparações. Neste capítulo, buscou-se cobrir estas múltiplas definições utilizadas nas pesquisas, visando facilitar o entendimento das diferenças entre os resultados. Outra possível razão para as dissimilaridades é o fato de as pesquisas serem conduzidas em países diferentes, os quais apresentam diferenças socioeconômicas, culturais, etc.
- No que tange especificamente à integração, observou-se que a maioria dos trabalhos analisados era baseada em uma visão funcional da empresa, não considerando a visão de processos de negócio.

- As relações envolvendo a qualidade da informação no contexto da manufatura, tais como a relação entre IQ e desempenho ou entre IQ e integração, ainda têm sido pouco exploradas. A pesquisa na área de manufatura pode se beneficiar com uma integração mais próxima com área de Gestão de Sistemas de Informação (*Management of Information Systems*, MIS).
- Conforme destacado por outros autores, há uma quantidade significativa de estudos conceituais envolvendo os quatro constructos discutidos nesse capítulo, bem como suas inter-relações. A quantidade de evidências empíricas baseadas em estudos correlacionais também está crescendo. Por outro lado, na literatura internacional, há bem menos pesquisas qualitativas e descritivas, conforme destacado por Pagell (2004). Pesquisas empíricas quantitativas são certamente importantes nessa área. Entretanto, estudos qualitativos em profundidade podem trazer sugestões concretas e práticas de como se alcançar melhor desempenho por meio da integração, da melhoria da qualidade da informação ou da minimização das incertezas. Este tipo de estudo deve enriquecer o conhecimento descritivo existente na área, fornecendo diretrizes prescritivas.

Os tópicos destacados mostram que há espaço para trabalhos futuros acerca da relação integração-desempenho. Nesse sentido, constatou-se haver uma necessidade maior por estudos que abordem a qualidade da informação no contexto da manufatura e, em especial, por estudos qualitativos descritivos sobre cada um dos constructos – integração, qualidade da informação, incerteza e desempenho. Tais estudos devem buscar responder questões do tipo: quais são os direcionadores da qualidade da informação? Quais são os mecanismos aplicados pelas empresas, na prática, para lidar com as incertezas? Como estimular a integração? Trabalhos deste tipo podem prover diretrizes gerenciais factíveis para aqueles que buscam melhorar o desempenho de suas empresas.

Com este capítulo, procurou-se contribuir para o conhecimento existente ao se considerar conjuntamente estes quatro elementos – integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho - em uma revisão de literatura. Buscou-se esboçar um mapa das inter-relações entre estes constructos em diversos contextos, com base na pesquisa empírica existente, bem como apresentar uma análise crítica do conteúdo revisado e prover diretrizes para trabalhos futuros sobre o tema.

As discussões deste capítulo mostraram que o desempenho de uma empresa ou de uma função da empresa pode ser influenciado por vários fatores. Sabe-se que tais fatores são dinâmicos, ou seja, mudam com o tempo. O conceito de incerteza, em si, implica uma

dimensão temporal, pois as modificações no ambiente são eventos que ocorrem em um horizonte de tempo. Em algumas situações, o sistema de produção deve ter a capacidade de responder a esses eventos. Assim, no próximo capítulo serão apresentados modelos de programação e controle da produção baseados na Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle, os quais são capazes de lidar com fatores dinâmicos do ambiente produtivo.

Capítulo 3

Modelos de Controle da Produção baseados na Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle

Além dos objetivos tradicionais associados a custo, qualidade e tempo, novas características de desempenho têm se tornado importantes, como a capacidade de inovação e aprendizado, e especialmente a agilidade. Empresas ágeis se diferenciam das demais a partir da velocidade e flexibilidade no planejamento e realização de seus processos. Conforme destacam Wiendahl e Breithaupt (2000), tais empresas se destacam por sua capacidade de adaptação a condições mutantes no ambiente produtivo. As áreas de Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle fornecem uma variedade considerável de metodologias e ferramentas adequadas à análise e controle de sistemas dinâmicos, os quais podem ser aplicadas no âmbito do Planejamento e Controle da Produção.

Assim, serão revisados neste capítulo alguns modelos baseados na aplicação de tais metodologias a diferentes sistemas de planejamento e controle da produção, como sistemas de controle de estoques e sistemas de programação de operações (*Scheduling*). Com esta revisão, busca-se identificar as lacunas da pesquisa existente nesse campo bem como fornecer embasamento teórico para o desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho. Inicialmente apresenta-se um panorama geral dos modelos existentes na literatura, em ordem cronológica. Nos itens finais, alguns modelos são discutidos com detalhes, dada sua relevância para o desenvolvimento do modelo proposto.

3.1 Sistemas de produção e estoque embasados na Teoria de Controle e Dinâmica de Sistemas

Métodos advindos da Dinâmica de Sistemas e Teoria de Controle têm sido aplicados por algumas décadas à modelagem de Sistemas de Produção e Estoque. Ortega e Lin (2004) apresentam uma revisão bastante abrangente acerca das pesquisas desenvolvidas nesse campo. Segundo os autores, Simon (1952 apud ORTEGA; LIN, 2004 p. 2305) fez a primeira tentativa, ao propor um sistema para controlar a taxa de produção de um único produto

utilizando a teoria de servomecanismos. Antes desse trabalho, apenas aplicações da Teoria Controle em economia haviam sido sugeridas. Vassian⁷ (1955 apud ORTEGA; LIN, 2004 p. 2305) estendeu a aplicação de servomecanismos a modelos discretos no tempo, baseados na transformada Z. Este modelo parte da equação básica de controle de estoques, na qual o estoque final equivale ao estoque inicial somado à quantidade produzida no período. A partir dessa equação, o autor desenvolve uma expressão discreta para a política de colocação de ordens e previsão de demanda, elabora diagramas de blocos e aplica a transformada Z. O objetivo desta modelagem era determinar os melhores parâmetros para esta política de colocação de ordens, de forma a obter a melhor previsão de demanda e minimizar as variações nos estoques resultantes de erros de previsão.

No final dos anos 50, Forester⁸ (1961 apud ORTEGA; LIN, 2004 p. 2306-2307) aplicou uma metodologia que ficou conhecida como *Industrial Dynamics* e buscava compreender o comportamento dinâmico de sistemas de produção e estoques. Segundo a metodologia, os sistemas devem ser modelados com base em seis fluxos: fluxo de informação, de pedidos, financeiro, de pessoal e de equipamentos. Utiliza-se interpolação linear para determinação dos valores das variáveis em um período de tempo, sendo que um valor de inclinação calculado em um dado ponto é utilizado para calcular o valor da ordenada em um ponto seguinte, conforme mostrado na Figura 3.1. Dois tipos de equação são utilizados: equações de nível, associadas ao cálculo das ordenadas, e equações de taxa, associadas ao cálculo das inclinações. Esta abordagem é semelhante à representação de um sistema utilizando um modelo dinâmico de espaço dos estados. Tal representação também foi aplicada a problemas de estoques, e utiliza uma equação matricial para representar as derivadas das variáveis de estado e outra equação matricial para representar as saídas do sistema.

Towill (1982) demonstrou que a malha de realimentação é de fundamental importância para se obter um sistema eficaz de controle da produção, destacando que sistemas de uma única direção, ou seja, sistemas de malha aberta, não apresentam um desempenho tão satisfatório quanto sistemas de malha fechada.

⁷ VASSIAN, J. H. Application of discrete variable servo theory to inventory control. **Operations Research**, v. 3, p. 272-282, 1955.

⁸ FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.

Equações de nível: $I_K = I_J + (DT)(OR_{JK})$

OR = taxa de pedidos (em unidades de produto)

AT = tempo de ajuste

Equações de taxa: $OR_{KL} = (DI - I_K)/AT$

DI = estoque desejado

I = estoque (em unidades de produto)

Figura 3.1 – Equações de nível e de taxa de acordo com o paradigma do *Industrial Dynamics*. Fonte: Forrester, 1961.

Edghill e Towill (1990) aplicaram gráficos de resposta em frequência para avaliar a resposta de uma cadeia de suprimentos diante da aplicação de diferentes sinais de demanda, ou seja, diante da ocorrência de curvas de demanda com diferentes frequências, amplitudes e formatos.

Dentre outros trabalhos que abordam sistemas de produção e estoques, pode-se destacar o de Wikner⁹ (1994 apud ORTEGA; LIN, 2004 p. 2308-2309). Segundo ele, três atividades principais devem ser incluídas na modelagem de sistemas de manufatura: previsão de demanda, *lead times* e políticas de reposição de estoques. O autor supracitado calculou a transformada de Laplace e a transformada Z para algumas técnicas de previsão de demanda comumente utilizadas, como a média móvel e a suavização exponencial. Além disso, foram desenvolvidas expressões no domínio da frequência para representar *lead times* de manufatura e regras de reposição de estoques. A Figura 3.2 apresenta o sistema de produção e estoques desenvolvido pelo autor supracitado.

⁹ WIKNER, J. **Dynamic modelling and analysis of information flows in production-inventory and supply chain system**. Linköping: Linköping Institute of Technology, 1994.

Figura 3.2 – Diagrama de blocos de um sistema de produção e estoques. Fonte: adaptado de Wikner (1994).

As representações no domínio de Laplace para a previsão por suavização exponencial $F(s)$ e para o *lead time* de produção $P(s)$ são, respectivamente:

$$F(s) = \frac{\alpha}{s + \alpha} \quad (3.1)$$

$$P(s) = \frac{1}{\left[1 + s \frac{T_P}{n}\right]^n}, \quad (3.2)$$

sendo que: s é a variável de Laplace, $F(s)$ representa o método de previsão por suavização exponencial, no domínio de Laplace; α é a constante de suavização da previsão; $P(s)$ representa um atraso de n -ésima ordem da produção em relação à demanda, no domínio de Laplace; T_P é o *lead time* médio da unidade de produção; n é uma constante que, segundo Wikner (1994 apud ORTEGA; LIN, 2004 p.2309), deve ser escolhida com base na relação entre as propriedades do sistema real e as características do modelo. Para maiores esclarecimentos acerca do método de suavização exponencial, pode-se consultar Nahmias (2001).

No caso de sistemas de produção e estoques, é a política de reposição que atua como controlador do sistema. Wikner (1994 apud ORTEGA; LIN, 2004 p. 2308-2309) propõe a aplicação de um controlador proporcional integral derivativo (PID) a estes sistemas. Neste tipo de controlador, como se sabe, o ganho proporcional K_P melhora o desempenho do sistema, mas geralmente deixa um erro sistemático em relação ao alvo, ou seja, um erro em relação ao valor definido como ótimo e que deve ser alcançado pelo sistema. Acrescenta-se então um termo integral K_I/s buscando-se compensar este erro. Tal termo, entretanto, tende a desestabilizar o sistema, e um termo derivativo $K_D s$ é utilizado para buscar restaurar esta estabilidade. No sistema proposto pelo autor citado, o ganho proporcional K_P é aplicado ao

erro do nível de estoque, ou seja, a diferença entre o nível de estoque que o sistema está apresentando e o nível considerado ótimo. Consequentemente, o termo derivativo K_D é o parâmetro de ajuste para a taxa de mudança do estoque, isto é, a derivada do erro associado ao estoque. Nesse contexto, K_D pode ser interpretado como um parâmetro proporcional ao erro de produção, pois é a produção que causa a variação do estoque a uma determinada taxa.

Políticas de emissão de ordens de produção baseiam-se em um ou mais dos três fluxos fundamentais de informação: demanda, nível físico de estoques e estoques em processo (*Work In Process*, *WIP*). Na modelagem de sistemas de controle, em geral, o nível de estoques de produtos acabados e de estoques em processo são transmitidos como informação de realimentação, enquanto a demanda constitui-se uma informação para alimentação do sistema.

Evans, Naim e Towill (1998) modelaram e simularam o comportamento dinâmico de um sistema de controle logístico. Este sistema tem o objetivo específico de maximizar os níveis de serviço ao cliente e minimizar simultaneamente os níveis de estoque de produtos acabados. Disney, Naim e Towill (2000), utilizaram algoritmos genéticos para encontrar valores próximos dos ótimos para os parâmetros utilizados em um modelo genérico de sistema de controle de produção e distribuição.

A análise das funções de transferência, uma das ferramentas da Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle, foi utilizada por Dejonckheere et al. (2002) para um estudo inicial sobre o efeito Chicote na Cadeia de Suprimentos. Como se sabe, o efeito chicote é a amplificação da variação dos pedidos quando um dado padrão de demanda é transmitido ao longo da cadeia de suprimentos. Os autores avaliaram analiticamente, via funções de transferência, o impacto da utilização de métodos de previsão do tipo suavização exponencial sobre o efeito chicote. Em seguida, Dejonckheere et al. (2003) realizaram uma quantificação mais detalhada de tal efeito utilizando várias abordagens da Teoria de Controle. Neste trabalho, modelou-se inicialmente um diagrama causal com as informações relativas à previsão de demanda, produção, estoque em processo, nível de estoques, etc. A partir das equações do modelo de previsão de demanda e do modelo de reposição dos estoques, foram obtidas as funções de transferência do sistema. Com base nestas funções o sistema foi simulado. No estudo, foram utilizadas políticas de estoques nas quais o lote de reposição é definido em função da diferença entre um nível de estoques determinado e o estoque atual observado.

O objetivo dos autores citados consistia em analisar o comportamento do sistema quando submetido a variações de demanda senoidais, ou seja, desejava-se investigar como as ordens seriam geradas na saída do sistema se este fosse alimentado com sinais de entrada

senoidais. Em particular, estava-se interessado na razão entre a amplitude do sinal de saída e a amplitude do sinal de entrada. Para esta análise, foram utilizados os gráficos de resposta em frequência do sistema para políticas de estoques com lotes de reposição variáveis. Dentre as principais conclusões, Dejonckheere et al (2003) provaram que independentemente do método de previsão de demanda utilizado, nos sistemas com este tipo de política de reposição o efeito chicote sempre ocorrerá. A variação acentuada dos níveis de produção pode ser muito custosa na prática. Nestes casos, é importante evitar a amplificação da variância ou mesmo reduzir a variabilidade na demanda. Diante disso, os autores propuseram uma política de reposição capaz de suavizar os padrões das ordens de reposição, mesmo quando a demanda é estimada por previsão.

A metodologia apresentada pelos autores supracitados é bastante abrangente por duas razões. Primeiramente, porque pode ser utilizada para analisar o comportamento de qualquer política de reposição de estoques, desde que a função de transferência correspondente a essa política seja modelada. Em segundo lugar, é possível verificar a ocorrência de amplificação da variância para qualquer padrão de demanda, inclusive para dados reais, uma vez que estes dados podem ser decompostos em senoides com diferentes frequências e amplitudes por meio da transformada de Fourier (*Fast Fourier Transform*).

Uma análise análoga do efeito chicote é realizada por Kim et al (2006), porém, neste caso, tal efeito é quantificado por meio de uma abordagem estatística. Os *lead times* de produção, nesse trabalho, são representados por variáveis estocásticas.

Seguindo a mesma linha de Dejonckheere et al. (2003), Wang et al (2008) analisam, sob condições específicas, o modelo de controle automático de produção e estoques inicialmente proposto por Towill (1982) e aprimorado por outros autores. Na literatura da área, tal modelo é denominado APIOBPCS (*Automatic Pipeline, Inventory and Order Based Production Control System*). Wang et al (2008) verificam que, quando há uma tendência crescente na demanda, os níveis de estoque definidos pelo modelo se desviam significativamente dos níveis desejados, causando faltas de estoque. Em outras palavras, os autores supracitados mostram que, quando a demanda externa cresce segundo um padrão do tipo rampa, os níveis de estoque do sistema sofrem oscilações com amplitudes indesejáveis do ponto de vista econômico e gerencial. Para melhorar o controle dos estoques, os autores propõem a utilização de um controlador PI (proporcional integral) no laço de realimentação dos estoques, capaz de eliminar as flutuações, e a utilização de um controlador PD (proporcional derivativo) no laço referente à política de pedidos, para suavizar o nível de estoques.

A análise do modelo APIOBPCS é aprofundada por Zhou et al (2010). Os autores também propõem um sistema com dois laços de realimentação, um focado nos estoques e outro nos pedidos, sendo que um mesmo valor de ganho é definido para os controladores dos dois laços. A análise do modelo foca-se numa situação em que o tomador de decisão tem que lidar com uma extensa variedade de itens ou SKU's (*Stock Keeping Unit*) em um ambiente não altruísta, em que as informações sobre a demanda a jusante, nos pontos finais de consumo, não são compartilhadas ou não estão disponíveis. Sob essas circunstâncias, observou-se, por meio de estudos de campo, que os tomadores de decisão aplicam diferentes estratégias de dimensionamento dos lotes de produção. O modelo foi adaptado a três dessas estratégias, mostrando-se adequado para lidar com tais circunstâncias e com incertezas devido à variação dos *lead times*, segundo os autores.

3.2 Extensão vertical dos modelos (abordagem hierárquica)

Um ramo de pesquisas na área de controle aplicado a sistemas de produção refere-se ao desenvolvimento de modelos de produção e estoque de múltiplos níveis, conforme apontam Ortega e Lin (2004). Um dos parâmetros principais desses modelos é a estrutura de produto, ou *Bill of Materials* (BOM). Como se sabe, tal estrutura apresenta hierarquicamente as montagens, submontagens, componentes e matérias-primas que formam um dado produto final. De forma análoga a essa representação do produto, o planejamento da produção também é dividido em etapas e macroatividades hierárquicas. Os autores desse ramo de pesquisas em controle perceberam que o desdobramento da produção com base na estrutura de produtos podia ser representado como um sistema de produção e estoque utilizando-se um modelo de insumo-produto. Os modelos de análise de insumo-produto, inicialmente propostos por Leontief (1985), fornecem a oportunidade de se representar a transformação de um conjunto de recursos em produtos finais utilizando-se uma linguagem matemática eficiente. Nesse grupo de trabalhos, de acordo com Ortega e Lin (2004), realiza-se uma extensão vertical dos modelos de produção e estoque.

Axsäter¹⁰ (1976 apud ORTEGA; LIN, 2004 p. 2314) utilizou a árvore de produto como uma matriz de insumo num modelo dinâmico que descrevia um sistema de produção e estoque de um produto complexo. Popplewell e Bonney (1987) investigaram como múltiplos produtos, e múltiplos níveis de controle da produção podiam ser representados por meio dos modelos de controle linear discreto. Um modelo geral para múltiplos produtos, e múltiplos níveis de controle foi formulado e questões de estabilidade, resposta no período transiente e resposta a ruídos aleatórios foram analisados.

Um sistema baseado em decomposição temporal e desagregação de produto foi proposto por Davis e Thompson (1993). Neste trabalho, um conceito de controlador genérico foi introduzido e aplicado em cada nível hierárquico de planejamento da produção. Os autores desenvolveram uma definição matemática do problema de planejamento da produção incluindo as seguintes variáveis: previsão de demanda, quotas de produção, vendas, pedidos não atendidos (*backorder*), estoques, pessoal e capital disponível. O controlador genérico proposto pelos autores possui quatro funções básicas: (1) a função de avaliação (AF), (2) a função de otimização (OF), (3) a função de execução (EF) e (4) a função de monitoramento (MF). A primeira função é responsável pela especificação da decisão atual a ser apresentada ao controlador. A função de otimização determina uma solução para o problema em tempo real e fornece uma lei de controle da produção. A implementação desta lei de controle é realizada por meio da função de execução, que também fornece restrições essenciais de produção ao nível de planejamento seguinte. As saídas da função de execução, isto é, as respostas do sistema são então recebidas pela função de monitoramento, que verifica se o erro entre a resposta real do sistema e a resposta planejada encontra-se dentro de limites estabelecidos. Se os erros estão muito grandes, MF notifica AF e EF e lhes fornece parâmetros atualizados.

Alguns autores propuseram outros sistemas de controle e outros tipos de hierarquia, como, por exemplo, uma estrutura composta pelos níveis de fábrica, chão de fábrica, célula e equipamento. Para referências adicionais, deve-se consultar o trabalho de Ortega e Lin (2004).

Ainda nessa linha de abordagem hierárquica, destaca-se um grupo de trabalhos em que a análise de insumo-produto (também denominada análise de *input-output*), o conceito de desdobramento do MRP e a transformada de *Laplace* (ou a transformada Z) são inter-relacionados para gerar um modelo de produção e estoque de múltiplos níveis. Tal modelo foi

¹⁰ AXSÄTER, S. Balance of integrated production-inventory systems. In: SECOND EUROPEAN CONGRESS ON OPERATION RESEARCH, 1976, Amsterdam: North-Holland. **Proceedings...** p. 9-19.

inicialmente desenvolvido e apresentado por Grubström e Ovrin (1992), Grubbström e Molinder (1994) e Grubbström e Molinder (1996) e se aplica principalmente ao dimensionamento de lote. Assim, nesse modelo, devem ser tomadas decisões de produção individuais em um determinado horizonte de tempo, no que concerne a tamanhos de lote e momentos em que tais lotes devem ser produzidos. A função-objetivo adotada é a tradicional soma dos custos médios de *setup*, dos custos médios de manter produtos em estoque (capital imobilizado) e dos custos de falta de produtos.

As equações básicas de balanceamento de estoques e de faltas (*backlog*) são o ponto de partida para a representação matemática do modelo citado. Deve-se notar que o modelo apresentado não é exatamente um sistema de controle com realimentação, entretanto, ferramentas e da Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle são utilizadas para representar o problema, que é dinâmico no tempo. No modelo, a explosão das necessidades de materiais segundo a lógica do MRP é representada por uma matriz H . Em outras palavras, a estrutura de produto recebe uma representação matricial. Para representar a dimensão temporal do problema, tal matriz é multiplicada por um fator de atraso, que representa o *lead time* de produção ou aquisição τ_i de um determinado componente que integra um dado produto final. Como se sabe, no desdobramento das necessidades de material, surgem demandas internas por componentes que devem ser fabricados antes da montagem do produto final, denominadas demandas dependentes. Para representar essa defasagem temporal, esse atraso, cria-se uma matriz diagonal $\tilde{\tau}$, que contém, em sua diagonal principal, os *lead times* de fabricação dos componentes $(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)$ e os elementos $e^{s\tau_i}$. Dessa forma, obtém-se uma matriz $\tilde{H} = H \cdot \tilde{\tau}$, denominada pelos autores de matriz de entrada generalizada, que descreve as necessidades de componentes para determinado produto final, em termos de volumes e tempos em que eles são requeridos. Essa matriz, por sua vez, entra na equação de balanço do estoque efetivamente disponível, que depende do tempo, ou seja, depende da finalização ou não de determinadas ordens de fabricação. Nos sistemas de Controle, quando se deseja representar um atraso, utiliza-se exatamente esse termo e^{st_i} .

Outro ponto principal que aproxima os modelos supracitados da Teoria de Controle é, obviamente, a utilização das transformadas de Laplace, uma das principais ferramentas para tratamento matemático dos problemas dessa área. Na abordagem inicial, Grubström e Ovrin (1992) utilizam, na realidade, a transformada Z , que é equivalente à transformada de Laplace, porém aplicável ao domínio discreto. Nas versões seguintes, a partir do trabalho de Grubbström e Molinder (1994), o modelo passa a ser desenvolvido no domínio contínuo,

aplicando-se a transformada de Laplace propriamente. Além disso, a produção pontual de um lote individual num dado instante de tempo t , nos modelos, é representada pela função Delta de Dirac ou impulso unitário, a qual também é utilizada em Sistemas Dinâmicos e Controle.

Para a solução do modelo, a função-objetivo deve ser escrita em função das variáveis de decisão, ou seja, tamanhos de lote e os momentos de produção dos lotes. Conforme já mencionado, a função apresentada por Grubbström e Molinder (1996) considera os custos de setup, estoques e faltas. Assim, as equações de balanço de estoques e de faltas de produto são substituídas na função-objetivo, tornando-a explicitamente escrita em função das variáveis de decisão. Para minimização dessa função, utiliza-se o recurso básico do Cálculo diferencial e integral, que consiste igualar a zero as derivadas parciais dessa função em relação às variáveis de decisão e resolver a equação resultante.

A partir deste modelo básico discutido, são realizadas várias extensões e melhorias. Grubbström e Molinder (1996) propõem que a demanda externa por produtos finais seja modelada como um conjunto de eventos individuais aleatórios separados por intervalos de tempo também independentes e estocásticos. A distribuição de Poisson é adotada para representar essa demanda externa. Bogataj e Horvat (1996) também incluem no modelo inicial de Grubbström e Molinder (1994) uma incerteza relacionada à demanda externa, além de elementos da teoria de decisão, como árvores de decisão. Nesse caso, supõe-se tal demanda seja uniformemente distribuída e que sejam conhecidos apenas seus limites superiores e inferiores. Ao invés de utilizar os custos médios de produção e estoque, Bogataj e Horvat (1996) também propõem uma função-objetivo alternativa para o problema, a qual corresponde à maximização do valor presente líquido (VPL) de todos os pagamentos associados com o processo de produção e estocagem. A partir deste último trabalho citado, os demais desenvolvimentos nessa linha específica consideram o valor presente líquido na otimização, como é o caso de Grubbström e Tang (1999), Grubbström e Tang (2000), Zhou e Grubbström (2004) e Grubbström et al (2010).

Ainda como extensão dessa teoria, Grubbström e Tang (1999) buscam definir os níveis ótimos de estoque de segurança diante de uma demanda estocástica, cujo intervalo entre eventos segue uma distribuição Gama. A possibilidade de replanejamento dos tamanhos de lote e de suas datas de produção é considerada pela primeira vez no modelo de Grubbström e Tang (2000). Nos modelos anteriores, as decisões se referiam à definição de atividades a serem realizadas no tempo, sem que houvesse a oportunidade de ajuste das futuras decisões quando circunstâncias internas ou externas se modificavam. Zhou e Grubbström (2004), por outro lado, utilizam a mesma estrutura básica do modelo inicial para investigar o efeito da

comunalidade de componentes, ou seja, do uso de um mesmo componente em diferentes localizações dentro da estrutura de produto. Grubbström (2005) e Grubbström et al (2010), por outro lado, investigam uma condição necessária para a otimalidade de um determinado plano de produção gerado por este modelo de dimensionamento de lotes. Segundo os autores, esta condição fornece a oportunidade de se formular o problema de dimensionamento utilizando-se variáveis binárias de decisão. Assim, o número de possíveis pontos de reposição se reduz a um conjunto finito de alternativas. Nesse caso, há 2^{m-1} alternativas, sendo que m é o número de eventos de demanda externa. Dentre essas alternativas, pelo menos uma solução é ótima. Considerando-se esta situação, o plano de ótimo de produção pode ser obtido aplicando-se um algoritmo denominado pelos autores de Algoritmo Triplo. Grubbström (2005) analisa essa condição de otimalidade para um modelo de apenas um nível, enquanto Grubbström et al (2010) estendem essa análise para um sistema cuja estrutura de produto possui múltiplos níveis. Observou-se que a condição de otimalidade continua válida para o caso mais complexo.

Há ainda outras extensões desse modelo básico de produção e estoque com múltiplos níveis e estágios, as quais podem ser encontradas em outros trabalhos envolvendo esse grupo de autores citados. De qualquer forma, com base na revisão apresentada, nota-se que esse tipo de modelo tem sido bastante explorado, fazendo com que a pesquisa nessa subárea específica adquira um elevado grau de maturidade. Uma possível desvantagem desse tipo de modelo é sua complexidade. Conforme destacam Grubbström e Molinder (1996), o aumento do número de níveis da estrutura de produto de um para dois aumenta consideravelmente o grau de complexidade das expressões analíticas que representam o modelo.

3.3 Lacunas e oportunidades de pesquisa na área de Controle aplicado a Sistemas de Produção

Conforme mencionado, duas áreas básicas de pesquisa relacionadas à aplicação da Teoria de Controle aos sistemas de produção foram identificadas por Ortega e Lin (2004). A primeira delas foca-se na gestão da cadeia de suprimentos e na extensão dessas aplicações na direção horizontal, enquanto a segunda foca na extensão vertical dos modelos, ou seja, abrange sistemas de múltiplos níveis, relacionados ao desdobramento da estrutura de produto. Com base na revisão apresentada, pode-se observar que a Teoria de Controle é aplicada

principalmente para reduzir a variação no nível de estoque, reduzir o efeito chicote, otimizar a política de reposição dos estoques e otimizar os tamanhos de lote.

Os autores supracitados identificam duas áreas oportunas para desenvolvimento deste campo de pesquisa. Primeiramente, nota-se que todos os modelos se baseiam em vários parâmetros que são constantes no tempo. Nas aplicações em sistemas mecânicos ou eletrônicos, estes parâmetros podem ser calculados de maneira relativamente fácil, mas para sistemas de estoques, nenhum dos autores apresenta uma forma sistemática e mais adequada para estimar esses parâmetros.

Em segundo lugar, o desenvolvimento do sistema de controle é geralmente orientado a um determinado nível, ou seja, cadeia de suprimentos, fábrica/planta ou linha/célula. Entretanto, há elementos que desempenham funções similares em sistemas de produção e estoque pertencentes a diferentes níveis da hierarquia de produção. É possível observar analogias entre sistemas e elementos de diferentes níveis; assim, uma oportunidade de pesquisa futura pode ser o desenvolvimento de uma estrutura de modelagem uniforme e genérica aplicável aos três diferentes níveis ao invés de utilizar uma modelagem diferente para cada nível de planejamento da produção.

Além das lacunas e oportunidades de pesquisa relatadas, observa-se que na revisão apresentada por Ortega e Lin (2004) se encontram muito poucos trabalhos que abordam a programação de operações (*Scheduling*) e o controle da produção de curto prazo, no chão de fábrica. Nesta revisão, são mencionados os trabalhos de Wang et al (1995) e Wiendahl e Breithaupt (2000), entretanto, este último não foi classificado em nenhuma das duas áreas de extensão.

Como mencionado na seção anterior, um conceito bastante consolidado na área de Planejamento e Controle da Produção (PCP) é a divisão do planejamento em níveis hierárquicos. Tal divisão é a adotada por muitos autores em PCP como Sipper e Bulfin (1997), Nahmias (2001), Vollman (2005), Correa e Ganesi (2007), entre vários outros. A maioria dos autores considera três níveis de planejamento: o nível agregado, em que o planejamento é feito para famílias de produtos e recursos agregados, num horizonte de tempo de médio prazo; o nível de programa mestre, no qual se realiza o planejamento de produção de produtos finais no curto prazo; e o nível de MRP (*Material Requirements Planning*), no qual se utiliza a árvore do produto para desdobrar o programa mestre em um plano detalhado de necessidades de materiais e componentes. O controle da produção, por sua vez, foca-se no nível de programa mestre, e MRP e ainda em níveis mais inferiores, como a liberação de

ordens, a programação de operações e o controle de chão de fábrica. Alguns autores também classificam esses níveis mais inferiores como planejamento detalhado de curtíssimo prazo.

Foi possível observar que a maioria dos trabalhos desenvolvidos na área de extensão vertical dos modelos foca-se nos níveis específicos de programa mestre e MRP em relação à hierarquia do PCP apresentada. Entretanto, alguns trabalhos recentes têm sido desenvolvidos na área de programação de operações utilizando princípios da Teoria de Controle e da Modelagem de Sistemas Dinâmicos. Assim, sugere-se a definição de uma terceira subárea de classificação dos sistemas de controle da produção baseados na Teoria de Controle, a área de Planejamento Detalhado, que engloba a programação de operações e o controle da produção de curto prazo. Tais atividades são reconhecidamente importantes para as empresas de manufatura, pois afetam diretamente o desempenho da empresa e podem trazer ganhos de custo ou até mesmo ganhos estratégicos, como a capacidade de atender os clientes num prazo competitivo. Um resumo das subáreas de classificação dos modelos, incluindo a nova subárea proposta, é apresentado na Figura 3.3.

Subáreas dos Sistemas de Controle da Produção baseados na Teoria de Controle e Modelagem de Sistemas Dinâmicos

Figura 3.3 – Subáreas de classificação dos Modelos de Planejamento e Controle da Produção baseados na Teoria de Controle

3.4 Teoria de Controle e Modelagem de Sistemas Dinâmicos aplicada à programação de operações (*Scheduling*) e ao controle de produção de curto prazo

A programação de operações trata da alocação de um conjunto de recursos no tempo para a realização de um determinado conjunto de tarefas ou atividades. Atualmente, faz-se necessário desenvolver, nesta área, modelos de controle que atendam a paradigmas de manufatura nos quais há perturbações dinâmicas na produção, tais como mudanças nas necessidades do consumidor, absenteísmo ou quebras de máquinas, inserção de pedidos urgentes ou cancelamento de pedidos, etc. (LI ET AL, 2011). Essas dinâmicas fazem com que algumas heurísticas e modelos de programação de operações não sejam adequadas ao controle da produção em determinados ambientes. Em outras palavras, há a necessidade de se desenvolver modelos automáticos de controle da produção. Para este fim, as teorias de Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Controle se mostram, a princípio, adequadas. A aplicação de tais teorias a problemas de programação de operações, entretanto tem sido considerada uma questão difícil devido às características discretas e altamente não-lineares do tempo de fila dos componentes em um modelo.

Nas seções subsequentes serão discutidos três modelos baseados nos princípios de Controle e Modelagem de Sistemas Dinâmicos, aplicados à programação de operações e ao controle de produção de curto prazo.

3.4.1 Sistema de controle e programação de operações baseado na heurística da alavanca

Li et al. (2011) propõem um sistema de programação de operações que contém um laço de realimentação e foi implementado com auxílio de computador. Entretanto, neste trabalho, a programação é realizada com base em uma heurística, ou seja, não é o próprio controlador que gera esta programação. Em linhas gerais, a reprogramação dos trabalhos é realizada com base em simulações e na reaplicação da heurística às novas condições do problema. O simulador utilizado pelos autores é denominado THOCPN-CS, e foi desenvolvido com base em redes de Petri. Na Figura 3.4 a seguir apresenta-se o sistema desenvolvido por Li et al. (2011):

Figura 3.4 – Sistema de controle e programação de operações assistido por computador. Fonte: Adaptado de Li et al. (2011)

No sistema proposto, os passos a serem seguidos para a programação e reprogramação das operações são os seguintes:

1. Alocar os possíveis recursos de manufatura (e.g. operadores e máquinas) a cada estágio de produção, obtendo uma matriz de recursos (Matriz de Recursos e Tarefas, MRT).
2. Programar os trabalhos utilizando a heurística APT-LVR (*Average Processing Time - Leverage*), a qual será detalhada mais adiante.
3. Simular a produção e identificar quais estágios são os gargalos. Os programadores devem então realocar operadores e máquinas nos estágios de modo a tornar o fluxo de produção mais suave.
4. Reprogramar os trabalhos utilizando a heurística APT-LVR.
5. Repetir os passos 3 e 4, isto é, completar a fase de programação *offline* até que um resultado satisfatório seja obtido. A programação resultante deve conter a sequência dos trabalhos e o número de operadores e máquinas em cada estágio.
6. Entregar a programação ao chão de fábrica e trocar a chave do laço de controle do bloco de simulação para o bloco do chão de fábrica mostrado na Figura 3.4.
7. Se alguma perturbação ocorrer no chão de fábrica, voltar ao passo 3 caso seja necessária a realocação de operadores e máquinas ou voltar ao passo 4, estabelecendo o laço de controle.

A heurística desenvolvida pelos autores se baseia em uma extensão do algoritmo de Johnson, na qual se utiliza o tempo médio de processamento (*Average Processing Time*, APT)

e o conceito de alavanca para gerar diferentes sequências de processamento. Ao final, a melhor sequência é escolhida. De forma mais detalhada, as m máquinas são agrupadas em duas máquinas virtuais várias vezes. A cada vez, máquinas diferentes são selecionadas para compor os agrupamentos, ou seja, para formar as máquinas virtuais 1 e 2.

O conceito de alavanca vem de uma analogia com o cálculo dos momentos (ou torques) associados a forças pontuais que agem sobre uma viga. A Figura 3.5 mostra uma linha com m máquinas modelada como uma alavanca. Cada máquina age com uma força pontual de magnitude d_{ij} , sendo d_{ij} um vetor que representa as diferenças entre o tempo de processamento das tarefas numa dada máquina e a média de todos os tempos de processamento (APT). Um contador (Ctr) é utilizado como variável auxiliar para definir a divisão das máquinas em dois agrupamentos. Conforme esse contador se move ao longo da viga, calcula-se a somatória dos momentos de um lado do contador e de outro lado do contador. Assim, o momento associado à máquina M_j será a diferença d_{ij} multiplicada pela distância entre M_j e o contador. As distâncias entre as máquinas são consideradas unitárias. As duas somatórias dos momentos correspondem aos vetores associados às duas máquinas virtuais. O algoritmo de Johnson é então aplicado a esses vetores para gerar uma sequência de tarefas.

Figura 3.5 – Conceito de alavanca para uma linha com m máquinas. Fonte: adaptado de Li et al (2011)

A heurística de Li et al. (2011) foi avaliada por meio de testes com dados de *benchmarking*, ou seja, conjuntos de dados disponíveis na literatura para a realização de testes comparativos. Além disso, o sistema completo, com os laços de controle, foi avaliado por meio de um estudo de caso em uma indústria de portas e janelas. Nesta indústria havia 1396 tarefas que deveriam passar por um fluxo em linha com 5 estágios em um dia de produção. Utilizando-se o sistema proposto, obteve-se uma melhora de desempenho de 1,49% em relação ao sistema de programação já implantado na empresa estudada. Esta redução de

tempo na produção diária equivale a 20 produtos adicionais em um dia, ou \$6000 em receita (LI ET AL., 2011).

3.4.2 *Sistemas de controle e programação de operações baseados em controladores das datas de chegada das tarefas*

Prabhu (1995), Prabhu e Duffie (1999) e Cho e Erkok (2009) apresentam uma abordagem na qual um controlador integral é utilizado para a programação de operações segundo a estratégia just-in-time, na qual os desvios em relação à data de entrega, tanto em termos de atraso ou adiantamento, são penalizados. O sistema de malha fechada, denominado *Distributed Arrival Time Controller* (DATC), é responsável por ajustar a data de chegada a_i de uma determinada tarefa i de forma iterativa para que esta seja completada o mais próximo possível de sua data de entrega, d_i . No modelo proposto, um módulo de simulação da dinâmica de chão de fábrica calcula a data de término das tarefas com base na sua data de chegada e nos tempos de processamento informados. A Figura 3.6 apresenta o sistema múltiplo de controle que forma a estrutura do DATC.

Figura 3.6 – Estrutura de controle de malha fechada do DATC. Fonte: Cho e Erkok, 2009.

Como pode-se observar na Figura 3.6, há um controlador embarcado para cada tarefa, e este controlador ajusta a data de chegada da tarefa com base no valor de erro da variável de saída do sistema, ou seja, a data de término c_i , em relação ao valor de referência, a data de entrega d_i . A data de término é calculada pelo simulador com base na regra de despacho FCFS (*First Come, First Served*) ou "primeiro a chegar, primeiro a ser servido". Esta regra é aplicada em cada iteração, com base nas datas de chegada atualizadas de cada tarefa. O DATC pode ser classificado como um controlador integral, uma vez que o ajuste das datas de

chegada é realizado com base nos erros acumulados. Assim, segundo Cho e Erkoç (2009), a data de chegada de cada tarefa i pode ser expresso como:

$$a_i(t) = k_i \sum_{m=0}^{t-1} [d_i(m) - c_i(m)] + a_i(0) = k_i \sum_{m=0}^{t-1} z_i(m) + a_i(0), \quad (3.3)$$

onde $a_i(t)$, $c_i(t)$, $d_i(t)$ e $z_i(t)$ representam, respectivamente, a data de chegada, a data de término, a data de entrega e o desvio entre a data de término e a data de entrega, todos relativos à tarefa i ; k_i representa o ganho integral do controlador da i -ésima tarefa.

A equação equivalente à 3.3, no domínio contínuo, seria a seguinte:

$$a_i(t) = k_i \int_0^t [d_i(\tau) - c_i(\tau)] d\tau + a_i(0) = k_i \int_0^t z_i(\tau) d\tau + a_i(0), \quad (3.4)$$

No sistema proposto por Cho e Erkoç (2009), a métrica utilizada para avaliação da qualidade da programação é o desvio quadrático médio (*Mean Squared Deviation, MSD*) das datas de término em relação às datas de entrega:

$$MSD(t) = \frac{\sum_i (d_i(t) - c_i(t))^2}{n} \quad (3.5)$$

Nas equações 3.3 e 3.4 apresentadas, assim como na equação 3.6 e na Figura 3.7 seguintes, manteve-se a notação original dos autores supracitados, na qual as variáveis são escritas em função da variável de tempo t . Entretanto, analisando-se os trabalhos de Prabhu e Duffie (1999) e Cho e Erkoç (2009), deduz-se que esta variável t representa, na realidade, as iterações do método proposto, e não o tempo real propriamente dito. Os autores mencionados comentam que o controlador integral do DATC funciona como um mecanismo de busca, substituindo as heurísticas utilizadas nas abordagens tradicionais. Em resumo, o DATC é uma heurística aplicável a um conjunto finito de tarefas, visando programá-las de forma a minimizar os atrasos em relação a datas de entrega predeterminadas. Assim sendo, o modelo é adequado a uma situação estática de programação, não dinâmica. Essa discussão será retomada com mais detalhes no subitem 3.4, quando os modelos apresentados são comparados.

Deve-se mencionar também que, no DATC, os controladores estão distribuídos nas tarefas e o cálculo dos erros e ajuste das datas de chegada é feito com informação global limitada, uma vez que a atuação de cada controlador é independente dos demais, como pode ser visto nas equações 3.3 e 3.4. Além disso, a resposta do modelo depende da relação entre

os tempos de processamento e as datas de entrega das tarefas. Se tais datas são inviáveis, isto é, são muito próximas e não podem ser atendidas simultaneamente devido à escassez de recursos, a trajetória das datas de chegada converge para um valor estacionário, independentemente da condição inicial dessas datas de chegada, conforme foi demonstrado por Prabhu e Duffie (1999). Por outro lado, quando as datas de entrega são viáveis, a trajetória das datas de chegada de cada tarefa i converge para o valor $d_i - p_i$, sendo d_i a data de entrega da tarefa i e p_i o seu tempo de processamento. Assim, Cho e Erkoc (2009) destacam que o desempenho da programação do DATC, em termos de desvio médio quadrático em relação às datas de entrega depende da qualidade desse valor estacionário e da sequência de processamento, ou seja, da ordem relativa das datas de chegada. Por este motivo, é importante que o projeto do controlador do DATC seja desenvolvido de forma a direcionar a trajetória das datas de chegada a uma região na qual a qualidade da programação seja garantida.

Cho e Erkoc (2009) apresentam uma análise detalhada do comportamento do DATC. Mais especificamente, os autores analisam a trajetória das datas de chegada e das datas de término para o caso de máquina única com duas tarefas a serem programadas. Para esta análise, toma-se o caso em que as tarefas possuem as mesmas datas de entrega. Nesse caso, conforme mencionado, o sistema converge para um único valor estacionário. Na Figura 3.7, estão representadas a trajetória das datas de chegada das duas tarefas, em vermelho e com marcadores circulares, e a trajetória das datas de término, em azul e com marcadores em x.

Figura 3.7 – Trajetórias das datas de chegada e término no DATC no espaço dos estados. Simulação feita em Matlab com base no trabalho de Cho e Erkoc (2009). Fonte: próprio autor.

O gráfico apresentado na Figura 3.7 é referente à aplicação do DATC a um problema com os seguintes dados:

- datas de chegada iniciais das tarefas $a_1(0) = 0$ e $a_2(0) = 5$, que originam o primeiro ponto da curva em vermelho;
- datas de entrega iguais, $d_1 = 10$ e $d_2 = 10$, representadas pelo ponto d do gráfico;
- tempos de processamento das tarefas $p_1 = 1$ e $p_2 = 2$, fornecidos como dados de entrada ao simulador de chão de fábrica para cálculo das datas de término.

Conforme dito anteriormente, a variável t que aparece nos eixos do gráfico é relativa às iterações. Os resultados de cada iteração estão destacados no gráfico por meio dos marcadores.

Na Figura 3.7 observa-se a existência de uma região de descontinuidade na trajetória das datas de término, ocasionada pela ocorrência de datas de chegada idênticas nas iterações finais, como pode ser visto na curva em vermelho. A reta de descontinuidade, para a qual $a_1 = a_2$, divide o espaço em dois semiplanos. Cada semiplano é associado a uma sequência de processamento, $\langle 1,2 \rangle$ ou $\langle 2,1 \rangle$. Para os pontos que estão no semiplano $\langle 1,2 \rangle$, tem-se $a_1 < a_2$. Logo, a tarefa 1 é executada antes da tarefa 2, pois segue-se a regra FCFS (*First Come, First Served*). Quando há empate nas datas de chegada calculadas pelo modelo, usa-se um critério arbitrário de desempate, o que resulta em mudanças descontínuas na trajetória das datas de término, pois ora executa-se a sequência $\langle 1,2 \rangle$, ora a sequência $\langle 2,1 \rangle$. Estas mudanças descontínuas, por sua vez, implicam mudanças instantâneas no vetor de desvio entre a data de término e a data de entrega (vetor $\mathbf{z}(t)$), fazendo com que a trajetória das datas de chegada mova-se para a outra região em relação à reta de descontinuidade. Isso causa inversões na sequência de processamento, resultando na oscilação das datas de término.

Segundo Cho e Erkoc (2009), esse comportamento oscilatório faz com que diferentes sequências de processamento sejam varridas, possibilitando que este sistema seja utilizado como um mecanismo de busca por programações ótimas ou quase ótimas, substituindo as heurísticas convencionais. Entretanto, os autores destacam que tal comportamento é imprevisível em relação à frequência de visita das sequências de processamento. No exemplo apresentado na Figura, as datas de entrega são idênticas e representadas pelo ponto $d(10,10)$ localizado sobre a reta de descontinuidade. Nesse caso, observou-se que a sequência $\langle 2,1 \rangle$ é visitada com uma frequência duas vezes maior do que a sequência $\langle 1,2 \rangle$. Também é possível notar que a sequência $\langle 2,1 \rangle$ é ótima, uma vez que as distâncias entre a data de entrega e os pontos das datas de término no semiplano referente a esta sequência é menor do que as distâncias dos pontos equivalentes no semiplano referente à sequência $\langle 1,2 \rangle$. Os autores

mencionados também ressaltam que, no DATC, a trajetória das datas de chegada até atingir o valor estacionário não é ótima, como se pode observar no gráfico da Figura 3.7. Nesse gráfico, pode-se traçar uma reta o que é ortogonal à reta de descontinuidade, passando pelo ponto d . Sobre essa reta o , as distâncias entre as retas tracejadas, referentes às datas de término, e a data de entrega são mínimas. Esta reta corresponde a um hiperplano no caso geral, que pode ser considerado o “plano ótimo” dos desvios em relação à data de entrega.

Visando melhorar a previsibilidade e o comportamento dinâmico do DATC, especialmente em relação à varredura das sequências de processamento, são propostos dois outros modelos. Cho e Ercok (2009) propõem um controlador integral duplo, DIAC (*Double Integral Arrival Time Controller*), enquanto Cho e Lazaro (2010) propõem a utilização de um controlador PID, ou seja, um controlador proporcional integral derivativo.

No caso do controlador integral duplo DIAC, as datas de chegada da i -ésima tarefa são dados por:

$$a_i(t) = k_i \iint_t z_i(\tau) d\tau + a_i(0), \quad (3.6)$$

onde $a_i(t)$, $z_i(t)$ e k_i são os mesmos parâmetros que foram definidos para a equação 3.3.

A diferenciação dupla da equação 3.6 resulta em uma equação diferencial de segunda ordem que, de acordo com os autores, representa a dinâmica do DIAC. Assim, nesse sistema, a trajetória das datas de chegada oscila dentro de uma faixa que inclui o valor estacionário, diferentemente do DATC, em que a trajetória converge sem oscilação para o valor estacionário. De acordo com Cho e Ercok (2009), o DIAC permite uma melhor previsibilidade da trajetória das datas de chegada. A direção inicial dessa trajetória, bem como a frequência e amplitude das oscilações pode ser prevista por equações analíticas com menos de 10% de erro em relação aos resultados das simulações. Enquanto o DATC visita diferentes sequências de processamento, dependendo do valor dos ganhos do controlador, visita as sequências com um padrão determinado, independente dos valores dos ganhos do sistema.

Para a avaliação do DIAC, os autores mencionados utilizaram algumas instâncias de problemas de máquina única para as quais o valor ótimo global é conhecido. Os desvios em relação ao ótimo global variaram em torno de 0% a 4%, em média. Para problemas de grande escala, o desempenho do DIAC foi comparado com o desempenho do DATC, sendo o primeiro superior ao segundo. Alguns poucos testes foram realizados para uma configuração de fluxo *job shop* simples, com três máquinas. O desempenho do DIAC também foi superior,

entretanto, observa-se a necessidade de realização de uma quantidade e variedade maior de testes para a avaliação mais consistente do sistema.

Cho e Lazaro (2010) também observaram algumas limitações na estrutura do DATC especialmente em relação a sua aplicação na reprogramação de operações. Assim, conforme mencionado, os autores propuseram a utilização de um controlador PID. Para este controlador, as datas de chegada podem ser expressas de acordo com a equação 3.7:

$$a_i(m) = k_p z_i(m-1) + k_i a_i(m-1) + k_d [z_i(m-1) - z_i(m-2)], \quad (3.7)$$

em que m denota a m -ésima iteração. No primeiro termo da soma o ganho proporcional k_p do controlador incide sobre o sinal de erro, que corresponde ao desvio entre a data de término e a data de entrega das tarefas; na segunda parcela tem-se ganho integral k_i multiplicado pela própria data de chegada calculada no instante anterior e, por fim, na terceira parcela, o ganho k_d está multiplicando a derivada discreta do sinal do erro. Segundo a Teoria de Controle, em um controlador PID, o termo proporcional tem a função de reduzir o desvio entre data de término e o parâmetro de referência, a data de entrega, deixando um erro sistemático em relação a esta última. Este erro sistemático é corrigido pelo termo integral do controlador. Entretanto, este último termo tende a gerar uma instabilidade, a qual é reduzida pelo termo derivativo.

Cho e Lazaro (2010) realizaram a ajustagem dos ganhos do controlador PID utilizando um método iterativo de aprendizagem estatística. Neste método, diferentes valores de ganho foram testados em um conjunto de problemas de máquina única com valores ótimos de MSD conhecidos. Assim, foram obtidos os valores de ganho que minimizam o MSD. O desempenho do controlador PID foi comparado ao desempenho do DATC em relação a esse mesmo conjunto de problemas utilizado na ajustagem dos ganhos, mostrando-se superior. Deve-se observar, entretanto, que tais testes podem ser enviesados, já que o mesmo conjunto de problemas foi utilizado para a ajustagem e os testes.

Os autores mencionados também realizaram simulações computacionais com problemas de máquina única de diversos tamanhos (incluindo até 100 tarefas) e com determinados limites inferiores e superiores para os tempos de processamento. Nesses casos, os autores observaram que o desempenho do controlador PID superou em aproximadamente 15% o desempenho do DATC. Além disso, Cho e Lazaro (2010) constataram que o controlador proposto pode ser utilizado para programação sujeita à condição de quebra de máquinas, desde que os ganhos sejam ajustados adequadamente.

Uma questão que suscita desses testes é se os valores ótimos de ganho obtidos a partir de um conjunto limitado de problemas podem ser generalizados para outros problemas. Entende-se que uma maior variedade e volume de testes sejam necessários para responder a essa questão. Assim, observa-se que o problema de ajustagem dos ganhos do controlador proposto por Cho e Lazaro (2010) ainda não está totalmente dirimido. Além disso, há espaço para se testar este sistema em configurações mais complexas de fluxo de produção, como *flow shops* e *job shops*.

3.4.3 Sistema de controle baseado em um modelo de fluxo contínuo

Wiendahl e Breithaupt (1999) e Wiendahl e Breithaupt (2000) apresentam um sistema de Controle Automático da Produção (*Automatic Production Control*, APC) baseado em um modelo de fluxo no domínio contínuo do tempo. O sistema é aplicável ao nível de planejamento de curto prazo dentro da hierarquia do PCP, ou seja, provê uma visão um pouco mais global do que aquela relativa ao nível operacional mais baixo da programação de operações. O sistema também é voltado para planejamento e controle do chão de fábrica, entretanto, não trabalha com tarefas discretas e sim com taxas de ordens de produção. Segundo os autores, a utilização de um modelo de fluxo - em que as ordens de produção se comportam como um fluido em escoamento - é uma vantagem, já que a Teoria de Controle oferece mais métodos de desenvolvimento e análise para modelos contínuos do que para modelos discretos. Os autores citados propõem um modelo estocástico de fluxo para o ambiente *job shop* baseado no Modelo do Funil e na Teoria das Curvas Logísticas de Operação, que serão apresentados mais adiante.

Com base no trabalho de Chen e Mandelbaum (1994), Wiendahl e Breithaupt (2000) apresentam a seguinte equação para descrever o estoque em processo (*Work In Process*, WIP) de um centro de trabalho ligado em uma rede de fluxo no domínio contínuo do tempo:

$$mwip_{order,k}(t) = mwip_{order,k}(0) + extin_{order,k}(t) + \sum_{j=1}^k [out_{order,max,j}(t) - out_{order,loss,j}(t)]p_{j,k} - [out_{order,max,k}(t) - out_{order,loss,k}(t)], \quad (3.8)$$

sendo que:

$mwip_{order,k}(t)$ = estoque em processo médio do centro de trabalho k no tempo t (em número de ordens),

$mwip_{order,k}(0)$ = estoque em processo médio inicial (em número de ordens),

$extin_{order,k}(t)$ = ordens de entrada externas acumuladas no centro k até o tempo t (em número de ordens),

$out_{order,max,j}(t)$ = fluxo potencial de ordens advindas do centro j (a montante de k), acumulado até o tempo t (em número de ordens),

$out_{order,loss,j}(t)$ = potencial de perda de fluxo acumulado até o tempo t quando o centro j , a montante de k , está vazio (em número de ordens),

$out_{order,max,k}(t)$ = fluxo de saída potencial do centro k , acumulado até o tempo t (em número de ordens),

$out_{order,loss,k}(t)$ = potencial de perda de fluxo acumulado até o tempo t quando o centro k está vazio (em número de ordens),

$p_{j,k}$ = fração do total de ordens que saem do centro j e seguem diretamente para o centro k .

Como pode ser visto no lado direito da equação 3.8, o estoque em processo do centro de trabalho k em um dado instante t depende do estoque em processo inicial, das entradas externas acumuladas, da entrada acumulada oriunda dos centros de trabalho a montante e da saída acumulada do próprio centro k . Em resumo, o estoque em processo de um dado centro de trabalho é resultado da diferença entre o fluxo de entrada e o fluxo de saída, somada ao estoque em processo inicial. Assim, o segundo termo do lado direito da equação 3.8 e o somatório representam o fluxo de entrada, enquanto o último termo entre colchetes expressa o fluxo de saída do centro k .

Para tornar essa equação adequada à aplicação da Teoria de Controle no domínio contínuo do tempo, é necessário converter as dimensões expressas em número de ordens discretas para dimensões que considerem o conteúdo de trabalho em horas, por exemplo. Essa conversão é feita multiplicando-se as variáveis com tais dimensões discretas pelo tempo médio de processamento das ordens em um dado centro de trabalho, mot . Dessa forma, a equação 3.8 se transforma em:

$$\begin{aligned}
mwip_k(t) = & mwip_k(0) \\
& + \left(extinr_{order,k}(t) \right. \\
& + \sum_{j=1}^k [out_{j,max}(t) - out_{j,loss}(t)] \frac{1}{mot_j} p_{j,k} \left. \right) mot_k \\
& - [out_{k,max}(t) - out_{k,loss}(t)] ,
\end{aligned} \tag{3.9}$$

sendo $mwip_k(t)$ = estoque em processo médio do centro de trabalho k no tempo t , em conteúdo de trabalho [h] e mot_k = tempo médio de processamento de ordens no centro k [h].

As demais variáveis da equação 3.9, como $out_{j,max}$, $out_{j,loss}$, etc., são definidas de forma análoga às que aparecem na equação 3.8; suas dimensões, entretanto, são relativas a conteúdo de trabalho em horas [h].

Segundo Wiendahl e Breithaupt (2000), embora seja relativamente fácil determinar o estoque em processo inicial, as entradas externas e a saída acumulada de cada centro de trabalho, não é trivial definir-se a relação entre as perdas na utilização ($out_{loss,k}$) e o nível de estoque em processo momentâneo. Para resolver esta última questão, aplica-se o Modelo do Funil e a teoria das Curvas Logísticas de Operação, conforme mencionado. De acordo com Wiendhal (1995), a equação do funil estabelece que:

$$mwip_{work} = mper.mr, \tag{3.10}$$

onde: $mwip_{work}$ representa o estoque em processo médio, expresso em conteúdo de trabalho [h] e não em número de ordens; $mper$ é o desempenho médio, medido em horas por dia útil [h/d.u.]; e mr é o *lead time* médio, em dias úteis. Na linguagem original do trabalho, os autores utilizam a terminologia *mean range* para expressar o *lead time* médio.

É possível notar a similaridade desta formula em relação à Lei de Little (LITTLE, 1961), da Teoria de Filas. Wiendahl e Breithaupt (2000) destacam, entretanto, que o modelo de funil é baseado em conteúdo de trabalho e não em ordens individuais, discretas, como ocorre na Teoria de Filas. Além disso, na Lei de Little, a relação entre as variáveis envolve a taxa de chegada das ordens, enquanto no modelo de funil foca-se na taxa de saída, ou no desempenho médio, o qual, em última análise, está relacionado à capacidade do centro de trabalho. Analogamente, o *lead time* médio na Lei de Little equivale ao *range* médio no modelo do funil. Esta última variável está relacionada ao tempo médio que um centro de

trabalho leva para processar o fluxo de ordens entrantes. No modelo, as ordens entrantes, medidas em horas de conteúdo de trabalho, formam um estoque de lotes pendentes, os quais devem passar pela saída do funil. O diâmetro dessa saída representa a capacidade do centro de trabalho, a qual também é expressa em função de conteúdo de trabalho (como uma taxa de conteúdo realizado por dia de calendário). Em resumo, a equação do funil mostra que o *lead time* médio das ordens a serem processadas em um centro de trabalho varia em função do estoque de ordens pendentes e o desempenho desse centro, o que é bastante intuitivo.

Entretanto, a equação do funil ainda não é suficiente para que se determine a relação entre as perdas em utilização ($out_{loss,k}$) e o nível de estoque em processo na equação (3.9). Para preencher essa lacuna, Wiendahl e Breithaupt (1999) e Wiendahl e Breithaupt (2000) fazem uso da teoria das Curvas Logísticas de Operação, a qual estabelece a ligação entre os valores médios de estoque em processo, *lead time* e desempenho. De acordo com tal teoria, a saída de um centro de trabalho é independente do estoque em processo médio desde que todo centro de trabalho do sistema tenha sempre um estoque temporário de ordens pendentes. Neste caso, o desempenho ou saída do sistema é igual à sua capacidade real máxima. Perdas na produção ocorrerão somente se esse estoque temporário for reduzido, devido a interrupções no fluxo de material. É interessante notar que esta teoria é muito similar à apresentada por Hopp e Spearman's (1996) para a análise do comportamento dinâmico de sistemas *flow shop*. Segundo os autores supracitados, a taxa de saída do sistema satura em um determinado patamar depois que se atinge um nível crítico de estoque em processo. A partir desse nível crítico, o valor da taxa de saída torna-se insensível a qualquer aumento adicional no estoque em processo. Deve-se mencionar, no entanto, que as definições de estoque em processo diferem para cada uma das teorias citadas, uma vez que no primeiro caso, o estoque em processo é expresso em função de conteúdo de trabalho e, no segundo, em número de ordens.

Ainda de acordo com a teoria apresentada por Wiendahl (1995), o *lead time* médio decresce em função da redução do estoque em processo até que um valor mínimo seja atingido. Esse *lead time* mínimo corresponde à soma entre os tempos médios de processamento e de transporte das ordens. O mínimo ideal de estoque em processo ($mwip_{min}$) representa o nível necessário para rodar o sistema, de forma que as ordens que chegam não tenham que esperar e o fluxo de material não seja interrompido. Analogamente, este parâmetro corresponde ao nível crítico de estoque em processo definido por Hopp e Spearman (1996). Wiendahl e Breithaupt (2000) destacam que esse nível mínimo de WIP, na prática, não pode ser atingido exatamente e, por isso, as curvas realistas diferem das ideais, conforme pode ser visto na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Curvas logísticas mostrando a interdependência entre desempenho, *lead time* e estoque em processo (WIP). Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).

As equações paramétricas que representam a curva logística de desempenho versus estoque em processo para um sistema *job shop*, de acordo com Nyhuis (1998) apud Wiendahl e Breithaupt (2000), são as seguintes:

$$mwip(x) = mwip_{min}(1 - (1 - \sqrt[4]{x})^4) + mwip_{min}\alpha_1 x, \quad (3.11)$$

$$mper(x) = mper_{max}(1 - (1 - \sqrt[4]{x})^4), \quad (3.12)$$

sendo:

$mwip(x)$ = estoque em processo médio [h],

$mper(x)$ = desempenho médio por dia útil [h/d.u.],

$mwip_{min}$ = mínimo ideal para o estoque em processo médio [h],

$mper_{max}$ = desempenho máximo real [h/d.u.],

α_1 = constante de alongamento da curva (valor padrão = 10),

x = parâmetro em função do qual a equação paramétrica é escrita, sendo que, nesse caso, $0 < x < 1$.

O valor mínimo de estoque em processo para um centro de trabalho, considerando um conjunto de ordens diferentes, pode ser calculado em termos dos tempos médios de

processamento e transporte daquele conjunto de ordens, utilizando-se um critério adequado de ponderação. Detalhes desse cálculo podem ser encontrados em Wiendahl (1995) e Wiendahl e Breithaupt (2000).

A partir das equações 3.11 e 3.12, pode-se obter os valores de desempenho correspondentes a diversos níveis de estoque em processo. Com base nesses pares de valores, os valores de *lead time (range)* podem ser determinados utilizando-se a equação do funil. Finalmente, tendo-se diversos pontos das curvas logísticas, é possível determinar a saída real dos centros de trabalho, em termos de conteúdo de trabalho processado, considerando-se as perdas. Em outras palavras, os termos entre colchetes da equação 3.9 apresentada anteriormente podem ser substituídos pelos dados das curvas logísticas, conforme apresentado na equação 3.13:

$$\sum_{j=1}^k [out_{max,j}(t) - out_{loss,j}(t)] \frac{1}{mot_j} p_{j,k} = \int_0^t \left(\sum_{j=1}^k per_j(mwip_j(t)) \frac{1}{mot_j} p_{j,k} \right) dt \quad , \quad (3.13)$$

onde $per_j(mwip_j(t))$ = desempenho médio do centro j em função do estoque em processo médio de j no tempo t [h/d.u.]. Este valor é obtido a partir das curvas logísticas.

Além disso, para facilitar a aplicação da Teoria de Controle, o termo $extin_{order,k}$ presente nas equações 3.8 e 3.9 pode ser convertido em uma taxa:

$$extin_{order,k}(t) = \int_0^t extinr_{order,k}(t), \quad (3.14)$$

sendo que $extinr_{order,k}(t)$ é a taxa de ordens de entrada externas que chegam no centro k no tempo t e $extin_{order,k}$ representa as ordens de entrada externas acumuladas no centro k até o tempo t (em número de ordens), conforme já definido junto à equação 3.8.

Assim, substituindo-se as equações 3.13 e 3.14 em 3.9 obtém-se:

$$\begin{aligned} mwip_k(t) = & \\ & \underbrace{mwip_k(0)}_{\text{fluxo de saída}} + \underbrace{\int_0^t \left(extinr_{order,k}(t) + \sum_{j=1}^k per_j(mwip_j(t)) \frac{1}{mot_j} p_{j,k} \right) mot_j dt}_{\text{fluxo de entrada}} - \underbrace{\int_0^t per_k(mwip_k(t))}_{\text{fluxo de saída}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

As equações 3.8 a 3.15 apresentadas fornecem a base matemática para o modelo de Controle Automático da Produção proposto por Wiendahl e Breithaupt (2000), aplicável a

sistemas de produção do tipo *job shop*. Tal modelo, entretanto, baseou-se num sistema desenvolvido por Petermann¹¹ (1996 apud WIENDAHL; BREITHAUPT, 2000 p. 38) para máquina única, apresentado na Figura 3.9 a seguir.

Figura 3.9 – Modelo contínuo para um sistema de máquina única. Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).

Como pode ser observado, este modelo possui um único laço de controle. Inicialmente, as ordens discretas que chegam ao sistema são convertidas em uma taxa de entrada, com dimensão de números de ordens por unidade de tempo. Então, essa taxa é multiplicada pelo tempo médio de processamento de uma ordem, e sua dimensão passa a ser conteúdo de trabalho por unidade de tempo. A saída do sistema também é convertida em uma taxa de saída, dividindo-se o “desempenho médio” pelo “tempo médio de uma ordem”, como pode ser visto no diagrama da Figura 3.9. De acordo com Wiendahl (1995), essas transformações são necessárias para conciliar as unidades de medida utilizadas na prática do chão de fábrica e aquelas utilizadas no modelo proposto. O fluxo de materiais entre dois centros de trabalho, na prática, é contabilizado em número de ordens por unidade de tempo, enquanto os cálculos realizados no modelo proposto, para um dado centro de trabalho, consideram conteúdo de trabalho, como já mencionado. Na realidade, as diversas ordens processadas em um centro possuem durações diferentes. Assim, o modelo é válido somente para um período de tempo relativamente longo, de tal forma que os valores médios utilizados

¹¹ PETERMANN, D. Modellbasierte Produktionsregelung (in German), **Fortschritt-Berichte VDI**, Reihe 20, Nr. 193, VDI, Düsseldorf, 1996.

tornem-se representativos. A variável de entrada auxiliar “estrutura de ordens” considera essas diferentes durações das ordens, a partir das quais se calcula uma média ponderada para resultar no “tempo médio de uma ordem”. Este parâmetro, por sua vez, é utilizado para o cálculo do valor mínimo do estoque em processo médio que aparece na equação 3.11.

No diagrama da Figura 3.9, apresentado por Wiendahl e Breithaupt (2000), os quadros contendo uma reta representam operações de integração. Assim, a “taxa de entrada” é integrada no tempo para gerar a entrada acumulada do sistema (“in”). O mesmo procedimento é aplicado para se obter a saída acumulada. Como pode ser visto no somador do laço de controle, o estoque em processo médio é calculado pela diferença entre a entrada e a saída acumuladas. Os autores citados destacam que a função de transmissão do centro de trabalho é a curva logística de operação. Entretanto, o sistema pode operar em diferentes pontos nessa curva, ou seja, os valores $mwip_{min}$ e $mper_{max}$, presentes nas equações 3.11 e 3.12, podem variar no tempo. Isso gera uma função de transmissão variável, não adequada à tarefa de controle. Para contornar esta questão, normaliza-se a curva logística, obtendo-se uma curva que expressa a relação entre o estoque em processo médio relativo e a utilização média:

$$mwip_{rel}(x) = \frac{mwip(x)}{mwip_{min}} = (1 - (1 - \sqrt[4]{x})^4) + \alpha_1 x \quad (3.16)$$

$$mut(x) = \frac{mper(x)}{mper_{max}} = (1 - (1 - \sqrt[4]{x})^4) , \quad (3.17)$$

sendo:

$mwip_{rel}$ = estoque em processo médio relativo,

mut = utilização média.

As quatro variáveis de saída do sistema da Figura 3.9 são o estoque em processo médio, o *lead time* médio, o desempenho médio e a taxa de saída. Tal taxa de saída deriva do desempenho médio, conforme já mencionado. O *lead time* médio também é obtido a partir do desempenho médio e do estoque em processo médio, por meio da equação do funil (equação 3.10).

Wiendahl Breithaupt (2000) replicaram o modelo de máquina única apresentado e estabeleceram interconexões entre as unidades replicadas para criar um modelo de *job shop*. Neste caso, o fluxo de materiais no sistema pode ser expresso pela equação 3.15. Para se estabelecer tais conexões, é necessário definir as probabilidades de transição presentes na equação mencionada, as quais podem ser calculadas com auxílio de uma matriz “de-para” contendo dados reais do chão de fábrica. Como se sabe, essa matriz mostra a quantidade de materiais ou de ordens que fluem de um centro de trabalho a outro, ou seja, representa o fluxo

de materiais em um sistema *job shop*. A normalização dessa matriz dá origem a um parâmetro adimensional, expresso em porcentagem, que os autores denominam probabilidades de transição. Tal parâmetro é obtido dividindo-se as quantidades individuais que saem de um dado centro de trabalho i e são enviadas a cada um dos outros n centros pela quantidade total que sai daquele centro i , conforme apresentado na equação 3.18.

$$p_{j,k} = \frac{nt_{j,k}}{\sum_{x=1}^n nt_{j,x}} , \quad (3.18)$$

onde:

$p(j, k)$ = probabilidade de transição do centro j para o centro k ,

$nt(j, k)$ = quantidade de transições do centro j para o centro k .

Deve-se ressaltar que o conteúdo da matriz de fluxo normalizada mantém-se representativo na medida em que a estrutura de produção do *job shop* mantém-se aproximadamente a mesma, ou seja, na medida em que os volumes produzidos de componentes com determinados roteiros de produção não se alteram. Caso ocorram alterações significativas nesse fluxo, as probabilidades de transição devem ser recalculadas.

O modelo representativo do ambiente *job shop* proposto por Wiendahl e Breithaupt (2000) possui dois controladores: um controlador de *backlog* e outro de estoque em processo.

O *backlog* de um sistema pode ser definido como a diferença entre a soma de trabalho planejado e a soma de trabalho efetivamente realizado. Assim, neste caso, o desempenho planejado é a variável de referência, enquanto a capacidade é utilizada como variável de correção. A tarefa essencial de um sistema é alocar a capacidade adequada para processar uma determinada carga de trabalho. Além disso, para muitos sistemas de produção, o atendimento das datas de entrega é um dos mais importantes critérios de desempenho (Wiendahl e Breithaupt, 2000). No sistema proposto, a diferença entre o desempenho planejado é integrada em certo intervalo de tempo, resultando no *backlog* mencionado. Com base nesse valor de *backlog*, o controlador ajusta a capacidade do sistema, e o laço de retroalimentação é estabelecido. Deve-se considerar que, na maioria dos sistemas de produção, a capacidade pode ser acrescida ou reduzida por meio de incrementos discretos e determinados, e que um dado tempo de reação é necessário para tanto. Este tempo de reação já havia sido incluído no modelo de Wiendahl e Breithaupt (1997). Um exemplo de gráfico de incremento/decremento de capacidade é mostrado na Figura 3.10. No modelo de Wiendahl e Breithaupt (2000), estes gráficos também são integrados pelo controlador de *backlog* para cada centro de trabalho individual. O controlador também considera um tempo mínimo de permanência para cada

nível de capacidade. Um esquema representativo do controlador de *backlog* é mostrado na Figura 3.11.

Δcap : quantidade de capacidade alterada

tr : tempo de reação

t_{inst_min} : tempo mínimo de permanência

$acap_{min}$: área mínima de aumento ou redução de capacidade

d.u.: dia útil

Figura 3.10 – a) Gráficos de tempo de reação para mudanças de capacidade; b) gráficos de tempo mínimo de permanência da capacidade instalada.

cap: capacidade

$mper_{act}$: desempenho médio real

$mper_{plan}$: desempenho médio planejado

$\Delta mper$: desvio (erro) do desempenho médio

bl: *backlog*

bl_0 : *backlog* inicial

Figura 3.11 – Conceito do controlador automático de *backlog*. Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).

Conforme mencionado anteriormente, as principais variáveis de saída do modelo - desempenho, estoque em processo e *lead time* (Figura 3.9) - estão relacionadas entre si pela equação do funil. Portanto, somente duas dessas variáveis podem ser controladas concomitantemente, pois a terceira é calculada em função das demais. O controlador de *backlog* monitora o desempenho do sistema. Assim, um segundo controlador poderia ajustar o *lead time* ou o estoque em processo. O estoque em processo é preferido pelos autores citados por duas razões. Primeiro, porque a medição desta variável, de acordo com eles, é mais fácil e mais exata. Em segundo lugar, porque o estoque em processo pode assumir qualquer valor positivo ou nulo, enquanto o *lead time* não pode assumir valores inferiores a um certo valor mínimo positivo, que corresponde à soma do tempo de transporte e do tempo de processamento. A Figura 3.12 mostra o controlador de estoque em processo. Segundo Wiendahl e Breithaupt (2000), sua tarefa principal é posicionar o sistema em um determinado ponto de operação na curva logística que esteja dentro escopo do planejamento da produção. A variável de referência é o estoque em processo planejado, e o controlador corrige a taxa de entrada do sistema de produção com base na diferença entre o estoque em processo observado na saída do sistema e o planejado (Wiendahl e Breithaupt, 1997).

$mwip_{plan}$: estoque em processo planejado

$mwip_{act}$: estoque em processo real

$\Delta mwip$: desvio (erro) do estoque em processo

inr : taxa de entrada

Figura 3.12 – Conceito de um controlador automático de estoque em processo. Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).

A combinação dos controladores de *backlog* e WIP é mais eficaz do que se eles fossem utilizados individualmente, uma vez que o controlador de *backlog* somente atua quando a utilização planejada do sistema é atingida, pois, caso contrário, não há *backlog*. Nesta situação, em que o *backlog* é zero, o controlador de estoque em processo assume a tarefa de controle do sistema. Wiendahl e Breithaupt (2000) comparam a ação dos dois

controladores aos métodos convencionais de controle da produção: a capacidade é geralmente aumentada quando o *backlog* aumenta; por outro lado, se o *lead time* continua aumentando, a fila à espera de um dado centro de trabalho pode diminuir reduzindo-se a taxa de entrada do sistema. A Figura 3.13 mostra a integração de ambos os controladores.

cap: capacidade	$mwip_{rel,plan}$: estoque em processo relativo planejado
ut_{plan} : utilização média planejada	per_{act} : desempenho médio real
$mwip_{act}$: estoque em processo real	per_{plan} : desempenho médio planejado
$mwip_{min}$: estoque em processo mínimo	inr : taxa de entrada

Figura 3.13 – Conceito do controlador combinado de *backlog* e WIP. Fonte: Wiendahl e Breithaupt (2000).

O funcionamento do sistema apresentado nessa figura é explicado a seguir. Primeiramente, para que se rode o modelo, é necessário decidir qual ponto de operação na curva logística característica deve ser o alvo do sistema. Assim, deve-se definir o valor de utilização planejada. Em seguida, a capacidade necessária, no momento inicial, pode ser calculada a partir da saída (desempenho) e da utilização planejadas. No outro ramo do sistema mostrado, o estoque em processo relativo planejado ($mwip_{rel,plan}$) é multiplicado pelo valor mínimo de estoque em processo médio, resultando no estoque em processo médio planejado. O *backlog* do sistema é calculado por meio da integração dos desvios entre desempenho planejado e realizado, em um dado intervalo de tempo. O controlador de *backlog* então

calcula o desempenho planejado para o próximo período, o qual definirá a capacidade corrigida que realimentará o sistema. O estoque em processo real do sistema também é comparado ao estoque em processo planejado. Com base nos desvios, o controlador de WIP corrige a taxa de entrada do sistema (Wiendahl e Breithaupt, 2000).

Para avaliar o modelo proposto, os autores supracitados conduziram algumas simulações nas quais uma ordem urgente é introduzida quando o sistema está em equilíbrio. O desempenho do sistema sem controle e com controle é comparado, observando-se, em cada caso, o comportamento ao longo do tempo do estoque em processo médio e do *backlog*. Como esperado, no sistema com controle, o estoque em processo e o *backlog* foram reduzidos ao nível inicial mais rapidamente do que no sistema sem controle, como se pode verificar nos gráficos da Figura 3.14. Além disso, quando se empregou um valor alto de utilização, de 98%, o sistema sem controle levou um tempo considerável para atingir o equilíbrio novamente após a introdução da ordem urgente. Na simulação conduzida pelos autores, a ordem urgente tinha uma duração de 10 horas, em termos de conteúdo de trabalho, e o sistema levou cerca de 200 dias úteis para retomar o equilíbrio. Este resultado está de acordo com a literatura, uma vez que muitos autores, como Suri (2010), Hopp e Spearman (1996), entre outros, tem discutido os efeitos deletérios da alta utilização sobre os *lead times* de produção.

a)

Figura 3.14 – Impacto da inserção de uma ordem urgente sobre os parâmetros de controle: a) para o sistema sem controle. Fonte: Adaptado de Wiendahl e Breithaupt (2000).

b)

Figura 3.14 – Impacto da inserção de uma ordem urgente sobre os parâmetros de controle: b) para o sistema com controle. Fonte: Adaptado de Wiendahl e Breithaupt (2000).

Quando a ordem não planejada chega ao sistema com controle, o controlador de WIP reduz a taxa de entrada para levar este estoque em processo ao nível planejado. Em seguida, o controlador de *backlog* acresce mais capacidade ao sistema até o valor necessário para diminuir o *backlog* a zero no período seguinte. Os tempos mínimos de reação e de permanência para as alterações de capacidade são respeitados. Ao mesmo tempo, o controlador de estoque em processo começa a aumentar a taxa de entrada novamente, fornecendo trabalho suficiente a ser processado pelo sistema. Nesse modelo, cargas de trabalho superiores à capacidade momentânea não são liberadas até que haja capacidade suficiente para o processamento (Wiendahl e Breithaupt, 1997, Wiendahl e Breithaupt, 2000). Capacidade e carga são sincronizadas, mantendo os *lead times* nos níveis planejados e compensando perturbações. A qualidade dessa ajustagem em um sistema com esta estratégia de controle é independente do estado inicial de operação do sistema de produção (Wiendahl e Breithaupt, 2000).

3.4.4 Modelagem e controle da produção utilizando grafos de ligação e equações de estado

Uma via diferente das demais apresentadas para a modelagem e controle de sistemas de produção é proposta por Ferney (2000), com base na metodologia dos grafos de ligação. Tal metodologia é usualmente empregada na área de Dinâmica de Sistemas, pertencente à Engenharia Mecânica e Mecatrônica.

A Dinâmica de Sistemas trata da modelagem, simulação e análise de sistemas que tenham variação no tempo. Assim, pode-se conhecer o comportamento de um sistema dinâmico por meio da determinação de variáveis capazes de descrever suas características e inter-relações, e por meio da solução do modelo obtido em função da variável independente, que é o tempo (SPERANZA NETO; SILVA, 2005).

Conforme mencionado acima, as etapas mais básicas da abordagem da Dinâmica de Sistemas consistem na modelagem, simulação e análise. A modelagem, como se sabe, consiste na obtenção de um modelo que represente um dado sistema real de acordo com certas hipóteses. A solução deste modelo é obtida a partir de ferramentas de simulação, que podem ser numéricas ou analíticas, como a Transformada de Laplace. A partir dos resultados da simulação, realiza-se processo de análise. Nele, verifica-se a influência de certos elementos e/ou parâmetros, componentes do sistema, em seu comportamento dinâmico (SPERANZA NETO; SILVA, 2005).

No caso de sistemas eletromecânicos, outras atividades podem ser derivadas dessas etapas básicas, tais como o projeto e a otimização do sistema, a construção de um protótipo ou modelo em escala, a comparação entre o comportamento do protótipo e o comportamento previsto a partir da análise, etc.

Segundo destacam Speranza Neto e Silva (2005), a etapa de modelagem pode ser dividida em duas sub-etapas: a modelagem física e a matemática. Na primeira, desenvolve-se uma versão simplificada do sistema real, baseada em hipóteses sobre sua estrutura e seus elementos. É desejável que o modelo não seja muito complexo, para facilitar sua solução; por outro lado, ele deve ser suficientemente completo para que seja de fato representativo do sistema real. A partir desse modelo físico, desenvolve-se a modelagem matemática. Assim, definem-se as relações que caracterizam o comportamento dos elementos do sistema, ou seja, equaciona-se o comportamento de componentes reais ou idealizados, e estabelecem-se as relações de restrições entre eles. Como resultado, obtém-se um conjunto de equações constitutivas, de compatibilidade e de continuidade que descrevem o modelo. Algumas formas de representação matemática comuns são: equações de estado, equações de movimento e funções de transferência.

Na área de modelagem de sistemas dinâmicos existem várias metodologias e técnicas para se determinar esse conjunto de equações diferenciais e/ou algébricas que representam o comportamento do sistema no tempo. Algumas dessas metodologias são mais específicas a determinados contextos, outras mais generalizadas. Algumas, ainda, trazem em sua

formulação uma carga teórica elevada e algumas restrições ou dificuldades em relação ao emprego prático. Outras são menos conceituais, porém bem mais operacionais.

Speranza Neto e Silva (2005) destacam a técnica dos Grafos de Ligação (KARNOPP; MARGOLIS; ROSENBERG, 1990) como uma das mais completas em vários aspectos, como operacionalidade e simplicidade, facilidade para a obtenção de modelos, generalidade, uniformidade e clareza de representação e tratamento.

A técnica dos Grafos de ligação estabelece uma representação gráfica adequada para a estrutura do modelo físico do sistema e possui uma formulação bem definida e consistente para o desenvolvimento do modelo matemático. São características dos grafos de ligação:

- 1) Representação apropriada para as propriedades físicas dos elementos e para as relações de causa e efeito e restrições entre variáveis;
- 2) Modularidade na modelagem, permitindo que o modelo de um sistema seja obtido a partir da modelagem de seus subsistemas;
- 3) Sistemática para a obtenção das equações de estado (SPERANZA NETO; SILVA, 2005, p. 17).

Uma das características importantes mencionadas no trecho citado é a modularidade desta metodologia. O modelo de um dispositivo simples desenvolvido em grafos de ligação pode ser conectado a qualquer outro elemento representado pela técnica, por meio de ligações de entrada e saída de potência. Com isso, é possível criar uma gama de modelos com uma mesma representação, que podem ser conectados a outros sucessivamente (SPERANZA NETO; SILVA, 2005). Outro ponto interessante é a capacidade de representar sistemas complexos compostos por sistemas de naturezas físicas distintas, tais como elétricos, mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e térmicos, ou combinações desses, entre outros. Nas últimas duas décadas, aproximadamente, foram desenvolvidas algumas aplicações dessa metodologia na modelagem de sistemas de manufatura, como em Besombes e Marcon (1993) e Ferney (2000), que serão detalhadas mais adiante. Entretanto, vale destacar que a aplicação da metodologia nesta área supracitada ainda é incipiente.

3.4.4.1 Conceitos básicos

A seguir, serão apresentados os conceitos básicos da metodologia dos Grafos de Ligação com base no trabalho de Speranza Neto e Silva (2005), para que se possa compreender melhor a modelagem do sistema de manufatura apresentado no subitem 3.4.4.2.

Pode-se olhar para um sistema a partir de diferentes níveis de detalhamento. Assim, o sistema pode ser decomposto em subsistemas, que por sua vez são formados por componentes, as partes primitivas do sistema. Nos grafos de ligação, a interação entre componentes ou subsistemas ocorre a partir da transferência de potência entre eles, através de portas. As portas são locais por onde flui potência e por onde os elementos, i.e, sistemas, subsistemas ou componentes, podem ser conectados. Os elementos do modelo podem ser de uma porta ou multiportas.

Como dito anteriormente, a técnica dos grafos de ligação se destaca também por sua simplicidade. Assim, são utilizados basicamente quatro tipos de variáveis generalizadas: variável de esforço (e), de fluxo (f), de quantidade de movimento (p) e de deslocamento (q). As variáveis de esforço $e(t)$ e de fluxo $f(t)$ são denominadas variáveis de potência, pois o produto dessas duas variáveis é igual à potência instantânea (P) que flui entre os dois componentes ou subsistemas conectados pela ligação (equação 3.19). Já as variáveis de quantidade de movimento $p(t)$ e deslocamento $q(t)$ são tidas como variáveis de energia (E) porque advêm da integração das variáveis de potência (equações 3.20, 3.21 e 3.22). Nos sistemas físicos, a energia é a integral da potência, como se sabe. As equações que representam as relações entre as variáveis descritas são apresentadas abaixo.

$$P(t) = e(t) \cdot f(t) \quad (3.19)$$

$$p(t) = \int_0^t e(t) dt = p_0 + \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (3.20)$$

$$q(t) = \int_0^t f(t) dt = q_0 + \int_{t_0}^t f(t) dt \quad (3.21)$$

$$E(t) = \int_0^t P(t) dt = \int_0^t e(t) f(t) dt \quad (3.22)$$

A metodologia dos Grafos de Ligação possui uma simbologia própria para representar o modelo físico graficamente. Uma meia seta é utilizada para indicar o sentido em que a potência flui através de cada ligação em um dado instante. Por convenção, a potência é positiva no sentido da meia seta, ou seja, nesse sentido, ambas as variáveis de esforço e fluxo são positivas. Essa representação gráfica possibilita a visualização das conexões entre os componentes e a obtenção das equações do modelo.

Figura 3.15 – Representação de uma ligação em um grafo de ligação

Em cada ligação passiva do grafo, i.e., em cada ligação na qual há transmissão de potência, estão presentes a variável de esforço e a de fluxo. Na ligação, uma dessas variáveis é necessariamente a entrada em um dado elemento ligado e a outra é a saída. Isso ocorre porque fisicamente, é possível controlar apenas uma dessas duas variáveis e a potência entre elementos conectados num grafo é a mesma. Assim, se uma variável é controlada, a outra variável é calculada a partir da potência, ou seja, é dependente. Essa relação de causa e efeito (ou entrada e saída) entre as variáveis esforço e fluxo é representada no grafo por uma barra perpendicular colocada em uma das extremidades da ligação, como é apresentado na Figura 3.16. A barra indica o sentido em que a variável de esforço atua como entrada; a variável de fluxo segue sempre o sentido contrário da variável de esforço. Portanto, na Figura 3.16 a), a variável de esforço é entrada para o elemento B e saída para o elemento A, enquanto a de fluxo tem o sentido inverso. A Figura 3.16b) representa a situação oposta.

Figura 3.16 – Representação da causalidade em uma ligação.

Existem algumas regras básicas para atribuição da causalidade em uma ligação, que dependem do elemento que está sendo ligado. Em geral, os elementos admitem ambos os sentidos, mas em alguns há um sentido preferencial. Deve-se ressaltar que o sentido da causalidade não tem relação com o sentido em que a potência é positiva, na ligação, ou seja, estes dois aspectos são definidos de forma independente.

Segundo Speranza Neto e Silva (2005), na metodologia dos Grafos de Ligação utilizam-se nove elementos básicos para descrever o modelo físico de um sistema. Tais elementos podem ser divididos em três tipos: elementos puros, fontes ideais e junções. As equações constitutivas destes elementos, juntamente com as atribuições de fluxo de potência e causalidade é que dão origem ao modelo matemático do sistema.

Os elementos puros são o resistor, o capacitor, a inércia, o transformador e o girador. Tais elementos são versões idealizadas de componentes reais, como resistências, capacitores, massas, molas, etc. Cada elemento puro representa apenas uma propriedade física de um componente real, logo, para representar componentes reais é muitas vezes necessário utilizar mais de um elemento puro.

As fontes ideais, o resistor, o capacitor e a inércia são elementos de uma porta, uma vez que, neles, a potência flui através de uma única ligação. Os transformadores, os giradores e as junções são elementos multiportas.

Na metodologia dos Grafos de ligação, o resistor é um elemento que dissipa energia, da mesma forma que em circuitos elétricos. Nele, há uma relação estática (i.e. que não varia no tempo) entre a variável de esforço e a de fluxo, conforme mostrado na equação 3.23. No caso linear, a relação é mostrada na equação 3.24. Esse conceito de resistor não precisa ser empregado somente em sistemas elétricos. No caso de sistemas mecânicos, por exemplo, um resistor pode representar o atrito viscoso ou o atrito de Coulomb; em sistemas de fluidos, a perda de carga em uma tubulação.

$$e = \phi_R(f) \text{ ou } f = \phi_R^{-1}(e) \quad (3.23)$$

$$e = Rf \text{ ou } f = \frac{1}{R}e \quad (3.24)$$

Figura 3.17 – Representação de um resistor.

A princípio, não há prioridade para se definir a causalidade do elemento resistor, quando ele é linear, ou seja, ele admite as duas causalidades possíveis. Para resistores não lineares, uma das causalidades pode não ser admissível pois pode não ser possível definir uma equação constitutiva associada a ela.

Ao contrário do resistor, o capacitor é um elemento que armazena energia. Sua equação constitutiva estabelece uma relação estática entre a variável de esforço e a variável de

deslocamento, como mostrado nas equações 3.25 e 3.26, sendo que a última representa o caso linear.

$$q = \phi_C(e) \text{ ou } e = \phi_C^{-1}(q) \quad (3.25)$$

$$q = Ce \text{ ou } e = \frac{1}{C}q \quad (3.26)$$

Embora o elemento capacitor admita as duas causalidades, deve-se sempre que possível atribuir a este elemento a causalidade que resulta na relação de integração entre as variáveis de esforço e fluxo. Assim, deve-se buscar manter a causalidade integral do elemento, conforme denominam alguns autores, pois isso facilita a obtenção das equações de estado do modelo. No caso do capacitor, a causalidade integral é obtida quando a variável esforço é a saída do elemento, conforme mostrado na Figura 3.18 e na equação 3.27.

Figura 3.18 – Representação de um capacitor com causalidade integral.

$$e = \phi_C^{-1}(\int f dt) \quad (3.27)$$

Um capacitor pode tanto armazenar quanto fornecer energia, i. e., a potência pode fluir *para* ou *do* capacitor. A convenção mais comumente adotada é a da meia seta entrando no elemento. O inverso pode ser utilizado, mas deve-se atentar para os sinais das variáveis associadas a este elemento. Conforme mencionado, esta determinação do sentido da potência é independente da causalidade.

Estabelecendo um paralelo com os sistemas mecânicos, um elemento capacitor representa o efeito de rigidez ou flexibilidade de uma mola de translação ou de torção. Nos sistemas de fluidos, todo armazenador de líquido ou de gás pode ser modelado como um capacitor.

Outro tipo de armazenador de energia análogo ao capacitor pode ser representado pelo elemento inércia. Na equação constitutiva desse elemento, estabelece-se uma relação entre a variável de fluxo e de quantidade de movimento.

De forma similar ao capacitor, deve-se buscar preferencialmente manter a causalidade integral do elemento inércia, na modelagem. Esta é obtida quando a variável de esforço é a entrada e a de fluxo, consequentemente, é a saída.

$$p = \phi_I(f) \text{ ou } f = \phi_I^{-1}(p) \quad (3.28)$$

$$p = If \text{ ou } f = \frac{1}{I}p \quad (3.29)$$

$$f = \phi_I^{-1}(\int e \, dt) \quad (3.30)$$

Figura 3.19 – Representação do elemento inércia com causalidade integral.

Segundo a convenção de sinais, a potência flui para a inércia, conforme a Figura 3.19, ou seja, as variáveis de potência são positivas nesse sentido. Pode-se adotar também o outro sentido para a meia seta, entretanto, deve-se observar os sinais das variáveis de potência.

O componente equivalente ao elemento inércia é o indutor, que armazena energia magnética. No domínio mecânico, a massa e a inércia rotacional são exemplos desse elemento.

As fontes ideais de esforço ou de fluxo também são componentes de uma porta que fornecem energia ilimitada ao sistema. Na fonte de esforço, a variável de esforço é mantida constante ou obedece a uma função no tempo que é pré-determinada, independentemente da potência requerida. A fonte de fluxo é análoga, porém em relação à variável de fluxo. As fontes de esforço e fluxo admitem uma causalidade única, como é esperado. Como a fonte de esforço fornece esforço ao sistema, essa variável é a entrada para o sistema ao qual a fonte está ligada, conforme se observa na Figura 3.20. Na fonte de fluxo, a variável fluxo é a entrada para o sistema ao qual ela está conectada, sendo o esforço, consequentemente, a saída, conforme representado na figura.

Figura 3.20 – Fontes ideais de esforço e de fluxo, e suas respectivas causalidades.

Nos sistemas elétricos, esses elementos representam as fontes de tensão e corrente, enquanto em sistemas mecânicos, a força da gravidade atuando em uma massa pode ser representada por uma fonte de esforço.

Na metodologia dos Grafos de Ligação há ainda dois elementos puros de duas portas, os transformadores e giradores, que realizam o acoplamento entre subsistemas físicos de naturezas distintas. Estes elementos estabelecem uma relação entre as variáveis de potência de entrada e de saída, de forma que a potência seja conservada. A Figura 3.21 apresenta a representação do elemento transformador, com as duas possibilidades de causalidade admitidas. As equações constitutivas de cada caso são apresentadas na sequência.

Figura 3.21 – Representação do elemento transformador com duas possibilidades de causalidade: a) possibilidade 1, b) possibilidade 2.

$$\text{possibilidade 1} \begin{cases} f_2 = mf_1 \\ e_1 = me_2, \text{ sendo } m \text{ o módulo do transformador} \end{cases} \quad (3.31)$$

$$(3.32)$$

$$\text{possibilidade 2} \begin{cases} f_1 = 1/mf_2 \\ e_2 = 1/me_1, \text{ sendo } m \text{ o módulo do transformador} \end{cases} \quad (3.33)$$

$$(3.34)$$

No elemnto girador, as relações entre as variáveis são cruzadas, ou seja, a variável de fluxo da saída relaciona-se à variável de esforço na entrada e vice-versa. Uma alavanca ou um trem de engrenagens ideais são exemplos de transformadores nos sistemas mecânicos de translação e rotação, respectivamente. Um sistema de polias ideais ou pinhão-cremalheira podem ser entendidos como transformadores que acoplam um sistema mecânico de rotação a um de translação. De forma similar, os cilindros hidráulicos realizam o acoplamento entre o sistema mecânico de translação e o sistema hidráulico, e as bombas, entre o sistema mecânico de rotação e o sistema hidráulico. No domínio elétrico, os amplificadores podem ser modelados como transformadores, desde que sejam ignorados os efeitos resistivos e indutivos.

Para acoplar as fontes ideais e elementos puros que compõem um sistema são empregadas junções, elementos de três ou mais portas que representam restrições o acoplamento dos demais elementos. Esses elementos são conservadores de potência, e realizam a distribuição da potência no sistema. Suas equações constitutivas são sempre lineares. As junções mais básicas são 2: junção 0 ou de esforço comum e junção 1 ou de fluxo comum.

Figura 3.22 – Representação da junção 0 e junção 1.

Na junção 0, as variáveis de esforço de todas as ligações são iguais, enquanto o somatório das variáveis de fluxo deve resultar zero. Estas relações são mostradas na equação 3.35 e 3.36.

$$e_1 = e_2 = e_3 \quad (3.35)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 = 0 \quad (3.36)$$

Na junção 1 ocorre o oposto: as variáveis de fluxo que chegam à junção são iguais, ao passo que a soma dos esforços deve ser nula.

$$f_1 = f_2 = f_3 \quad (3.37)$$

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0 \quad (3.38)$$

Nas junções, as variáveis de potência tem sinal positivo quando a meia seta aponta para a junção, e o sinal negativo quando a meia seta aponta no sentido contrário da mesma.

Também existe uma regra para a atribuição da causalidade nas junções. Na junção 0, somente uma das variáveis de esforço deve ser a entrada (barra causal no centro da junção) e as demais devem ser saídas. Na junção 1 ocorre o mesmo, porém, aplicado às variáveis de fluxo. Somente uma delas deve ser a entrada (barra causal no lado externo à junção) e as demais devem ser saídas (barras internas).

Ferney (2000) utilizou alguns desses elementos puros, fontes ideais e junções para representar um sistema dinâmico de manufatura. Este modelo será discutido a seguir.

3.4.5 O modelo de Ferney (2000) para sistemas de manufatura

Ferney (2000) apresenta um modelo baseado na metodologia dos grafos de ligação para representar um sistema de manufatura de um único produto. A evolução do fluxo de produção em diferentes seções do sistema é modelada. Para tanto, são desenvolvidos elementos puros, na linguagem dos grafos de ligação, para representar algumas entidades básicas dos sistemas de manufaturas, como máquinas e estoques. Em seguida, estes elementos puros são conectados entre si e, a partir do modelo completo dos grafos de ligação, são obtidas as equações de estado. A abordagem apresentada se aplica a sistemas contínuos e sistemas discretos que podem ser representados como contínuos, de acordo com o nível de

aproximação requerido. Além desta condição, outras hipóteses assumidas no modelo apresentado são:

- os tempos de transporte não são significativos quando comparados aos tempos de processamento das máquinas;
- os estoques intermediários e finais não estão sujeitos a limitações de capacidade; a quantidade de elementos em estoque constitui-se um dos objetivos de controle do sistema;
- não há restrições de escoamento dos produtos finais, mais podem ser incluídas ou não restrições para a chegada dos materiais.

A seguir são definidas as variáveis de potência e energia do sistema, bem como as entidades básicas do sistema de manufatura (elementos puros).

3.4.5.1 Variáveis de potência e energia

As variáveis básicas do sistema de manufatura, que possuem significado físico, são o fluxo de produção e o volume de produção. O fluxo de produção é expresso em unidades de material por segundo; dependendo da natureza do sistema estudado, esta unidade de material pode representar uma quantidade discreta ou contínua de material, uma superfície ou um volume. Esta variável “fluxo de produção” assume a posição de variável genérica de fluxo $f(t)$, presente na metodologia dos grafos de ligação, enquanto a variável “volume de produção” é associada à variável genérica de deslocamento, $q(t)$. Sendo a primeira uma variável de potência, e a segunda, a variável de energia correspondente, vale a relação de integração entre elas, conforme pode ser visto na equação 3.39. Essa relação entre as variáveis tem sentido físico.

$$q(t) = q_0 + \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau \quad (3.39)$$

A variável dual ao fluxo, o esforço $e(t)$, não apresenta um sentido físico direto. Entretanto, ela é utilizada para representar o nível de atividade de uma dada entidade em relação ao acoplamento entre ela e a entidade localizada a montante no sistema. Duas entidades básicas presentes no sistema proposto por Ferney (2000) são a máquina e o estoque. Uma dada máquina é ligada a montante a um estoque, que representa o estoque em processo gerado na etapa anterior do processo de fabricação. A capacidade de processamento da

máquina em questão fica limitada à existência de um estoque mínimo a ser processado. Caso esse valor mínimo esteja disponível, tal máquina pode operar com sua capacidade disponível ou determinada. No modelo, a variável de esforço é relevante a esse acoplamento. A variável dual ao deslocamento, a quantidade de movimento $p(t)$, não é utilizada no modelo e não tem significado físico.

3.4.5.2 Entidades básicas

- Estoque

No sistema de manufatura, Ferney (2000) utiliza as seguintes entidades básicas: estoques, tanques, fontes, máquinas e junções.

Os estoques são representados no modelo pelo elemento capacitor. Assim, vale a relação mostrada na equação 3.40, já escrita de forma a preservar a causalidade integral:

$$e_i(t) = \frac{1}{C_i} q_i(t) \quad (3.40)$$

Como restrição física do sistema de manufatura, tem-se que a quantidade de material armazenada é sempre maior ou igual a zero, ou seja:

$$q_i(t) \geq 0 \quad (3.41)$$

Além disso, o comportamento do estoque envolve três fluxos elementares: um fluxo de entrada $f_{ei}(t)$, um fluxo de saída $f_{si}(t)$ e a diferença entre eles, a qual corresponde ao fluxo de material a ser armazenado, $f_i(t)$. Em termos de grafos de ligação, essa conservação de fluxo, mostrada na equação 3.42, pode ser representada por uma junção 0 (Figura 3.22).

$$f_i(t) = f_{ei}(t) - f_{si}(t) \quad (3.42)$$

O modelo em grafos de ligação para representar o estoque é mostrado na Figura 3.23.

Figura 3.23 – modelo de estoque em grafos de ligação. Fonte: Ferney (2000).

No modelo de Ferney (2000), não há restrições de armazenagem para os estoques do sistema, ou seja, assume-se uma capacidade infinita de armazenamento para estoques em processo e estoques finais. Assim, $C_i \rightarrow \infty$. Além disso, as atribuições de causalidade são feitas de forma a preservar a causalidade integral no elemento capacitor e estabelecer a conservação dos fluxos. Mantendo-se a causalidade integral, vale a equação 3.40. A partir dela conclui-se que, se $C_i \rightarrow \infty$ e $q_i(t) \geq 0$, então $e_i \rightarrow 0$. O estoque é entendido como um elemento passivo, que não tem dinâmica própria, uma vez que o fluxo de entrada de material no estoque é imposto pela entidade conectada a montante e o fluxo de saída é comandado pela entidade a jusante (no caso uma máquina), que “puxa” o material do estoque. Segundo Ferney (2000), o fato de e_i tender a zero reflete essa natureza passiva do elemento estoque. Em resumo, o comportamento do elemento que representa o estoque é definido pela equação 3.40 e pelas equações seguintes:

$$e_{ei} = e_{si} = e_i \rightarrow 0 \quad (3.43)$$

$$q'_i = f_i = f_{ei} - f_{si} \quad (3.44)$$

- Máquina

O controle dos sistemas de manufatura está diretamente associado ao controle das frequências de produção das máquinas. Uma vez definidos os tempos de processamento do produto em cada máquina, os quais são parâmetros do sistema, atua-se sobre as frequências de produção destas máquinas, ajustando-se também os tempos de parada. Para um grupo de máquinas em paralelo, pode-se ainda modificar o número de máquinas em serviço em um dado instante (FERNEY, 2000).

No modelo proposto por Ferney (2000), a entidade máquina é modelada como um resistor. Dessa forma, vale a relação entre fluxo e esforço mostrada na equação 3.45, sendo U_i a frequência de processamento da máquina. Como se sabe, um resistor dissipa potência. Assim, para um dado valor de tensão e_i constante, ao se alterar a resistividade do resistor, altera-se a quantidade de corrente f_i que o atravessa. Analogamente, para um dado valor de esforço e_i constante, ao se alterar a frequência de produção da máquina, regula-se a quantidade de fluxo de material f_i que a atravessa. Dessa forma, é a máquina que estabelece, que dita o fluxo de material em uma dada seção ou vizinhança do sistema de manufatura. Nesse sentido, pode-se dizer que a máquina é um elemento ativo do sistema, ao contrário do estoque que a antecede, que é um elemento passivo, conforme sua definição. Ela puxa o fluxo a partir do estoque à montante e impõe o fluxo de saída para a entidade à jusante.

$$f_i = U_i e_i \quad (3.45)$$

A modelagem da máquina também é baseada na hipótese de igualdade entre os fluxos de entrada $f_{ei}(t)$ e de saída da máquina, $f_{si}(t)$. Isso significa que, para a estimativa dos fluxos médios, o tempo de passagem do material na máquina é ignorado. O controle é aplicado à frequência de processamento da máquina U_i . Comparando-se a equação 3.45 com a equação 3.24 (p.107), observa-se que o parâmetro R do resistor corresponde ao inverso da frequência U_i , ou seja, corresponde ao tempo de processamento de uma unidade de material, T_i . A igualdade entre o fluxo de entrada e saída é obtida utilizando-se uma junção ‘1’, na qual o elemento ‘R’ é colocado, como apresentado na Figura 3.24.

Figura 3.24 – modelo de máquina. Fonte: Ferney (2000).

Conforme as discussões apresentadas, o comportamento da entidade máquina pode ser representado pelas equações 3.45 a 3.47.

$$f_{ei} = f_{si} = f_i \quad (3.46)$$

$$e_i = e_{ei} - e_{si} \quad (3.47)$$

- Estação

No modelo em estudo, uma estação consiste no conjunto formado por uma máquina e um estoque precedente. Essa associação requer a inserção de um elemento de acoplamento para refletir a disponibilidade de material na interface entre estoque e máquina. A variável de esforço, $e_i(t)$, reflete a disponibilidade de material na saída do estoque; como se assumiu uma capacidade de armazenagem infinita no estoque, esse esforço tende a zero para qualquer valor não-negativo de q_i . Neste caso, mesmo que houvesse uma quantidade de material armazenada, i.e., $q_i > 0$, não passaria fluxo pela máquina, pois e_i seria zero e, portanto, f_i também seria zero (equações 3.40 e 3.45). Isso quebraria o princípio essencial da metodologia dos grafos de ligação, que é a transmissão de potência, e que requer, portanto, que e_i e f_i sejam diferentes de zero.

Para contornar essa questão, Ferney (2000) insere uma fonte de esforço e utiliza a adota a função $\min(1, q_i)$ como parâmetro S_e desta fonte. Assim, se $q_i = 0$, a máquina permanece “desligada”. Entretanto, a partir do momento em que há uma ou mais unidades de material disponíveis em estoque, a função mencionada assume o valor 1 e a máquina passa a trabalhar com sua capacidade especificada, U_i , pois $e_i = 1$. Há ainda uma situação intermediária, na qual $0 < q_i < 1$. Nesse caso, a máquina é “ligada”, mas funciona com uma capacidade de processamento pouco abaixo da especificada, U_i . Essa situação de transição é considerada para que seja possível modelar sistemas discretos como sistemas contínuos.

A fonte de esforço é inserida na interface entre estoque e máquina por meio de uma junção ‘1’ para que a igualdade dos fluxos na interface seja preservada. Essa junção, como se sabe, impõe também a conservação dos esforços. A representação gráfica da interface e as equações que regem seu comportamento são mostradas a seguir.

Figura 3.25 – modelo de interface entre estoque e máquina. Fonte: Ferney (2000).

$$f_{ei} = f_{si} = f_i \quad (3.48)$$

$$e_{si} = e_{ei} - \min(1, q_i) \quad (3.49)$$

O agrupamento do estoque, interface e máquina resultam no modelo de estação mostrado na Figura 3.26 a). Pelas regras dos grafos de ligação, a ocorrência de duas junções ‘1’ consecutivas permite simplificar o modelo conforme mostrado da parte b) da figura.

Para o modelo simplificado de estação podem ser escritos os seguintes conjuntos de equações:

Equações das junções (restrições de acoplamento entre os elementos)

$$\text{junção 0} \quad \begin{cases} f_{ei} - f_2 - f_1 = 0, \text{ ou seja, } f_2 = f_{ei} - f_1 \\ e_{ei} = e_1 = e_2 \end{cases} \quad (3.50)$$

$$(3.51)$$

$$\text{junção 1} \quad \begin{cases} e_1 + e_3 - e_4 - e_{si} = 0, \text{ ou seja, } e_4 = e_1 + e_3 - e_{si} \\ f_1 = f_3 = f_4 = f_{si} \end{cases} \quad (3.52)$$

$$(3.53)$$

Equações constitutivas dos elementos

$$\text{estoque (capacitor): } e_2 = \frac{1}{C_i} q_i \rightarrow 0 \text{ e } q'_i = f_2 \quad (3.54)$$

$$\text{máquina (resistor): } f_4 = U_i e_4 \quad (3.55)$$

$$\text{interface (fonte de esforço): } e_3 = \min(1, q_i) \quad (3.56)$$

Figura 3.26 – modelo de estação a) detalhado b) simplificado.

Manipulando-se as equações 3.50 a 3.56 apresentadas, obtém-se a equação 3.57, que representa o fluxo de saída de uma dada estação i .

$$f_{si} = U_i [q_i/C_i + \min(1, q_i) - e_{si}] \quad (3.57)$$

Supondo que esta i -ésima estação está ligada a outra estação e alimenta um estoque k a jusante, tem-se que o esforço e_{si} é equivalente à razão q_k/C_k . Considerando que os estoques tem capacidade ilimitada de armazenamento, tem-se que e_{si} tende a zero, assim como a razão q_i/C_i . Dessa forma, a equação 3.57 pode ser simplificada, resultando na equação 3.58. A partir das equações e argumentos apresentados, pode-se definir o comportamento das variáveis de potência de entrada (f_{ei} , e_{ei}) e de saída da i -ésima estação (f_{si} , e_{si}).

$$f_{si} = U_i \min(1, q_i) \quad (3.58)$$

$$e_{ei} = e_2 \rightarrow 0 \quad (3.59)$$

$$f_{ei} : \text{conhecido pela estação ou entidade localizada a montante da } i\text{-ésima estação} \quad (3.60)$$

$$e_{si} \rightarrow 0 \quad (3.61)$$

Combinando-se as equações 3.58 e 3.44 (p.114), obtém-se a equação 3.62, que será utilizada para obtenção das equações de estado do sistema de manufatura, juntamente com a equação 3.58.

$$q'_i = f_{ei} - U_i \min(1, q_i) \quad (3.62)$$

- Fontes de material

No modelo do sistema de manufatura proposto por Ferney (2000), estão presentes dois tipos de fontes de material, as fontes de fluxo livre e as fontes de fluxo imposto. As primeiras, na realidade, são fontes de esforço, nas quais o valor da variável de esforço e_i é definido como sendo 1 unidade de material. Isso indica que não há restrição na quantidade de material disponível ao sistema. As fontes de fluxo imposto, como o próprio nome revela, impõem um fluxo determinado de material em certo ponto do sistema. Essas fontes de fluxo que possuem uma frequência de suprimento U_i multiplicada por 1 unidade de material. As fontes de fluxo imposto podem ser controladas ou não; no primeiro caso, o controle consiste em se ajustar a frequência U_i , de forma semelhante como é feito para uma máquina.

Figura 3.27 – modelo de fonte a) de fluxo livre; b) de fluxo imposto. Fonte: Ferney (2000).

- Tanques (estoques finais)

Os tanques recebem o material transformado, que pode ser de vários tipos: produto acabado, refugo ou material a ser retrabalhado. Segundo Ferney (2000), este elemento foi criado apenas para representar as saídas do sistema, ou seja, o escoamento do material produzido. Ele não influencia no comportamento do sistema e é similar ao estoque intermediário de capacidade infinita, possuindo o mesmo parâmetro ‘C’.

Figura 3.28 – modelo de um tanque de capacidade infinita (estoque final). Fonte: Ferney (2000).

- Junções estáticas

As junções são utilizadas para acoplar as várias entidades do modelo entre si. Como se pode observar, as junções ‘0’ e ‘1’ já foram utilizadas para acoplar os elementos máquina e estoque, formando uma estação. Entretanto, Ferney (2000) define ainda três outros tipos de junções: as convergentes, as divergentes e as convergentes-divergentes. Tais junções podem ser utilizadas para acoplar estações entre si ou para acoplar outros elementos, como fontes e tanques, às estações, permitindo representar a arquitetura do sistema de manufatura.

Na junção convergente, o fluxo de entrada converge para o centro da junção para formar o fluxo de saída (Figura 3.29). Este elemento, na verdade, é um tipo de junção ‘0’, pois nele ocorre a conservação do fluxo de material (equação 3.63).

Figura 3.29 – Modelo de junção convergente. Fonte: Ferney (2000).

$$f_{si} = \sum_{k=1}^m f_{ek} \quad (3.63)$$

Na junção divergente, ao contrário, o fluxo que chega ao centro da junção é distribuído em canais de saída distintos, seguindo uma lei que também garante a conservação de fluxo. Em termos de modelagem, essa junção é obtida pela associação de uma junta ‘1’ a transformadores, sendo cada um relativo a um canal de saída (Figura 3.30). Os módulos de cada transformador representam os pesos que ponderam a distribuição do fluxo, conforme se pode observar na equação 3.64.

Figura 3.30 – Modelo de junção divergente. Fonte: Ferney (2000).

$$f_{sj} = w_j f_{ei}, \text{ com } \sum_{k=1}^n w_j = 1 \text{ e } w_j > 0 \quad (3.64)$$

Por fim, o terceiro tipo de junção utilizado no modelo de sistema de manufatura é resultado da combinação de uma junção convergente e uma divergente, cuja equação é apresentada a seguir.

$$f_{sj} = w_j \sum_{k=1}^m f_{ek}, \text{ com } \sum_{k=1}^n w_j = 1 \text{ e } w_j > 0 \quad (3.65)$$

3.4.5.3 Modelagem e simulação de um sistema hipotético simples

Para exemplificar a utilização das entidades básicas apresentadas, Ferney (2000) desenvolve o modelo de um sistema simples, apresentado na Figura 3.31. Como pode-se observar, o sistema é composto por 4 estações arranjadas em paralelo e em série. As estações de entrada são supridas por fontes de fluxo imposto controladas. O modelo de grafos de ligação correspondente ao sistema é mostrado na Figura 3.32.

Figura 3.31 – Sistema simples de manufatura. Fonte: Ferney (2000).

Figura 3.32 – Diagrama de grafos de ligação do sistema. Fonte: Ferney (2000).

As equações de estado do sistema de manufatura são obtidas com base nas equações constitutivas das estações (equação 3.58 e 3.62), nas relações de distribuição de fluxo entre as estações e nas equações constitutivas das fontes de material. Para o sistema apresentado nas Figuras 3.31 e 3.32, tem-se as seguintes equações:

$$f_{01} = U_{01}1mu, \text{ onde } mu = \text{unidades de material (material units)} \quad (3.66)$$

$$f_{02} = U_{02}1mu \quad (3.67)$$

$$f_{e1} = f_{01} \quad (3.68)$$

$$f_{e2} = f_{02} \quad (3.69)$$

$$f_{s1} = U_1 \min(1, q_1) \quad (3.70)$$

$$f_{s2} = U_2 \min(1, q_2) \quad (3.71)$$

$$q'_1 = f_{e1} - U_1 \min(1, q_1) \quad (3.72)$$

$$q'_2 = f_{e2} - U_2 \min(1, q_2) \quad (3.73)$$

$$f_{e3} = f_{s1} + f_{s2} \quad (3.74)$$

$$f_{e4} = f_{s3} \quad (3.75)$$

$$f_{s3} = U_3 \min(1, q_3) \quad (3.76)$$

$$f_{s4} = U_4 \min(1, q_4) \quad (3.77)$$

$$q'_3 = f_{e3} - U_3 \min(1, q_3) \quad (3.78)$$

$$q'_4 = f_{e4} - U_4 \min(1, q_4) \quad (3.79)$$

$$q'_s = f_{s4} \quad (3.80)$$

Manipulando-se as equações 3.66 a 3.80 apresentadas, obtêm-se as equações de estado do sistema, apresentadas a seguir na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ q'_3 \\ q'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -U_2 & 0 & 0 \\ U_1 & U_2 & -U_3 & 0 \\ 0 & 0 & U_3 & -U_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \min(1, q_1) \\ \min(1, q_2) \\ \min(1, q_3) \\ \min(1, q_4) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{01} \\ U_{02} \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

No instante inicial, assume-se que não há nenhum material no sistema de manufatura; assim, a primeira multiplicação matricial do lado direito da equação é nula, restando apenas os termos relacionados às fontes. Assim que o estoque temporário que precede cada estação passa a conter mais de uma unidade de material, a operação da máquina torna-se autônoma, ou seja, independente da quantidade de material disponível na estação, q_i . As máquinas passam então a processar material com uma dada frequência U_i , e pode-se atuar sobre essas frequências para se obter o controle desejado. As equações matriciais 3.82 e 3.83

correspondem aos casos extremos em que todos os estoques das estações contêm, respectivamente, menos de uma unidade de material e pelo menos uma unidade;

$$\begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ q'_3 \\ q'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -U_2 & 0 & 0 \\ U_1 & U_2 & -U_3 & 0 \\ 0 & 0 & U_3 & -U_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{01} \\ U_{02} \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

$$\begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ q'_3 \\ q'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_{01} \\ U_{02} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

Ferney (2000) apresenta a simulação do sistema proposto com base nas equações de estado apresentadas e em três objetivos de controle:

- estabilizar o fluxo de saída do sistema em um dado valor, para se atender à demanda;
- trazer os níveis de estoque para valores desejados, para absorver as incertezas de curto prazo e não interromper a produção das máquinas a jusante no sistema de manufatura;
- autorizar um aumento controlado dos níveis de estoque com respeito aos valores anteriores.

O comando adotado é baseado nas propriedades da máquina-gargalo, a qual está localizada na estação 4, na saída do sistema de produção. Os estoques em processo que antecedem as máquinas atingem os valores requeridos de forma sequencial, a partir da estação de saída. O regime permanente, onde todos os estoques contêm mais de uma unidade de material, é definido quando a derivada do vetor de estado é igual a zero, i.e., $x' = 0$, o que resulta na seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_{01} \\ U_{02} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Para completar a definição do regime permanente, atribui-se um valor pré-especificado para o fluxo final de saída f_{s4} e se estabelece a relação entre os fluxos que passam pelas máquinas 1 e 2, ou seja, estabelece-se a relação entre as variáveis f_{s1} e f_{s2} .

O controle é aplicado às frequências de funcionamento das máquinas e das fontes de fluxo. Cada frequência é controlada com base nas equações (3.85 a 3.88), que envolvem os termos a_i , b_i e c_i definidos a seguir:

- a_i = frequência por unidade de material da máquina ou fonte i , estimada em relação ao regime permanente;
- b_i = controle da variação na frequência da máquina ou fonte i no regime transiente para alcançar a referência no estoque j (à jusante), sendo que tal referência pode evoluir no tempo;
- c_i = tolerância de controle de sobresinal no estoque j , em caso de haver uma falha na máquina subsequente a esse estoque. Em termos percentuais, o sobressinal é dado pela razão entre o valor de pico do sinal (da variável) e o valor estacionário.

$$U_i = (a_i + b_i)c_i \quad (3.85)$$

$$a_i = U_{ip} 1 \mu u^{-1} \quad (3.86)$$

$$b_i = U_{ip} \alpha_i \text{sign}(q_{jc} - q_j) \min(1, |q_{jc} - q_j|) \quad (3.87)$$

$$c_i = \min(1, |(1 + \beta_j)q_{jc} - q_j|), \quad (3.88)$$

sendo que:

U_{ip} = valor de U_i no regime permanente;

α_i = coeficiente homogêneo em μu^{-2} ;

β_i = coeficiente adimensional;

j = índice do estoque subsequente à máquina ou fonte i (estoque a jusante);

q_{jc} = valor de referência para o estoque q_j .

Observa-se que o parâmetro b_i é um fator de correção somado ao valor da frequência da máquina ou fonte no regime permanente. A função sinal ajusta o sentido da correção e o valor da correção é proporcional à diferença $q_{jc} - q_j$, quando esta é menor do que 1 unidade.

O sistema foi simulado com as seguintes condições iniciais:

- a) o fluxo de saída f_{s4} , que representa a taxa de demanda do produto, é de 4 unidades de material/s e $f_{s2} = 2f_{s1}$;
- b) permite-se uma variação máxima de 20% nos valores de frequência e um aumento máximo de 20% nos níveis de estoque nos casos de incerteza, i.e., α_i e β_i são iguais a 0,2;
- c) os níveis de estoque requeridos foram definidos como sendo: $q_{1c} = 15 \mu u$, $q_{2c} = 10 \mu u$, $q_{3c} = 20 \mu u$ e $q_{4c} = 22 \mu u$;

d) 45 s depois de o sistema se iniciado, a máquina da estação 3 quebra por 3 s.

A partir das condições iniciais definidas no item a), e da equação 3.84, que representa o sistema no regime permanente, pode-se deduzir que: $U_{01} = 4/3$ Hz, $U_{02} = 8/3$ Hz, $U_1 = 4/3$ Hz, $U_2 = 8/3$ Hz e $U_3 = U_4 = 4$ Hz.

Os resultados da simulação realizada por Ferney (2000) são apresentados nas Figuras 3.33 a 3.36.

O regime transiente do sistema representa o acoplamento entre estoque e máquina, quando o estoque ainda é menor do que uma unidade de material. Na Figura 3.33 pode-se observar que são necessários um pouco mais de 0,5s, 1s e 1,3s para acumular 1 unidade de material nos estoques das estações 2, 3 e 1 e 4, respectivamente. Assim, para os valores de teste seleccionados, o regime transiente pode ser considerado desprezível.

Figura 3.33 – Níveis de estoque durante o acoplamento estoque-máquina (regime transiente).
Fonte: Ferney (2000).

Figura 3.34 – Evolução dos níveis de estoque no tempo. Fonte: Ferney (2000).

Figura 3.35 – Evolução do fluxo de produção da última estação no tempo. Fonte: Ferney (2000).

Figura 3.36 – Evolução do fluxo de suprimento das fontes e do fluxo de produção da última estação. Fonte: Ferney (2000).

A simulação apresentada foi reproduzida em ambiente Matlab[®], utilizando-se o Simulink[®]. A reprodução foi feita com base nas regras de controle apresentadas nas equações 3.85 a 3.88, empregando-se as mesmas condições iniciais definidas por Ferney (2000) e apresentadas neste tópico. Os resultados obtidos, relativos à evolução dos níveis de estoque no tempo, são mostrados na Figura 3.37. Observa-se que as curvas mostradas nesta figura são bastante similares às curvas apresentadas na Figura 3.34, exceto por algumas diferenças nos sobressinais dos estoques 2 e 3. Estas diferenças provavelmente se devem a diferenças nos valores dos parâmetros utilizados na simulação, não mencionadas no artigo estudado (por exemplo, diferenças nos valores de α e β utilizados).

Figura 3.37 - Evolução dos níveis de estoques no tempo, obtidos a partir da reprodução da simulação proposta por Ferney (2000). Fonte: próprio autor.

O sistema desenvolvido por Ferney (2000) demonstra que a dos grafos de ligação pode ser utilizada para a modelagem, simulação, otimização e controle dos sistemas de manufatura. O autor supracitado destaca algumas vantagens dessa abordagem. Do ponto de vista da modelagem, a representação gráfica obtida é muito próxima de um croqui do sistema. A abordagem também permite o refinamento gradual dos modelos, a partir dos resultados da simulação. As simulações podem ser realizadas diretamente a partir da representação gráfica, utilizando-se softwares dedicados que realizam esta conversão automaticamente, ou a partir das equações de estado, utilizando-se softwares convencionais. A primeira opção evita a manipulação das relações analíticas, o que costuma ser uma fonte de erros quando os sistemas são muito complexos. A representação de estado dá a oportunidade de se explorar ferramentas convencionais de controle para se lidar com o problema da síntese do controle.

Observa-se que o modelo proposto limita-se aos componentes básicos dos sistemas de produção. Assim, seu escopo pode ser ampliado para incluir, por um lado, outras entidades que interagem com o tempo (como elementos de transporte ou mesmo recursos humanos) e, por outro, para representar sistemas que processam múltiplos produtos.

3.4.6 *Análise crítica dos modelos de Programação de Operações e Controle da Produção apresentados*

Uma primeira distinção que se pode observar em relação aos quatro modelos de programação e controle da produção apresentados refere-se ao domínio em que tais modelos foram desenvolvidos. O modelo de Li et al (2011), doravante denominado Modelo 1, e os

modelos de Cho e Ekoc (2009) e Cho e Lazaro (2010), agrupados sob a denominação de Modelo 2, operam no domínio discreto. Já o Modelo 3, de Wiendahl e Breithaupt (2000), e o Modelo 4, de Ferney (2000), são contínuos. Estes dois últimos apresentam uma vantagem em termos de ferramental matemático, uma vez que a Teoria de Controle dispõe de um conjunto maior de ferramentas para desenvolvimento e análise de sistemas contínuos no tempo.

Os Modelos 1 e 2 também são similares em relação à sua aplicação dentro do Planejamento Hierárquico da Produção, pois ambos se destinam à Programação de Operações, que se situa no nível mais detalhado de planejamento. Os Modelos 3 e 4 não são voltados a este mesmo nível de detalhamento, uma vez que utilizam dados relativos a famílias de produtos ou médias ponderadas, calculadas a partir de dados detalhados, como tempos de processamento individuais das tarefas, por exemplo. Entretanto, a escolha deste nível de detalhamento é interessante do ponto de vista de processamento computacional, uma vez que ambos os modelos são aplicáveis a sistemas *job shop* complexos, para os quais a programação detalhada é um problema do tipo NP-completo. Para estes sistemas, obter a solução ótima por meio de algoritmos enumerativos torna-se impraticável, devido ao elevado tempo computacional requerido. Assim, a utilização de médias, de Modelagem de Sistemas Dinâmicos e de variáveis contínuas tornam o problema viável. Os modelos 1 e 2 são aplicáveis a ambientes de produção menos complexos, como sistemas de máquina única ou *flow shop*. Um resumo comparativo dos três modelos é apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Comparação entre os modelos automáticos de controle para Programação de Operações e Controle da Produção

	Modelo 1 (Li et al, 2011)	Modelo 2 (Cho e Erkoc, 2009; Cho e Lazaro, 2010)	Modelo 3 (Wiendahl e Breithaupt, 2000)	Modelo 4 (Ferney, 2000)
Domínio	discreto	discreto	contínuo	contínuo
Aplicação na hierarquia do planejamento	Programação de Operações	Programação de operações	Controle da Produção (liberação de ordens)	Controle da Produção (taxa de operação das máquinas)
Sistema de produção	<i>flow shop</i>	máquina única*	<i>job shop</i>	<i>job shop, flow shop</i>
Principais variáveis e parâmetros	tempos de processamento	tempos de processamento, datas de entrega, ganhos do controlador	conteúdo de trabalho, estoque em processo, <i>backlog, lead time</i> , desempenho, utilização	frequência de operação das máquinas, estoque em processo, nível de referência para os estoques

* alguns testes realizados para sistemas *flow shop* e *job shop* com poucas máquinas

É importante mencionar que os modelos de controle de Prabhu e Duffie (1999), Cho e Erkoc (2009) e Cho e Lazaro (2010), na realidade, não são modelos dinâmicos, mas sim métodos iterativos de busca que substituem as heurísticas convencionais aplicadas à Programação de Operações. O laço de realimentação utilizado nos modelos é um elemento interno que faz parte do algoritmo de solução e a variável discreta t , denominada “tempo” pelos autores, não tem ligação direta com o tempo real ou o tempo utilizado em simulações dinâmicas. Esta variável corresponde às iterações realizadas para se chegar à solução. Assim, em uma situação real de uso, aplica-se o método proposto a um determinado conjunto de tarefas a serem programadas e, ao final das iterações, obtém-se uma programação a ser seguida. Caso ocorra alguma modificação nas condições iniciais, como a inclusão de uma nova tarefa com uma determinada data de chegada, o modelo deve ser rodado novamente com a inclusão dessa nova tarefa, para obtenção de uma nova solução. Portanto, observa-se que o método é aplicado a um conjunto fechado de tarefas, isto é, a um problema estático, da mesma forma que outras heurísticas tradicionais destinadas à Programação de Operações.

No Modelo 1, de Li et al. (2011), a programação realizada é realimentada com condições atualizadas do chão de fábrica acerca da execução das tarefas. Em termos de princípios, tal modelo pode ser classificado como um sistema de controle com realimentação, uma vez que tal conceito é definido como “um sistema que estabeleça uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle” (Ogata, 2010, p. 6). Sob a perspectiva de projeto, entretanto, o Modelo 1 não se enquadra dentro dos parâmetros convencionais da Teoria de Controle, já que a compensação do sistema não é representada matematicamente e não é feita de forma automática, mas sim por meio da ação do usuário, que reaplica a heurística desenvolvida a um conjunto diferente de condições iniciais.

Deve-se destacar que “o primeiro passo no projeto de um sistema de controle é a obtenção de um modelo matemático da planta ou do objeto a ser controlado” (Ogata, 2010, p. 6). Nos modelos 3 e 4, a dinâmica do sistema a ser controlado é o alvo da modelagem. Tais modelos de fato representam sistemas dinâmicos propriamente ditos. Ambos são capazes de responder automaticamente a uma perturbação no sinal de entrada, buscando minimizar o efeito de tal perturbação e trazer o sistema novamente ao equilíbrio. No modelo 3, esta perturbação corresponde, por exemplo, à chegada de uma ordem urgente, que aumenta o conteúdo do trabalho a ser processado. A variável tempo considerada no modelo corresponde de fato aos dias úteis de produção em um ambiente *job shop*. Assim, pode-se ter uma

estimativa de quanto tempo o sistema levaria para retornar ao equilíbrio e de quais incrementos de capacidade, por exemplo, seriam necessários para responder a essa perturbação. O modelo 4, por sua vez, foi simulado em uma situação de quebra de máquina. Como resposta a essa perturbação, o fluxo de material foi ajustado, evitando-se o acúmulo de estoque em processo em determinado ponto do sistema e a interrupção imediata do fluxo à jusante.

Observa-se também que o Modelo 3 é bem mais complexo do que os demais, não só em relação ao processamento matemático, mas também em termos de aplicação prática, já que ele requer a medição de diversas variáveis relativas à execução da programação no chão de fábrica e a definição de vários parâmetros do sistema de produção. Em resumo, este modelo possui uma quantidade maior de variáveis em relação aos demais e exige um maior esforço de coleta e pré-processamento dos dados.

Por outro lado, a metodologia de modelagem empregada para a obtenção do Modelo 4, baseada em grafos de ligação, permite que o modelo matemático seja obtido com maior facilidade, desde que um modelo físico consistente seja desenvolvido. Assim, o primeiro passo é o desenvolvimento de um modelo físico (modelo esquemático) que seja capaz de representar o sistema real, considerando-se algumas hipóteses. A partir daí, deve-se buscar associar os elementos desse modelo com os elementos básicos dos grafos de ligação.

Um dos objetivos deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo dinâmico que tenha um bom grau de aderência aos sistemas reais de produção e que atenda às restrições práticas do planejamento e controle da produção em empresas de manufatura. Para atingi-lo, seria necessário adaptar e expandir o Modelo 4, de forma que ele possa representar a dinâmica de um sistema de produção de múltiplos produtos com fluxo de produção relativamente complexo. Constatou-se que os elementos utilizados no modelo proposto por Ferney (2000) permitem essa expansão. Assim, tal modelo foi escolhido para embasar o desenvolvimento de um modelo dinâmico que permita o controle de produção de múltiplos produtos, em um sistema de produção com fluxo *job shop*.

Uma vez apresentada a estrutura conceitual-teórica que fundamenta o trabalho, serão discutidos, no próximo capítulo, aspectos específicos das metodologias de pesquisa utilizadas.

Capítulo 4

Metodologia de pesquisa

Este capítulo é destinado à caracterização da pesquisa e à apresentação da metodologia utilizada, incluindo-se a discussão das variáveis, proposições e estrutura de desenvolvimento.

Antes de iniciar tais discussões, é interessante retomar os objetivos deste trabalho, que são:

1. verificar, na prática, quais são as métricas de desempenho importantes para a função de Planejamento e Controle da Produção nas empresas de manufatura;
2. examinar a influência das variáveis integração, incerteza e qualidade da informação no desempenho do Planejamento e Controle da Produção (PCP), em termos de nível de reprogramações;
3. observar como esse nível de reprogramações está relacionado ao desempenho da empresa em termos de fatores competitivos e financeiros;
4. desenvolver um modelo dinâmico para controle da produção que seja capaz de executar reprogramações e ajustes, automaticamente, em resposta a incertezas e modificações nas condições de produção;
5. incorporar, nesse modelo, variáveis relevantes à função de Planejamento e Controle da Produção e alinhá-lo às principais métricas de desempenho dessa função.

4.1 Caracterização da pesquisa

Como se pode observar, os objetivos do trabalho pertencem a contextos bem distintos. Os três primeiros estão relacionados à interpretação do ambiente e da percepção dos indivíduos envolvidos com a problemática, o que, segundo Martins (2010), caracteriza a abordagem qualitativa. Os dois últimos objetivos, por outro lado, requerem o uso de variáveis quantitativas, mensuráveis, e linguagem matemática. Dessa forma, foram utilizadas neste trabalho tanto a abordagem qualitativa quanto a quantitativa, em momentos distintos.

Em relação aos propósitos da pesquisa, para os objetivos 1, 2 e 3 realizou-se uma pesquisa de cunho descritivo, uma vez que se buscou um melhor entendimento dos elementos citados - ambiente e indivíduo - em um contexto específico, isto é, no contexto da função de Planejamento e Controle da Produção. Além disso, o intuito, nesse primeiro momento, foi de identificar características importantes que permeiam as atividades dessa função, bem como estabelecer suposições sobre determinadas relações entre as variáveis da pesquisa, segundo a percepção das pessoas envolvidas. Os estudos descritivos procuram justamente especificar as propriedades, as características e os perfis importantes de pessoas, grupos, comunidades ou qualquer outro fenômeno que se submeta à análise (DANHKE¹², 1989 apud SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2006). Deve-se destacar que já existe um corpo teórico tratando de algumas relações entre as variáveis integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho, o qual foi utilizado para embasamento.

Para a pesquisa qualitativa e descritiva, ligada aos dois primeiros objetivos do trabalho, o método de estudo de casos múltiplos foi adotado. Para a etapa quantitativa, aplicou-se a metodologia de modelagem e simulação, mais especificamente, a metodologia de Modelagem de Sistemas Dinâmicos, conforme será detalhado adiante.

Nos estudos de caso, buscou-se entender o problema da pesquisa e as relações entre as variáveis em um contexto mais restrito, em uma amostra de quatro empresas. O intuito foi o de observar as variáveis organizacionais com maior proximidade, captar mais nuances e considerar a realidade subjetiva dos indivíduos envolvidos na pesquisa. A integração, por exemplo, é uma questão que envolve diretamente o comportamento de pessoas e suas percepções, daí ser interessante estudá-la qualitativamente e a partir de um estudo de caso. “O estudo de caso permite uma investigação para preservar as características holísticas e significativas dos eventos da vida real” (YIN; 2001).

Os estudos de caso conduzidos geraram um instrumento de coleta de dados que será utilizado para a realização de uma pesquisa quantitativa mais estruturada, visando a generalização parcial de alguns resultados. Esta pesquisa quantitativa do tipo *survey* deverá ser realizada em uma etapa posterior, ou seja, não está inserida no escopo deste trabalho.

Na parte quantitativa da pesquisa, propôs-se um modelo que possa abordar o problema de programação e reprogramação de operações de forma alternativa em relação aos modelos apresentados na literatura, visando melhorar, em algum aspecto, os resultados existentes. Assim, segundo o modelo de Bertrand e Fansoo (2002), pode-se classificar a pesquisa

¹² DANHKE, L. B. Investigación y comunicación. In: FERNÁNDEZ-COLLADO, C; DANHKE G. L., **La comunicación humana: ciencia social**. México: McGraw-Hill, 1989.

quantitativa realizada como axiomática normativa. Adicionalmente, tentou-se trazer alguns elementos da pesquisa empírica para essa pesquisa axiomática normativa, com a preocupação de assegurar que haja adesão entre as observações na realidade e o modelo representativo daquela realidade. Isso foi feito por meio da incorporação de alguns resultados observados no estudo de caso ao contexto da modelagem, e também por meio do levantamento de dados de um sistema produtivo real para serem utilizados como parâmetros do modelo.

Uma vez caracterizadas as diferentes etapas da pesquisa, serão detalhados a seguir alguns elementos das metodologias utilizadas, como a unidade de análise e atores da pesquisa, as variáveis, os instrumentos de coleta de dados e a estrutura de desenvolvimento.

4.2 Unidade de análise dos estudos de caso e dos atores da pesquisa

Segundo Yin (2001), um elemento importante na realização de um estudo de caso é a formulação de proposições, especialmente quando o estudo é aplicado à explicação. As proposições auxiliam a reduzir o escopo do projeto de pesquisa, estabelecer direção e foco. Em resumo, elas levam à definição da unidade de análise do estudo de caso.

Conforme dito anteriormente, o estudo de casos múltiplos foi focado na função de Planejamento de Controle da Produção das empresas. Assim, os principais atores da pesquisa foram os diretores, gerentes e funcionários do time, departamento ou função de PCP. Foram incluídas nesse grupo todas as pessoas de diferentes níveis hierárquicos que eram diretamente responsáveis pelas atividades de PCP em cada empresa.

Dentro dessa unidade de análise foram investigados aspectos gerais da empresa, como porte, política de resposta à demanda (MTS, MTO, etc.), tipo de fluxo de produção, famílias de produtos, mercados e concorrentes, entre outros. Com relação especificamente à função de PCP, buscou-se identificar: as principais atividades realizadas, o fluxo de informações entre essas atividades e os principais responsáveis pelas mesmas; as principais dificuldades encontradas no exercício da função de PCP; os indicadores de desempenho pelos quais essa função é cobrada e, finalmente, as relações entre variáveis de controle específicas, as quais serão detalhadas a seguir.

4.3 Variáveis e proposições do estudo de caso

As variáveis principais do estudo de caso, para as quais foram direcionados os esforços de coleta de dados, são:

- integração interna, considerando as dimensões técnica e organizacional;
- incerteza ambiental, ligada à demanda, ao suprimento externo, aos concorrentes e às tecnologias de processo;
- qualidade de informação, no que tange especialmente às informações de previsão de demanda com as quais o PCP trabalha;
- desempenho, em termos de frequência de reprogramações necessárias;
- desempenho, com relação aos indicadores de desempenho pelos quais a função de PCP é cobrada;
- desempenho geral da empresa, tanto em termos de prioridades competitivas (custo, qualidade, confiabilidade na data de entrega, velocidade e flexibilidade) quanto em termos de indicadores financeiros gerais, como crescimento em vendas.

As definições conceituais dessas variáveis foram apresentadas com detalhes no capítulo 2, com base na revisão de literatura.

Com relação à integração, desejou-se investigar quais mecanismos de integração organizacional a empresa utilizava, tais como reuniões, comunicação informal, alinhamento de objetivos entre as áreas, etc. Com base nessa análise e na própria percepção dos entrevistados, situou-se o PCP da empresa em determinado nível de integração organizacional. Além disso, buscou-se avaliar o grau de integração técnica entre as atividades do PCP, a partir da análise dos sistemas de informação envolvidos nessas atividades. Na Figura 4.1, mostram-se as dimensões da integração que foram investigadas nos casos.

Figura 4.1 – Dimensões da integração investigadas nos estudos de caso.

De forma semelhante, avaliou-se também o nível e os tipos de incerteza aos quais a empresa está submetida em seu mercado. As dimensões de incerteza investigadas são mostradas na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Aspectos da incerteza ambiental investigados.

A variável qualidade de informação foi medida principalmente em termos de acurácia e credibilidade das informações de demanda externa com as quais o PCP trabalha. Tais informações correspondem às previsões de demanda, para empresas que produzem para estoques (MTS), ou aos pedidos em carteira, para empresas que produzem sob encomenda (MTO). A avaliação dessa variável envolveu diretamente a análise das interfaces entre a função de Planejamento e Controle da Produção e outras funções, como Vendas/*Marketing*, principalmente. Conforme destacado na literatura, estas interfaces também estão diretamente ligadas ao estudo da integração no contexto do PCP.

Figura 4.3 – Dimensões da qualidade da informação investigadas nos casos.

Como principal proposição do estudo, investigou-se a influência dessas variáveis – integração, incerteza e qualidade da informação – no desempenho da função de PCP e no desempenho da empresa. Entretanto, o constructo desempenho possui diversas definições. Nas pesquisas empíricas na área de manufatura, conceitos e métricas diferentes são utilizados na operacionalização desse constructo, conforme discutido no capítulo 2.

Nesse trabalho, o desempenho foi tratado sob três perspectivas diferentes: a perspectiva das reprogramações, dos indicadores de desempenho do PCP e do desempenho geral da empresa.

Sabe-se que as reprogramações, ou seja, as mudanças de planos e alterações de programação sejam um aspecto corriqueiro da prática do PCP. Entretanto, com base na revisão da literatura internacional recente na área de Manufatura, PCP e Cadeia de Suprimentos, observou-se que esta dimensão do desempenho não tem sido diretamente explorada nas pesquisas empíricas correlacionais nem nas pesquisas qualitativas do tipo estudo de caso. As reprogramações podem ser entendidas como um retrabalho administrativo, que ocorre em função de eventos não esperados previamente. Assim, por um lado, elas estão diretamente ligadas às incertezas do ambiente externo. No âmbito do PCP, no curto prazo, entende-se que tais incertezas se manifestem principalmente sob a forma de mudanças no comportamento da demanda ou falhas de suprimento externo. Por outro lado, o nível de reprogramações também está diretamente ligado a eventos inesperados internos à empresa, como falhas nos recursos de produção – máquinas, pessoas, matérias-primas e insumos em geral - e falhas na coordenação das operações. Esses elementos formam o que alguns autores denominam incerteza executacional ou incerteza do sistema, conforme discutido no capítulo 2. Para que o desempenho seja avaliado adequadamente, é importante que se faça essa distinção entre as reprogramações causadas por incertezas externas e aquelas causadas por deficiências de planejamento, pois estas últimas é que devem ser o foco das ações gerenciais.

Um conceito diretamente ligado ao nível de reprogramações é a confiabilidade interna das operações. A confiabilidade é destacada por Slack e Lewis (2001) como uma das dimensões competitivas da função Produção, sendo definida como a capacidade de

atendimento dos prazos de entrega acordados. Em relação ao aspecto externo, confiabilidade significa entregas pontuais de produtos e serviços ao consumidor. Internamente, para uma determinada operação do sistema produtivo, está associada à entrega pontual de materiais e informações às operações subsequentes. Sendo assim, a confiabilidade confere estabilidade e previsibilidade às operações.

Quanto menor a frequência de reprogramações, maior é a estabilidade do planejamento e controle da produção, melhor é a coordenação entre as operações e, conseqüentemente, melhor o desempenho operacional em termos de custo. Entretanto, ter um nível alto de reprogramações também pode significar ser responsivo às necessidades do cliente, ter flexibilidade para atendê-las. Assim, observa-se que a variável reprogramação não pode ser utilizada isoladamente como medida de desempenho, mas sim, deve ser analisada em paralelo com outras variáveis de desempenho da produção, como confiabilidade, flexibilidade e custo. Estas últimas também foram definidas no capítulo 2 deste trabalho. Além disso, para a avaliação do desempenho geral da empresa, foram consideradas também medidas financeiras ou estratégicas, como crescimento das vendas, lucros ou parcela de mercado, por exemplo. A Figura 4.4 apresenta as três perspectivas do desempenho consideradas no estudo.

Figura 4.4 – Diferentes definições e dimensões do desempenho a serem investigadas: a) perspectiva das reprogramações.

Figura 4.4 – Diferentes definições e dimensões do desempenho a serem investigadas: b) perspectiva dos fatores competitivos; c) perspectiva do desempenho geral da empresa.

Na Figura 4.4 pode-se observar que, além das causas externas e internas das reprogramações, levanta-se outra possível causa, relacionada ao comportamento do próprio executante ou usuário dos planos de produção. A adoção de metas de desempenho e recompensa parciais, baseadas somente na eficiência, pode levar os usuários a realizarem modificações informais nesses planos, motivados pelo cumprimento incondicional dessas metas. Assim, o executante pode, por exemplo, modificar a sequência de produção pré-estabelecida visando atingir metas de produtividade da linha de montagem, não levando em consideração outros indicadores estratégicos, como, por exemplo, o nível de serviço ao cliente.

A principal proposição da pesquisa qualitativa a ser desenvolvida é a de que a integração, a incerteza e a qualidade da informação são variáveis que influenciam diretamente no desempenho do planejamento e controle da produção, em termos de nível de reprogramações. Além disso, supõe-se que a relação entre a incerteza e o nível de reprogramações seja positiva, ou seja, quanto maior o nível de incerteza enfrentado pela organização, maior é o nível de modificações em seu planejamento. Por outro lado, espera-se que a integração e a qualidade da informação exerçam o efeito oposto ao da incerteza, isto é, quanto maior a integração e melhor a qualidade da informação disponível para o planejamento, menor é a necessidade de reprogramações.

Conforme mencionado, o desempenho em termos de reprogramações confere à empresa um equilíbrio em relação a custo, confiabilidade e flexibilidade. Estes são importantes fatores competitivos que, por sua vez, devem levar a um bom desempenho geral da empresa, em termos financeiros e de mercado. Assim, supôs-se que o nível de reprogramações estaria diretamente relacionado aos fatores competitivos de desempenho, em especial aos fatores de custo, confiabilidade e flexibilidade. Finalmente, propôs-se também a existência de uma correlação positiva entre os fatores competitivos e o desempenho geral da empresa, sob o ponto de vista financeiro.

A Figura 4.5 resume os principais aspectos e variáveis de controle investigados no estudo de casos múltiplos, conforme discutido nos itens 4.2 e 4.3. As proposições do estudo são mostradas no diagrama conceitual da Figura 4.6.

Figura 4.5 – Principais aspectos a serem investigados no estudo de casos múltiplos

Figura 4.6 – Principais proposições do estudo de casos múltiplos

4.4 Instrumentos de coleta de dados

A coleta dos dados se deu por meio de entrevistas semi-estruturadas com os atores da pesquisa, ou seja, os funcionários responsáveis pelo Planejamento e Controle da Produção nas empresas. Durante as entrevistas, foram buscadas evidências documentais, como planilhas e sistemas de informação utilizados, documentos mostrando o organograma da empresa, entre outros. Quando possível, também foram feitas visitas ao chão de fábrica, para entendimento do processo produtivo. Entretanto, esse não foi o enfoque central da coleta de dados.

Para auxiliar nas entrevistas, foi elaborado um protocolo de pesquisa, o qual indica o contexto da pesquisa, em termos de área e unidade de análise a ser estudada, e contém o roteiro de questões sobre as variáveis de controle a serem investigadas. O protocolo é apresentado no Apêndice A.

4.5 Estrutura de desenvolvimento do estudo de casos

Para orientar o planejamento e a condução dos estudos de caso, adotou-se a estrutura proposta por Cauchick Miguel (2010), reproduzida a seguir.

Figura 4.7 – Estrutura para condução do estudo de caso. Fonte: Cauchick Miguel (2010).

A definição da estrutura conceitual teórica que embasa os estudos de caso foi apresentada no capítulo 2. As proposições definidas no item 1.1.3 foram desenvolvidas com base nessa estrutura e na análise das fronteiras do conhecimento existente nos temas em questão.

Na execução propriamente dita dos casos, foram utilizados mecanismos de validação dos dados coletados. Os entrevistados realizaram a revisão da transcrição resumida das entrevistas, efetuando correções ou acrescentando informações. Além disso, a análise inicial dos casos suscitou questões adicionais, as que foram enviadas aos entrevistados para confirmação. Como resultado da análise dos casos, gerou-se um instrumento de pesquisa na forma de questionário fechado. Este questionário objetivo também foi enviado aos participantes, para confirmação e refinamento das informações coletadas.

4.6 Metodologia utilizada na modelagem

A metodologia geral de modelagem de problemas de Engenharia de Produção, de acordo com Morabito e Pureza (2010), segue a estrutura e as etapas apresentadas a seguir:

Figura 4.8 – Processo de modelagem. Fonte: adaptado de Morabito e Pureza (2010).

De forma genérica, o desenvolvimento do modelo dinâmico para controle da produção foi realizado de acordo com as etapas apresentadas na Figura 4.8. Entretanto, em termos mais específicos, tal desenvolvimento seguiu as etapas da metodologia de Modelagem de Sistemas

Dinâmicos, a qual é voltada diretamente à obtenção de um conjunto de equações diferenciais ou algébricas capazes de representar a dinâmica de um sistema. O termo "dinâmica", nesse caso, é empregado para se referir especificamente a sistemas que tenham variação no tempo.

As etapas da metodologia de Modelagem de Sistemas Dinâmicos são apresentadas na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Etapas da Modelagem de Sistemas Dinâmicos. Fonte: Speranza Neto e Silva (2005).

Um resumo das atividades realizadas em cada etapa de modelagem é apresentado a seguir. Os itens 1 e 2 representam as etapas do processo de modelagem geral, apresentado por Morabito e Pureza (2010), enquanto os itens 1.1, 1.2 e 3 são específicos da Modelagem de Sistemas Dinâmicos.

1. Definição do problema e construção do modelo:

1.1 Elaboração do modelo físico

O modelo proposto foi desenvolvido para realizar o controle da produção de curto prazo, também denominado controle de chão de fábrica. Em primeiro lugar, selecionou-se um sistema de produção real que apresentasse características interessantes para o problema que se desejava modelar, como o tipo e a complexidade do fluxo produtivo, a quantidade de operações e máquinas, a quantidade e variedade de produtos fabricados, entre outras. Assim, escolheu-se um sistema com fluxo *job shop*, com 11 máquinas e capacidade para fabricar uma razoável variedade de produtos. Os dados desse sistema real foram levantados a partir de

dois estudos de caso prévios desenvolvidos por Minotti (2011) e Perez (2012). Esse sistema será descrito com detalhes no capítulo 6.

A partir dos dados coletados e do entendimento do sistema, elaborou-se um modelo físico (modelo esquemático) para representar as possibilidades de fluxo existentes no sistema, as relações de precedência entre as máquinas, as entradas de material no sistema e as saídas de produtos finais. Este modelo, feito com base nos roteiros de processo dos produtos, corresponde ao modelo físico na metodologia de Modelagem de Sistemas Dinâmicos a estrutura do sistema (desenho do fluxo de processo), seus elementos (máquinas e estoques) e suas ligações.

1.2. Obtenção do modelo matemático

Para se obter o modelo matemático do sistema, utilizou-se a metodologia dos grafos de ligação, apresentada com detalhes no capítulo 3, item 3.4.4. Dessa forma, antes de se desenvolver o modelo matemático propriamente dito, elaborou-se um modelo de grafos do sistema. A partir deste modelo, estabeleceu-se uma analogia entre um dado elemento do modelo físico e um determinado elemento puro da metodologia dos grafos de ligação, com o auxílio das definições de Ferney (2000) para as entidades básicas de um sistema de manufatura. O modelo matemático foi então obtido a partir das equações constitutivas, ou seja, das equações associadas aos elementos puros dos grafos de ligação, juntamente com equações de compatibilidade e continuidade, que garantem o correto acoplamento dos elementos do sistema.

2. Solução do modelo:

Antes de se implementar o modelo matemático utilizando-se um software de simulação, foi necessário obter as soluções do mesmo no regime permanente. Para tal, foi necessário estabelecer algumas condições de contorno coerentes com o problema modelado. As soluções foram obtidas com auxílio do software Matlab[®].

3. Simulação:

A implementação e as simulações do sistema foram feitas em Simulink[®]. Neste trabalho, realizou-se um investigação de cunho exploratório, para se obter um primeiro entendimento sobre o comportamento do sistema. No início, os valores de alguns parâmetros foram definidos com base em trabalhos similares desenvolvidos na literatura ou com base em estimativas. Depois, buscou-se ajustar esses parâmetros, gradualmente, com base na interpretação dos resultados das simulações anteriores. Durante as simulações, foram testados alguns tipos diferentes de controlador. A análise foi focada no regime transiente, caracterizado pelo início da operação das máquinas e pelo preenchimento gradual dos

estoques intermediários. Detalhes da simulação e dos parâmetros utilizados serão apresentados no capítulo 6.

4. Análise dos resultados:

Por fim, a metodologia de modelagem se encerra com a etapa de análise dos resultados das simulações

Conforme já mencionado, o trabalho proposto empregou uma metodologia de pesquisa mista que engloba o método de estudo de caso e de modelagem, sendo que alguns resultados do estudo de caso foram considerados na elaboração do modelo quantitativo. A Figura 4.10 mostra, em paralelo, as etapas de ambos os métodos empregados.

Figura 4.10 – Estrutura geral de desenvolvimento da pesquisa.

A descrição das etapas mostradas na Figura 4.10 foi realizada no decorrer desse capítulo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados detalhados do estudo de caso realizado, contendo casos múltiplos. Em seguida, no capítulo 6, apresentam-se os detalhes da modelagem do sistema dinâmico de controle da produção, seguindo-se as etapas gerais que já foram descritas neste capítulo.

Capítulo 5

Desenvolvimento e análise do estudo de casos múltiplos

Conforme apresentado no capítulo 1, este trabalho se propõe, em um primeiro momento, a investigar qualitativamente as relações entre a integração, a incerteza, a qualidade da informação e o desempenho no âmbito da função de Planejamento e Controle da Produção de empresas de manufatura. As bases teóricas para o estudo dessas relações foram apresentadas no capítulo 2. No capítulo 4, relativo à metodologia de pesquisa, foram apresentadas as várias dimensões de cada um dos constructos a serem explorados, bem como as proposições do estudo, as quais expressam as relações que se espera observar entre os constructos. Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com o estudo de casos múltiplos realizado para investigar tais constructos e suas relações.

5.1 Aspectos gerais do desenvolvimento e caracterização das empresas estudadas

O estudo de caso foi realizado em quatro empresas de manufatura do estado de São Paulo, sendo três de grande porte e uma de médio porte. Todas as empresas pertencem a corporações multinacionais com sede em outros países, possuem ramos de atuação distintos entre si, e foram escolhidas por serem referências em seus respectivos ramos. Nessas empresas foram entrevistados, no total, seis funcionários com funções de supervisão, chefia ou gerência de Planejamento e Controle da Produção, ou funções correlatas. As empresas solicitaram que seus nomes não fossem divulgados na pesquisa. Assim, as empresas serão denotadas por números de 1 a 4.

As entrevistas, gravadas em arquivos de áudio, foram transcritas na íntegra. Depois, o conteúdo foi compilado e resumido, gerando-se um relatório para cada entrevista. Com base nesses relatórios, por sua vez, elaborou-se um painel de resumo que forneceu embasamento à análise comparativa entre casos.

No início das entrevistas, buscou-se obter uma caracterização geral das empresas, a qual incluiu fatores como o porte da unidade de negócios analisada, a função do respondente,

o tipo de sistema de produção e a variedade de itens que a função de Planejamento e Controle da Produção (PCP) tem que gerir. Essa caracterização é mostrada no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Características gerais das empresas estudadas.

Empresa		1	2	3	4
Porte / volume		médio	grande	grande	grande
Tipo de sistema de produção	em relação à demanda	quase totalmente MTO poucos itens MTS	MTS (mercado int. - 40%) e MTO (merc. ext. - 60%) produto com sazonalidade; linearização da produção usando o MTO	MTS e MTO, ATO e até ETO (muito variável, dependendo da linha de produtos) - para as linhas analisadas, predomina MTS e alguns produtos ATO	MTS (principal) e MTO (mercado externo)
	em relação ao processo de produção	por processo (jobshop); produto personalizado, roteiros distintos	montagem: batchshop pelas características intrínsecas do produto	vários sistemas, dependendo da unidade de negócio	montagem: flowshop
Variedade (no. SKUs)		média/alta	média	altíssima - muitos SKUs divididos em várias divisões de negócio	baixa - 60 SKUs - 2 grandes famílias, mix 70%-30% (naquela planta)
Atividades do PCP		receber os pedidos de vendas e estipular/confirmar datas de entrega; fazer a programação no nível de programa mestre, MRP e Scheduling (por máquina-gargalo); fazer o planejamento agregado e estratégico, atualmente incipientes.	realizar o planejamento macro com base nas previsões de demanda; desagregar e fazer planos intermediários, até obter planos detalhados por produto; determinar níveis de estoque; Scheduling é responsabilidade da Produção	S&OP, MPS, MRP, definição de limites máximos e mínimos de estoque para rodar kanban, compras (Scheduling é compartilhado com a Manufatura)	operacionalização do S&OP, dimensionamento de estoques (outro time), análise de capacidade, MPS, scheduling

É importante conhecer tais características gerais da empresa uma vez que elas influenciam na estrutura do PCP adotada. Quando possível, examinou-se também a estrutura organizacional geral da empresa e a estrutura organizacional interna do PCP, bem como as principais atividades executadas por esta função. Esses fatores auxiliaram no entendimento dos fluxos de informação e dos relacionamentos entre os atores do PCP. Em todas as empresas, observou-se que a função de PCP é responsável por executar atividades semelhantes, que correspondem àquelas destacadas na literatura básica da área, como o Planejamento Agregado, o Programa Mestre, o Planejamento de Necessidades de Material (*Material Requirements Planning*, MRP), a gestão de estoques e capacidade e a Programação de Operações.

Após a caracterização inicial das empresas e levantamento das atividades do PCP, foram investigadas as variáveis e proposições do estudo de caso apresentadas na Figura 4.5 e 4.6 do capítulo 4. Um resumo desses aspectos investigados é apresentado no Quadro 5.2. Para direcionamento das entrevistas, utilizou-se o protocolo de coleta de dados apresentado no Apêndice A.

Quadro 5.2- Resumo dos aspectos investigados no estudo de caso

Processos e fluxo de informações no PCP	
Problemas ou questões críticas relacionados diretamente ao PCP	
Estrutura organizacional na qual o PCP está inserido	
S&OP - Existência de um processo de Planejamento de Vendas e Operações	
Mecanismos de integração existentes em cada empresa/unidade de negócio	
Integração organizacional	comunicações e reuniões
	decisões compartilhadas - planos conjuntos
	procedimento formal de S&OP - frequência
	troca de idéias
	entendimento comum dos objetivos
Integração técnica	interface
	compatibilidade
Incerteza	variações na demanda
	comportamento do fornecedor
	ação dos competidores
	mudanças das tecnologias de produção
Frequência das reprogramações	formais
	informais
Causas das reprogramações	
Objetivos de desempenho	gerais da empresa ou unidade de negócios
	do PCP
Outras observações	

A seguir, apresenta-se a análise individual de cada caso estudado, detalhando-se os aspectos mostrados no Quadro 5.2.

5.2 Análise dos dados coletados na empresa 1

5.2.1 Fluxo de atividades do PCP

Na empresa 1, o fluxo de atividades da função de Planejamento e Controle da Produção é iniciado pela Área de Vendas, que recebe o pedido do cliente e solicita ao PCP uma confirmação de prazo de entrega. Como esperado, o planejamento da produção não é realizado com base na previsão de demanda, mas sim na carteira de pedidos, uma vez que se produz contra-pedido (MTO). Segundo o respondente, a função do PCP nessa etapa é mais de confirmar a data de entrega do que propriamente estimá-la, uma vez que há um acordo comercial com *lead times* previamente estipulados para cada tipo de produto. Esses *lead times* foram definidos com base nas necessidades do mercado e na capacidade e tecnologia que a empresa possui. Na data em que a entrevista foi realizada, estava sendo implantado na empresa um sistema de reserva de capacidade para a programação da produção de médio e curto prazo, a ser utilizado pelos vendedores e pela equipe de PCP, de forma compartilhada. O sistema mostrava os pedidos já alocados e fornecia uma indicação da primeira data disponível para colocar um novo pedido de um dado cliente. Além disso, ele permitia que se fizesse uma reserva de capacidade a partir do momento em que o processo de negociação com o cliente era iniciado, segundo uma escala de probabilidade comercial de sucesso. Os produtos fabricados na empresa 1 tem certo grau de personalização para cada cliente, e essa probabilidade de sucesso depende da etapa em que está o processo de definição do orçamento e das especificações do produto. Para exemplificar, o respondente apresentou a seguinte escala de probabilidade comercial de sucesso:

- 0%: o vendedor enviou a cotação preliminar ao cliente e está aguardando uma resposta;
- 25%: o cliente aceitou a cotação e a amostra do produto começa a ser desenvolvida;
- 50%: o cliente já aceitou parte das especificações e do custo;
- 75%: o cliente está em vias de fechar o pedido.

Tais probabilidades estabelecem a priorização na alocação de capacidade. Obviamente, um pedido concretizado tem prioridade em relação às reservas de capacidade. O sistema de reservas de capacidade também indicava quais pedidos entraram no período de congelamento (*time fences*) e, conseqüentemente, estavam liberados para serem produzidos.

Os produtos da empresa 1 são divididos em famílias, baseadas nos roteiros de processo. Quando um novo pedido era realizado, podia-se visualizar, por meio do software de ERP da empresa, a carga das máquinas necessárias para a fabricação daquele pedido, incluindo as reservas de capacidade. Todo esse sistema apoiava a programação de curto prazo, como dito anteriormente.

Independentemente da personalização dos produtos, havia uma máquina comum a todos os roteiros de processo. Assim, a programação de curto prazo era realizada com base nessa máquina-gargalo, com o auxílio de planilhas eletrônicas. As regras de sequenciamento eram estabelecidas em função da minimização do tempo de *setup*. A partir do sequenciamento na máquina-gargalo, determinava-se a data efetiva de entrega do produto com base em um cálculo médio, acrescentando-se os tempos médios de processamento do produto nas demais máquinas. Esse sequenciamento dos produtos era feito na Produção (chão de fábrica). Em geral, seguia-se a regra FIFO, porém, eram necessárias pequenas modificações já que alguns produtos passam por mais processos do que outros. Assim, o sequenciamento da máquina-gargalo constituía-se a base para a programação dos processos de fabricação anteriores, bem como base para a programação dos processos subsequentes de acabamento. O critério de priorização mudava no processo de embalagem final, que era realizado em função da lista de entrega.

5.2.2 Questões críticas relacionadas ao PCP

Um aspecto crítico associado à atuação do PCP, segundo o entrevistado, se refere à inexistência de um sistema que possa abranger o grande número de variáveis envolvidas no planejamento e programação da produção da empresa. Tal número é ampliado devido às possibilidades de personalização dos produtos. Segundo a percepção do respondente, como o sistema não estava preparado para considerar essa quantidade de variáveis, quando um dado evento relacionado a uma variável não considerada no sistema ocorria, um alto esforço de reprogramação era requerido. Para exemplificar esse ponto, foram relatadas duas situações:

- a manutenção preventiva de uma determinada máquina não ocorreu na data planejada. Nos períodos futuros, tem-se um risco maior de quebra dessa máquina, o qual não foi considerado no planejamento;

- certa máquina foi adaptada para um determinado produto A. Um tempo depois, percebe-se que essa adaptação torna a produção do produto B menos eficiente, gerando um atraso significativo. Programou-se que o produto B seria processado com a mesma velocidade do produto A ou outro produto-padrão, e isso não ocorre.

Nesse segundo exemplo apresentado, o planejamento não é eficiente devido à dificuldade de se coletar informações acuradas sobre o processo e suas variáveis.

5.2.3 Estrutura organizacional

A estrutura organizacional na qual o PCP está inserido não foi detalhada. Sabe-se que na unidade de negócios estudada, os responsáveis diretos pelo Planejamento e Controle da Produção são os supervisores de produção. Há líderes que respondem diretamente aos supervisores e que se encarregam de elaborar e monitorar a programação detalhada da produção no chão de fábrica, depois que o sequenciamento para a máquina-gargalo é definido.

5.2.4 Mecanismos de integração

A partir da entrevista, identificou-se a presença dos seguintes mecanismos de integração na empresa 1:

- sistema de informação: pode-se considerar que o sistema de reserva de capacidade descrito no item 5.2.1 seja um importante mecanismo de integração entre a área de vendas e a área de PCP, possibilitando que ambas as áreas tenham acesso a informações comuns, essenciais ao planejamento. Nesse caso, a integração técnica, ou seja, a existência do sistema compartilhado, destaca-se como uma dimensão relevante da integração. Por outro lado, observa-se que esse sistema não é integrado às planilhas utilizadas para a programação detalhada da produção. Com base em informações obtidas em um momento posterior à entrevista, soube-se que o sistema de reservas de capacidade descrito não estava sendo utilizado para todos os produtos. Essa falta de compatibilidade técnica entre esse sistema e as planilhas de programação detalhada

pode ser um fator que inibe uma integração maior. Além disso, não está descartada a hipótese de haver outros fatores organizacionais dificultando o uso efetivo desse mecanismo de integração. Um grupo de projeto foi formado na empresa para investigar melhor esta questão.

- comunicação e reuniões: há reuniões com o pessoal da produção para acompanhar os desvios da programação. Caso haja algum imprevisto que não pode ser corrigido a tempo por vias regulares, verifica-se se é possível priorizar um determinado pedido de um cliente importante. As datas de entrega dos pedidos geralmente têm um folga. Caso não seja possível manter essas datas, o cliente é informado de que haverá um atraso. Nesse caso, o pessoal de vendas também é envolvido. Analisa-se se há um pedido de outro cliente que compete pelos mesmos recursos. Se este pedido não for prioritário, ele deve ser atrasado para manter a data de entrega mais importante e que está com atraso potencial. Segundo o entrevistado, esta é uma decisão comercial, que também leva em conta se o tipo de cliente é nacional ou de exportação. Os clientes de exportação já contam com tempos de espera mais longos, uma vez que a data de entrega depende de um conjunto de variáveis de difícil controle, como as questões de desembaraço alfandegário, por exemplo.
- padronização de atividades e atribuição de responsabilidades: ocorreram mudanças de paradigma e reestruturação na unidade de negócios, e estes fatores foram apontados como responsáveis pela melhoria do nível de serviço e dos problemas relacionados às reprogramações. Segundo o relato do entrevistado, a empresa tinha ferramentas de gestão que eram adequadas a determinado volume de produção. Em um dado momento, foi necessário triplicar o volume produzido. Os sistemas disponíveis não eram suficientes, não suportavam a programação que era necessária para aquele porte. Enquanto esse sistema não estava desenvolvido, aumentou-se a frequência das reuniões entre PCP, Produção e Vendas. Progressivamente, conseguiu-se ajustar o sequenciamento na máquina-gargalo, organizou-se a lista de entrega e se atribuíram responsabilidades definidas às pessoas. Assim, foram determinados os responsáveis por elaborar determinadas planilhas, bem como os critérios e frequência da programação e do controle. O sistema implantado passou então a atender às necessidades. Foram criadas também algumas ferramentas de gestão visual como, por exemplo, quadros de metas e acompanhamento visual do sequenciamento com base nos contenedores que abastecem as máquinas. Estes controles do dia-a-dia foram implantados para garantir que o planejamento, que possui uma margem de segurança,

seja executado e para que, caso ocorra algum problema, ele possa ser corrigido a tempo.

- porte da empresa (unidade de negócios): um fator relevante que pode ser observado refere-se ao porte da unidade de negócios analisada. Apesar de ter um volume de produção bastante significativo, a unidade é pequena e tem relativamente poucos funcionários. Segundo o entrevistado, esse fator favorece a proximidade entre as pessoas, gerando a integração organizacional. Além disso, a unidade de negócios tem poucos anos de existência, o que explica o fato de, em um passado recente, não haverem sistemas de gestão da produção bastante estruturados e consolidados. Aqui não se está afirmando que esta relação entre porte e integração é generalizável. Seria absurdo afirmar que o porte pequeno é uma condição necessária para a existência da integração. Apenas observou-se que, segundo a percepção do respondente, esse fator influenciou favoravelmente a comunicação entre as pessoas.

5.2.5 Reprogramações: frequência e causas

Na empresa analisada, existem duas situações que exigem reprogramação: desvios corriqueiros que não afetam diretamente as datas de entrega e que são ajustados diretamente pelo pessoal do chão de fábrica, e desvios que afetam tais datas, os quais são tratados em conjunto com a equipe de PCP e vendas. Numa situação anterior, toda a semana havia uma reunião na qual se olhava a carteira a ser entregue e se questionava a situação de cada pedido, verificando-se se estava conforme o programado ou se haveria algum risco de não se cumprir a data de entrega. Com uma melhor estruturação do PCP isso parou de ocorrer, pois a fábrica atingiu um nível de serviço (OTIF) de 95%. As datas de entrega estavam sendo cumpridas e o processo estava bem controlado. Os líderes e supervisores de produção têm a função de acompanhar se a programação da máquina-gargalo foi seguida, se as outras operações foram executadas conforme programado, etc. A informação chega para o supervisor de PCP se o desvio for muito grande. No momento em que a entrevista foi realizada, as reuniões com o pessoal de vendas estavam sendo ocasionais, apenas para tratar desvios extraordinários.

Num primeiro momento, a principal causa das reprogramações foi a inexistência de um sistema estruturado e consolidado de planejamento da produção, adequado à realidade da unidade de negócio da empresa. Quando se conseguiu implantar esse sistema básico, o

problema seguinte foi de comunicação e aderência do sistema em relação à realidade. Os critérios adotados para se realizar a programação não condiziam exatamente com as condições reais de produção, e o pessoal da área de Produção tinha que ajustar os planos lançados, o que dificultava o acompanhamento e controle da situação real. Alguns aspectos que ocorriam na realidade não estavam previstos no sistema e havia também um problema de acurácia em relação às informações de *setup*, capacidade de máquina, fluxo de processamento, etc. A partir daí foram implantadas melhorias em duas frentes: melhorou-se o sistema utilizando-se um ciclo PDCA, colocando-se novos parâmetros e ajustando os existentes; melhorou-se também o maquinário, o processo, realizando-se programas de manutenção das máquinas que apresentavam problemas.

Com isso, essa causa anterior de reprogramações não se mostra mais tão significativa. No novo contexto, com o melhor ajuste do sistema básico de PCP, alguns pedidos têm que ser reprogramados por questões de qualidade, ou seja, retrabalho e refugo. Se um lote apresenta algum problema de qualidade em uma das operações, o próprio pessoal do chão de fábrica é responsável por colocar aquele pedido na fila novamente. Na unidade de negócios analisada, trabalha-se frequentemente com novos produtos, um vez que estes são personalizados. Nesse caso, nem sempre se consegue ajustar a máquina adequadamente no lote-piloto, e parte daquele lote é perdida. Se essa parcela perdida é muito significativa, tem-se que reiniciar o processo, mudar o sequenciamento etc.

5.2.6 *Objetivos de desempenho e indicadores*

A minimização de custo foi citada como um dos objetivos de desempenho que a unidade de negócios estava com mais dificuldade de atingir, no momento da entrevista. O cumprimento das datas de entrega era o objetivo mais cobrado, e a meta associada a esse objetivo estava sendo cumprida satisfatoriamente. Segundo o respondente, a flexibilidade era muito cobrada pelo mercado, devido às possibilidades de personalização do produto, mas desde o início se buscou atender a este requisito. Na realidade, na empresa 1, havia uma meta para cada um dos cinco objetivos de desempenho da produção tratados no capítulo 2 (custo, qualidade, velocidade, confiabilidade e flexibilidade). Custo, confiabilidade e flexibilidade, foram relatados como sendo os mais relevantes.

5.2.7 *Outras observações*

Segundo o entrevistado, o principal ponto de melhoria, no que tange ao PCP, seria o desenvolvimento de um sistema unificado para integrar e apoiar todos os níveis de planejamento, incluindo o nível estratégico. No momento do estudo de caso, o planejamento estratégico estava sendo feito com base em um conjunto de ferramentas desenvolvidas especificamente para o ramo de negócios em questão, utilizando-se planilhas eletrônicas. O planejamento de nível médio era realizado com base nas ferramentas do sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) e o planejamento de curto prazo, por meio de planilhas eletrônicas. Estava prevista uma migração do planejamento de curto prazo para o sistema ERP, mas utilizando-se um conjunto de transações que não tem uma ligação muito direta com os outros níveis de planejamento. De acordo com os relatos, parecia haver certa dificuldade para se conseguir a aderência do sistema ERP aos processos de negócio da empresa. O desenvolvimento desse sistema unificado fortaleceria a integração entre estratégia e execução, dimensões relevantes e presentes na literatura, conforme discutido no capítulo 2.

5.2.8 *Quadro resumo e avaliação da relação entre os constructos*

Nas entrevistas realizadas em cada empresa, os respondentes avaliaram as dimensões relacionadas à integração, incerteza e desempenho segundo uma escala qualitativa composta pelos seguintes níveis: ausente, baixo, médio, médio-alto e alto. A avaliação feita pelo entrevistado da empresa 1 é mostrada no Quadro 5.3. Pode-se observar que o entrevistado percebe a integração organizacional com sendo alta, pois todos os fatores ligados a essa integração receberam uma avaliação alta; apenas o quesito “comunicações e reuniões” foi avaliado com uma nota intermediária. Por outro lado, nota-se que a integração técnica entre os processos de PCP ainda está em um nível intermediário. Os diferentes níveis de planejamento são realizados com a utilização de diferentes ferramentas computacionais que são pouco compatíveis entre si, uma vez que não há uma transferência automática de dados de uma ferramenta à outra.

A partir dos dados apresentados também se constata que a empresa 1 está sujeita a um nível relativamente baixo de incerteza, uma vez que não há variações pronunciadas na

demanda. Conforme mencionado, a empresa fabrica contra pedido, e os clientes praticamente não alteram os pedidos. Além disso, os fornecedores não apresentam um nível alto de atrasos, a empresa é pouco vulnerável a competidores e a tecnologia de processo não é modificada com uma frequência alta.

Nesse caso, não é aplicável analisar a qualidade da informação associada à previsão de demanda, uma vez que o planejamento da produção não se baseia em previsões. Isso leva à proposição de que a integração na interface entre a função de Vendas e de Planejamento, embora relevante, seja menos crítica do que em empresas que produzem para estoque (do tipo MTS, *Make to Stock*) e que possuem alta diversidade de itens. Essa integração, todavia, ainda é relevante, uma vez que o planejamento eficaz requer informações acuradas sobre os pedidos efetivamente colocados.

Nessa empresa estudada, não foi possível obter informações quantitativas sobre a frequência das reprogramações no nível mais detalhado do planejamento. A causa citada como mais relevante para as mudanças de programação foram os problemas de qualidade do produto, ou seja, um fator interno. Esse resultado condiz com o fato de a empresa não estar sujeita a altos níveis de incerteza ambiental, conforme exposto nos parágrafos anteriores. Neste caso, é esperado que a principal causa das reprogramações não seja um fator externo. Em um momento anterior à entrevista, pode-se considerar que a empresa estava sujeita a um nível alto de incerteza, uma vez que havia uma demanda crescente no mercado, exigindo um crescimento acelerado do sistema de produção. Foi necessário triplicar o volume de produção em um curto espaço de tempo. Como resposta, os mecanismos de integração foram intensificados: a frequência de reuniões aumentou e houve um esforço de padronização de atividades e definição de responsabilidades. Além disso, é possível observar, pelas evidências apresentadas, que os mecanismos de integração desenvolvidos afetaram positivamente o desempenho, principalmente em termos de confiabilidade de entrega (nível de serviço). Esses fatos fornecem indícios da correlação entre integração, incerteza e desempenho, mostrando que situações de alta incerteza levam à intensificação da integração, a qual, por sua vez, influencia positivamente o desempenho.

Este caso também ilustrou a presença de dois mecanismos de integração que não foram mencionados nos demais casos: o porte da empresa e a questão da padronização de atividades e atribuição de responsabilidades. Conforme já discutido, o porte pequeno da unidade estudada não deve ser entendido como condição necessária para se obter alta integração organizacional, entretanto, existe a percepção de que este fator influencie positivamente essa integração, no caso da empresa 1. A questão da padronização de atividades

e atribuição de responsabilidades foi mencionada como um fator relevante na empresa 1 provavelmente porque essa empresa (que na verdade é uma unidade de negócios de uma grande empresa) era relativamente nova, de forma que ainda estava passando por um período inicial de estruturação de atividades e responsabilidades. Esse fator provavelmente não foi citado nos outros casos porque todas as demais empresas estudadas tem um nível maior de maturidade no planejamento, de forma que as responsabilidades, em geral, são mais bem definidas e os processos apresentam um grau considerável de padronização.

Quadro 5.3 – Resumo das observações relativas à empresa 1.

Empresa 1		
Porte / volume		médio
Tipo de sistema de produção	em relação à demanda	quase totalmente MTO poucos itens MTS
	em relação ao processo de produção	por processo (jobshop); produto personalizado, roteiros um pouco diferentes
Variedade (no. SKUs)		média - alta
Atividades do PCP		receber os pedidos de vendas e estipular/confirmar datas de entrega; fazer a programação no nível de programa mestre, MRP e Scheduling (por máquina-gargalo); fazer o planejamento de longo prazo (agregado e estratégico) - atualmente é incipiente.
Estrutura organizacional		funcional
Problemas ou questões críticas		<ul style="list-style-type: none"> - ter um sistema robusto para controlar as múltiplas variáveis envolvidas no planejamento: processo de produção com muitas etapas e muitas máquinas diferentes; alta personalização dos produtos, o que implica variações no roteiro de produção. Tais fatores tornam o seqüenciamento complexo. Quando há ocorrências não previstas no sistema, tem-se que reprogramar muitos parâmetros e operações. - ter um sistema que integre todos os níveis hierárquicos de planejamento, incluindo o nível estratégico
S&OP		não se questionou especificamente sobre o S&OP, mas há sistemas de integração com a área de vendas
Mecanismos de integração		<ul style="list-style-type: none"> - sistema de reserva de capacidade compartilhado com os vendedores, para definição de datas de entrega considerando carga atual (incorpora a probabilidade de sucesso dos pedidos e período de congelamento) - reuniões com a área de Produção para acompanhamento de desvios na programação - reuniões com vendas para priorização de pedidos/ clientes - estruturação/ melhoria do sistema de planejamento, com definição das regras de seqüenciamento e atribuição de responsabilidades - porte pequeno e pouca idade da unidade de negócios favorecem a proximidade
Integração organizacional	comunicações e reuniões	<i>sem contato vs. existência de grupos de trabalho:</i> nível médio - alguns grupos de trabalho
		<i>reuniões com rotina/procedimentos estabelecidos:</i> nível médio não há procedimento formal estabelecido, mas isso não atrapalha na integração
	decisões compartilhadas	<i>planos elaborados conjuntamente:</i> nível alto - os planos são desenvolvidos em comum acordo e são resultado da combinação da capacidade com a previsão de vendas.
		<i>procedimento formal de S&OP - existente e com que frequência:</i> Não se questionou especificamente sobre o S&OP
	troca de idéias	nível alto - troca aberta. A equipe é bem integrada até porque a estrutura é pequena (toda a equipe administrativa estava contida em uma única sala, na sala em que ocorreu a entrevista)
	entendimento comum dos objetivos	<ul style="list-style-type: none"> <i>objetivos funcionais alinhados, integrados:</i> nível alto, pelos mesmos motivos acima <i>entendimento dos demais processos e objetivos:</i> nível alto pelos mesmos motivos acima

Quadro 5.3 – Resumo das observações relativas à empresa 1 (continuação).

Integração técnica	interface	nível médio
	compatibilidade	nível médio
	comentários	planejamento micro (curto prazo) não integrado tecnicamente com o planejamento de médio prazo e o estratégico - ver item "Questões críticas relacionadas ao PCP" para mais detalhes
Incerteza	variações na demanda	os clientes praticamente não mudam a ordem; ocorrência quase zero
	comportam/o do fornecedor	nível baixo - os fornecedores praticamente não atrasam; para aqueles com os quais se tem problemas, trabalha-se com estoques
	ação dos competidores	a ação dos competidores é previsível e não afeta a ação e planejamento da unidade de negócios.
	mudanças das tecnologias de produção	nível baixo mudanças anuais ou com frequência ainda menor
Frequência das reprogramações	formais	nenhum dos planos é alterado formalmente (no nível macro); no nível micro, o respondente não acompanha
	informais	o respondente não acompanha esse aspecto
Causas das reprogramações		<p>- Anteriormente: inexistência de um sistema robusto para controlar as múltiplas variáveis de planejamento (produtos personalizados); depois: problema de aderência à situação real e acurácia dos parâmetros usados na programação (dificuldades mitigadas com muitas reuniões).</p> <p>- Atualmente: problemas de qualidade (refugo e retrabalho): ou seja, problemas de suprimento interno (demais causas não muito relevantes: pouca incerteza na demanda e no fornecimento externo)</p>
Objetivos de desempenho	gerais da empresa ou un. de negócios	1 - custo: mais difícil de se atingir; 2 - datas de entrega: mais cobrada e está sendo atingido; 3 - flexibilidade: muito cobrada pelo mercado, já há um sistema consolidado para obtê-la. Há uma meta para cada um dos objetivos de desempenho.
	do PCP	não foram especificados
Outras observações		<p>A unidade de negócios experimentou um crescimento na demanda de 3 vezes o volume inicial. Durante o período de instabilidade, intensificou-se a frequência de reuniões e desenvolveu-se um sistema de planejamento. Após a etapa de ajuste desse sistema, conseguiu-se obter um nível de serviço de 95%.</p> <p>Principal necessidade de melhoria citada: desenvolvimento de um sistema que integre os níveis hierárquicos de planejamento, incluindo o nível estratégico.</p>
Conclusões parciais		A integração foi obtida a partir do desenvolvimento de um sistema (fator também mencionado pela empresa 3), da atribuição de responsabilidades e da intensa comunicação. Os mecanismos implantados foram bem-sucedidos, pois diminuiu-se a frequência de reprogramações críticas e, sobretudo, melhorou-se o nível de serviço em uma situação de crescimento acentuado de demanda.

5.3 Análise da empresa 2

5.3.1 Fluxo de atividades do PCP

Na empresa 2, a função de PCP é responsável por elaborar um planejamento macro, no nível agregado, com base nas previsões de demanda do mercado interno e do mercado externo realizadas pela equipe de vendas. Nesse plano determinam-se turnos, número de dias, produção diária e produção mensal, no nível macro, considerando-se todos os tipos de produtos realizados nessa divisão de negócio. A partir desse plano tem-se uma ideia da capacidade total requerida. Em seguida, começa-se a desagregar o plano, fazendo subdivisões por tipo de produto. As etapas iniciais do processo, as quais são comuns a todos os produtos, limitam a capacidade. A função de PCP determina as políticas de estoque no nível agregado e desagregado. Com base nessas políticas, continua-se o processo de desagregação até se obter planos detalhados de produção para cada produto individual (nível de Programa Mestre). Esse planejamento macro e desdobramento são feitos em Excel, fora do software de ERP (*Enterprise Resource Planning*) utilizado na empresa.

Na sequência, lança-se no software de ERP/MRP (*Material Requirements Planning*) o volume de produção mensal para cada produto, e realiza-se uma verificação da viabilidade dos planos com base nos níveis de estoque de cada produto final. Às vezes é necessário voltar a um nível mais agregado na hierarquia de planejamento para ajustar algum aspecto dos planos. Uma vez que o programa mestre foi definido, são calculadas as necessidades de material utilizando-se o MRP. Com base nesse cálculo, a função de PCP libera os pedidos de compra de todas as matérias-primas. As responsabilidades do PCP terminam nesse ponto. A Programação de Operações (*Scheduling*) é feita pela função de Produção, buscando-se atender as datas de entrega estipuladas pelo PCP. A função de PCP e de Produção estão sob a mesma gerência geral, mas são dois departamentos distintos. O PCP é o ponto de contato com o departamento Comercial (incluindo Vendas e *Marketing*). Nas operações do dia-a-dia, o planejador é o ponto de contato do PCP com a Manufatura.

As últimas máquinas do processo, que finalizam o produto, são geridas pelo departamento de Produção, sendo que cada uma tem restrições específicas. A Produção

recebe o programa mestre final, que contém a especificação de volume de produção por produto final e reorganiza (reagrupa) esse plano com base em outros critérios de agregação, diferentes daqueles utilizados pelo PCP na desagregação do plano macro. Caso este plano gerado pela Produção, no novo formato, não atender às restrições de capacidade, o PCP revisa todos os planos elaborados, em vários níveis de agregação. Essa verificação é feita com base nas restrições dos recursos.

Como se pode observar, na empresa 3, a função de PCP desempenha as atividades tradicionais relacionadas à estrutura do planejamento hierárquico, ou seja, o planejamento agregado, o programa mestre e o planejamento de necessidades de materiais, além do controle de estoques e análise de capacidade. Nota-se que as ferramentas computacionais utilizadas nas várias etapas de planejamento não são totalmente integradas entre si, em um único sistema de informações. Esse aspecto está associado à dimensão técnica do constructo integração.

5.3.2 *Questões críticas relacionadas ao PCP*

Segundo o gerente de PCP da empresa 2, um primeiro ponto a ser atacado é o processo de previsão de vendas, no sentido de se melhorar a acurácia das previsões. A produção, em geral, consegue atender os planos estabelecidos. Entretanto, a dificuldade de se obter previsões com alta acurácia desestabilizava as operações de planejamento e produção, tornando-se difícil atingir altos níveis de serviço. Conforme informado por um planejador de PCP, por meio de entrevista informal, a empresa não possuía um processo de Planejamento de Vendas e Operações (S&OP, *Sales & Operations Planning*) bem consolidado. No momento em que as entrevistas foram feitas, a empresa estava investindo especificamente na melhoria desse processo, apoiada por uma equipe de consultoria. Um funcionário da média gerência havia sido designado como responsável especificamente por alavancar o Planejamento de Vendas e Operações.

O aspecto apontado no parágrafo anterior ilustra a questão da integração organizacional na interface entre a função de Planejamento e Controle da Produção e a função de Vendas/*Marketing*. O S&OP é destacado na literatura como um importante mecanismo de integração nesse contexto, conforme apresentado no capítulo 2. Esta melhoria depende de um esforço conjunto de ambas as funções.

Como um segundo aspecto a ser melhorado, relativo mais especificamente às funções de PCP e Produção, apontou-se a velocidade de resposta entre a data de chegada do pedido e a data efetiva de entrega. Em outras palavras, havia uma oportunidade de redução do *lead time* de manufatura especialmente no mercado externo, em que o *lead time* era de aproximadamente 30 dias, mas o cliente gostaria que a entrega acontecesse no mesmo do mês, em cerca de 20 dias, aproximadamente.

Outro ponto de melhoria refere-se à integração da atividade de Programação de Operações no sistema ERP. Esta é uma questão de integração técnica, uma vez que esta atividade é feita atualmente em planilhas, conforme mencionado anteriormente. Segundo o respondente, a função de PCP tinha bastante domínio na realização do planejamento macro, mas apresentava certa dificuldade em definir assertivamente as quantidades disponíveis para promessa de cada produto específico (*Available To Promise*, ATP), no nível de programa mestre. Assim, era difícil determinar com acurácia as datas de entrega de um produto específico que faltou em um pedido de um cliente, por exemplo. Na percepção do entrevistado, essa integração entre as ferramentas utilizadas nos diferentes níveis do planejamento hierárquico não é trivial, pois há muita variabilidade na demanda de curto prazo e as mudanças são muito rápidas. Por outro lado, a integração organizacional entre a função de PCP e a função de Produção, responsáveis por esses planos, ocorria sem problemas, sendo classificada como alta.

5.3.3 Estrutura organizacional

A estrutura organizacional da empresa 2 inclui um gerente geral, ao qual estão subordinados o gerente de PCP e dois gerentes de produção, sendo um do turno diurno e outro do turno noturno. Abaixo do gerente de PCP, há planejadores de PCP e um funcionário responsável pelo monitoramento da carteira de pedidos. Os supervisores de produção de cada turno respondem aos respectivos gerentes de produção. Tal estrutura é mostrada na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Estrutura organizacional da área de PCP na empresa 1.

5.3.4 Mecanismos de integração

Com base nos relatos coletados, foi possível identificar a presença, na empresa 2, dos seguintes mecanismos de integração apresentados a seguir.

- Comunicações e reunião: o plano de produção mensal elaborado pelos planejadores de PCP é acordado com todos os supervisores de produção e com o gerente de produção, por meio de uma reunião de discussão que acontece mensalmente. Segundo o entrevistado, os planos elaborados pelo PCP não são informados à Produção, mas sim discutidos, e só se tornam válidos quando o gerente de Produção aprovar. O gerente de planejamento aprova o plano elaborado pelo planejador, o qual é levado para o gerente de Produção, que também faz considerações. Eventualmente precisa-se de alguém para decidir, e a questão é então levada ao nível superior na hierarquia. Não há um documento formal de aprovação, mas não há problema em não haver essa formalidade, pois o relacionamento entre o PCP e a Produção é bastante positivo, segundo o relato do gerente de Planejamento.
- Pessoas com função integradora: uma vez que o plano mensal foi elaborado e validado, há uma fase de acompanhamento dos pedidos que entram em carteira ao longo do mês. Há uma pessoa designada para monitorar o “atendimento” desses pedidos. Esse responsável faz uma reunião quinzenal ou semanal com o time de supervisores da produção para avaliar problemas e possíveis soluções. Às vezes a solução não é possível, ou seja, não é possível atender uma dada demanda. Nesse caso,

ou alteram-se as negociações de venda realizadas ou há faltas. Essa decisão é encaminhada a outras instâncias, primeiramente da área de Vendas, depois da área de *Marketing* e, caso necessário, a outras diretorias. A presença do “integrador” pode ser entendida como um mecanismo relevante de integração inter-funcional.

- Cultura organizacional: na empresa 2, há uma questão cultural que colabora para a ocorrência da integração organizacional, há uma relação de confiança entre o departamento de Produção e o departamento de PCP. A Produção discute os planos, mas se empenha em cumpri-los. O entrevistado apresentou o seguinte exemplo: uma dada máquina está trabalhando com 85% de eficiência, mas é preciso que opere com 90% para que se cumpra o plano de produção. Nessa situação, o próprio gerente da produção busca traçar um plano para aumentar a eficiência. Isso só não é possível quando a eficiência necessária está acima dos 90 ou 95%. O gerente de Planejamento também representa a Produção nas reuniões de demanda e de S&OP, nas discussões de vendas, entre outras, e existe uma empatia entre essas duas áreas.

É interessante destacar que a descoberta desses mecanismos de integração na empresa 2 está diretamente alinhada às descobertas feitas por Pagel (2004), discutidas no capítulo 2. Fatores como a comunicação e a cultura organizacional são apontados pelo autor citado como relevantes antecedentes da integração, ou seja, como fatores que a fomentam.

5.3.5 Reprogramações: frequência e causas

Conforme apresentado no Quadro 5.1, a empresa 2 trabalha com regime de produção tanto para estoques (MTS) quanto contra-pedido (MTO). Para os itens feitos para estoque, trabalha-se com uma previsão de vendas, e os erros de previsão são significativos, de acordo com o respondente. Em geral, as diferenças se acentuam no final do mês, num momento em que não há muito tempo para reagir. O PCP é responsável por esse acompanhamento das carteiras de pedido durante o mês, comparando a demanda que está ocorrendo com a produção que está prevista. Se for possível identificar as divergências antes, já são tomadas medidas corretivas antecipadamente. Caso contrário, intensifica-se o ritmo no final do mês para buscar corrigir os desvios. Segundo o gerente, o PCP busca sempre alterar os planos, radicalmente, se necessário, para atender aos pedidos que chegam em carteira.

Nesse caso estudado, a frequência das reprogramações também está diretamente ligada à sazonalidade da demanda. Quando se produz para atender à carteira de exportação, operando no sistema MTO, aproximadamente 70% do volume acordado é o que de fato vai ser produzido no próximo mês. As reprogramações, nesse caso, ocorrem a cada 15 dias, no máximo. Em outros meses, a produção é muito mais voltada para estoques. Nessa situação, quando a taxa de mudança da demanda externa é muito alta e o volume demandado também é alto, ocorrem mais rupturas no estoque e é necessário fazer muito mais reprogramações. Nem sempre essa frequência é diária, mas pelo menos duas vezes por semana. Essas mudanças são formais e começou-se a registrá-las no sistema, o plano inicial e as mudanças, o previsto e o real. No momento da entrevista não foi possível coletar dados sobre essa aderência da produção aos planos, pois o sistema ainda estava em fase de implantação.

Um comentário interessante feito pelo respondente refere-se a como ele vê a percepção dos funcionários da Produção em relação às reprogramações. Segundo ele, a equipe da Produção tem a impressão de que as reprogramações são constantes, de que elas ocorrem com uma frequência mais alta do que a real, mesmo em períodos de baixa demanda dentro do ciclo de sazonalidade.

A variação na demanda foi considerada a causa principal das reprogramações. Problemas de suprimento que requerem reprogramações também ocorrem, como por exemplo, a falta de uma matéria-prima para a fabricação de uma embalagem específica. Entretanto, segundo o entrevistado, é mais comum ocorrerem reprogramações para se atender à carteira de pedidos. Às vezes é uma questão de suprimento interno, mas geralmente essa questão é desencadeada por um problema de suprimento externo. Um fornecedor não entrega determinado insumo, por exemplo, obrigando que se altere a programação de fabricação de um componente intermediário, que por sua vez altera a programação de montagem dos produtos finais. O PCP é responsável pela liberação dos pedidos de compras e há algumas causas possíveis para essa interrupção no suprimento. De acordo com o entrevistado, os maiores problemas estão, em primeiro lugar, no atraso de fornecedores; em segundo, no atraso do PCP na liberação das ordens; e, em terceiro, na ocorrência de um consumo inesperado. Na classificação geral, é a demanda a causa primária das reprogramações, seguida das questões de suprimento. Alguma pequena parcela se deve a questões organizacionais. As questões de comunicação e integração entre as áreas de PCP e Produção não são vistas pelo respondente como causas relevantes de reprogramações.

Existem algumas mudanças informais de planos por parte dos próprios usuários desses planos, mas isso não é muito frequente; estima-se que represente no máximo 10% do volume

total. Às vezes a Produção antecipa a fabricação de alguns produtos que estão mais adiante nos planos, pois vê que isso acarretará uma melhora nos indicadores, na produtividade e no custo, sem comunicar o PCP. Entretanto, como foi dito, a frequência desse fenômeno não é muito significativa, e isso é feito com base em alguma pesquisa, procurando-se ver o impacto daquela decisão, pois o PCP está cobrando muito a questão do nível de estoque e estoque sobressalente.

5.3.6 *Objetivos de desempenho e indicadores*

O gerente de PCP da empresa relatou que cerca de dois anos antes do momento da realização da entrevista, o custo era o objetivo de desempenho priorizado. Num momento posterior, na época da entrevista, a ordem de prioridade era a seguinte: 1 – qualidade de processo (em termos de refugo e retrabalho); 2 – cumprimento das datas de entrega (designado neste trabalho por confiabilidade); 3 – custo; 4 – velocidade; 5 – flexibilidade (a qual não era medida formalmente mas era considerada adequada).

5.3.7 *Quadro resumo e avaliação da relação entre os constructos*

Um resumo dos aspectos observados na empresa 2 é apresentado no Quadro 5.4. A integração organizacional, no âmbito da função de PCP, é percebida como alta. Aqui cabe uma ressalva: pelos relatos do respondente, essa avaliação considera mais fortemente a relação do PCP com a Produção. Esta última é a área com a qual a equipe de PCP convive mais diretamente: existe uma proximidade e uma empatia entre ambas as funções. Por outro lado, quando se considera a interface entre a área de PCP e a área de Vendas/*Marketing*, entende-se que essa integração organizacional seja mais baixa. As áreas são mais separadas, inclusive em termos de distância física. Para corroborar esta avaliação, observa-se também que a empresa ainda não possui um processo maduro de Planejamento de Vendas e Operações (S&OP). A existência desse processo auxiliaria a elevar consideravelmente a integração entre as funções de PCP e Vendas, conforme destacado na literatura.

Nesse segundo caso estudado, a qualidade da informação ligada às previsões de demanda é um fator bastante relevante, uma vez que 60% da produção é para estoque (MTS). A acurácia das previsões de demanda foi classificada como baixa pelo respondente. Assim, uma melhoria na qualidade dessa informação muito provavelmente acarretaria uma diminuição significativa na frequência de reprogramações. Em outras palavras, isso conferiria maior estabilidade ao planejamento detalhado. O respondente claramente possui essa percepção. A qualidade da informação relativa às previsões, por sua vez, seria positivamente afetada pela integração organizacional entre as áreas de PCP e Vendas. O caso analisado apresenta uma evidência da situação inversa, em que um nível relativamente baixo de integração organizacional entre as funções de PCP e Vendas gera deficiências na qualidade da informação, causando um aumento na frequência de reprogramações.

Em termos de incertezas ambientais, a dimensão mais relevante se refere às variações na demanda, que ocorrem com uma frequência quinzenal, aproximadamente, segundo o gerente de Planejamento. As demais dimensões, ou seja, fornecedores, concorrentes e tecnologia de processo são características de um ambiente com incerteza baixa ou moderada. A empresa é bastante verticalizada e os fornecedores não possuem um índice elevado de atrasos; a ação dos concorrentes não afeta significativamente a empresa, que é líder de mercado; e as tecnologias de processo não mudam com alta frequência.

Como causas principais das reprogramações, colocaram-se, em primeiro lugar, as variações na demanda e, em segundo, as falhas de fornecedores externos. Isso é esperado, uma vez que as variações na demanda são a fonte de incerteza mais relevante, no caso da empresa 2. Assim, observa-se que há uma relação direta entre incerteza e nível de reprogramações, conforme o esperado. Por outro lado, essa relação pode ser amenizada quando se melhora a acurácia das previsões de demanda, ou seja, quando se melhora a qualidade de informação, conforme já discutido.

O caso também expõe um mecanismo de integração que não foi mencionado diretamente nos demais casos, a questão da cultura e valores da empresa. A integração entre as funções de Planejamento e Produção, no caso analisado, advém de uma relação tradicional de confiança entre ambas, a qual já está incorporada na cultura da empresa.

Quadro 5.4 – Resumo das observações relativas à empresa 2.

Empresa 2		
Porte / volume		grande
Tipo de sistema de produção	em relação à demanda	MTS (mercado int. - 40%) e MTO (merc. ext. - 60%) produto com sazonalidade; linearização da produção usando o MTO
	em relação ao processo de produção	montagem: batchshop pelas características intrínsecas do produto
Variedade (no. SKUs)		média
Atividades do PCP		receber as demandas do mercado ext. e int. e realizar o planejamento macro; desagregar e fazer planos intermediários, até obter planos detalhados por produto; determinar níveis de estoque; Scheduling é responsabilidade da Produção
Estrutura organizacional		funcional
Problemas ou questões críticas		<ul style="list-style-type: none"> - o processo de previsão de vendas poderia ser melhorado para se obter maior acurácia (Há processo formal de S&OP? Os vendedores são medidos por acurácia de previsão?) - melhoria na velocidade de resposta do PCP/Produção desde a chegada do pedido até sua entrega efetiva (encurtamento do lead time) - incorporação do Scheduling, feito juntamente com a produção, no sistema ERP e definição mais assertiva do ATP (focar no planejamento de mais curto prazo, melhorar a promessa de datas de entrega)
S&OP		- não há um procedimento bem consolidado dentro da empresa
Mecanismos de integração		<ul style="list-style-type: none"> - reuniões mensais de aprovação do plano mensal de produção, feitas com o PCP (incluindo o gerente), os supervisores e gerente de produção - a aprovação dos planos não é formalizada, mas estes são discutidos e fixados somente quando há aprovação da produção - o funcionario do PCP responsável pelo acompanhamento da carteira de pedidos (variações na demanda) faz reuniões quinzenais ou semanais com os supervisores de produção - a questão cultural é forte e contribui para a integração: a Produção tem uma relação histórica de confiança com o PCP
Integração organizacional	comunicações e reuniões	<i>sem contato vs. existência de grupos de trabalho:</i> nível alto - grupos de trabalho
		<i>reuniões com rotina/procedimentos estabelecidos:</i> nível alto
	decisões compartilhadas	<i>planos elaborados conjuntamente:</i> nível alto com o departamento de Produção, nível baixo com o departamento de marketing
		<i>procedimento formal de S&OP - existente e com que frequência</i> nível baixo: em fase de implementação/melhoria
	troca de idéias	nível alto
	entendimento comum dos objetivos	<i>objetivos funcionais alinhados, integrados:</i> 2 (máximo)*
		<i>entendimento dos demais processos e objetivos:</i> 2 (máximo)*
Integração técnica	interface	nível baixo
	compatibilidade	nível baixo

Quadro 5.4 – Resumo das observações relativas à empresa 2 (continuação.)

Integração técnica	comentários	O planejamento macro e o Scheduling detalhado são realizados em planilhas eletrônicas. O MPS e o MRP são feitos no ERP da empresa. As planilhas são compatíveis com esse sistema, mas essa integração não é automática.
Incerteza	variações na demanda	quinzenalmente
	comportam/o do fornecedor	nível baixo - atrasa 10% das vezes A empresa é bastante verticalizada. A integração com fornecedores é pequena, pois as compras não representam muito em volume para os fornecedores, que são grandes também (pouco poder de barganha). A maioria das compras é feita com base na relação de suprimento tradicional de mercado.
	ação dos competidores	Não afeta ou quase não afeta. A empresa é líder de mercado (detém 80%), por isso, são suas decisões que afetam o mercado, e não o oposto. A empresa deixou de concorrer no segmento de produtos de baixo custo. Trabalhar com margens mais altas teve um impacto positivo.
	mudanças das tecnologias de produção	nível baixo - anual ou mais As máquinas são antigas e se iniciou um plano de reposição. A qualidade do produto e do processo é o direcionador da mudança, e não a capacidade ou produtividade. A mudança trará maior diferenciação no acabamento do produto. A base do processo também está sendo automatizada, o que deve garantir uma matéria-prima de melhor qualidade.
Frequência das reprogramações	formais	mais de uma vez por semana; o respondente não soube informar a porcentagem dos planos que sofrem alterações
	informais	os usuários praticamente não alteram (10%)
Causas das reprogramações		1 - mudanças na demanda (causa principal); 2 - questões de suprimento externo (fornecedores que não entregam no prazo); 3 - questões de suprimento interno, em geral acarretadas por problemas de suprimento externo; questões organizacionais, como dificuldades de comunicação entre as áreas (PCP e Produção) não são relevantes; reprogramações informais dos próprios usuários representam cerca de 10% do total
Objetivos de desempenho	gerais da empresa ou unidade de negócios	- há 2 anos atrás a prioridade foi custo; atualmente tem-se: 1 - qualidade de processo; 2 - datas de entrega; 3 - custo; 4 - velocidade; 5 - flexibilidade (não medida formalmente, mas está adequada) - qualidade de produto é ponto de partida, não se discute;
	do PCP	nível de serviço, nível de inventário (nível de estoques)
Outras observações		Para itens MTS, trabalha-se com previsão de vendas, e há diferenças acentuadas entre previsão e vendas reais no final do mês, quando não há muito tempo para reagir. O PCP é responsável por esse acompanhamento das carteiras de pedido durante o mês. Se for possível identificar as divergências antes, antecipam-se as medidas corretivas. Caso contrário, intensifica-se o ritmo no final do mês para atender a carteira de pedidos que chega.
Conclusões parciais		Nesta empresa observou-se um tipo de integração entre PCP e Produção com base na cultura organizacional. A área de Produção e PCP desenvolveram historicamente uma relação de respeito mútuo em relação às ações e decisões de cada uma das partes.

5.4 Análise da empresa 3

5.4.1 Fluxo de atividades do PCP

Na empresa 3, o estudo da demanda, a programação da produção e as compras ficam sob a responsabilidade de planejadores. Há um processo de Planejamento de Vendas e Operações (S&OP) consolidado, com 15 anos de existência, o qual é liderado pelo departamento de PCP e não pelo departamento de *Marketing*, como ocorre em algumas empresas. Desse planejamento, obtém-se o programa mestre de produção, que é inserido no sistema uma vez por mês. A partir desse programa mestre, executa-se o Planejamento de Necessidades de Materiais (MRP) diariamente. Algumas plantas da empresa e centros de trabalho utilizam diretamente o MRP para liberar ordens de compra e produção. Nas unidades de negócio estudadas, emprega-se um sistema híbrido de MRP e *kanban* (sistema puxado). Utilizam-se os dados do programa mestre e as necessidades líquidas do MRP para determinar os níveis mínimos e máximos de estoque de produtos acabados, de itens e matérias-primas, para então aplicar-se o *kanban*. O software utilizado para esse dimensionamento desses níveis de estoque é baseado na Teoria das Restrições. As atividades de análise de capacidade e *Scheduling*, em geral, são compartilhadas com a Manufatura. Em algumas plantas, o *Scheduling* é responsabilidade total da Manufatura, ou seja, o planejador não precisa liberar ordens. Sua responsabilidade é comunicar um pedido urgente, pois ele tem contato com a área de *Marketing*, e atualizar os parâmetros de mínimo e máximo estoque, interferindo caso necessário. Em outras fábricas, é o planejador quem libera as ordens de produção. Assim, há diferentes graus de interação entre a área de Manufatura e a área de Planejamento.

5.4.2 Questões críticas relacionadas ao PCP

Os entrevistados relataram quatro pontos críticos que afetam diretamente a atuação da área de PCP e sua relação com outras funções da empresa. Tais pontos foram os seguintes:

- mobilizar a área de *Marketing* a participar ativamente das reuniões de S&OP e a reconhecer a importância disso. Segundo os relatos, os vendedores não eram cobrados

pela acurácia das previsões e não existia um alinhamento direto entre as principais métricas de desempenho da área de *Marketing* e da área de PCP. Assim, um dos desafios constituía-se em levar a área de *Marketing* a perceber a importância das previsões e se engajar na melhoria do processo. Segundo a visão dos entrevistados, supervisores de PCP, a liderança do processo de S&OP deveria ser compartilhada entre *Marketing* e PCP, mas na situação corrente, ficava sob responsabilidade apenas do PCP;

- convencer as outras funções da empresa sobre a importância do PCP, uma vez que as métricas dessa função não estavam diretamente relacionadas a lucro e vendas. Essa valorização, segundo os entrevistados, dependia muito da liderança, ou seja, do apoio da alta administração. O atual presidente da empresa na época da entrevista reconhecia esta importância, estimulando essa postura em seus subordinados. Isso não aconteceu em um período anterior, quando se tinha outra liderança. Estava bastante claro que a ruptura dos estoques prejudicava diretamente as vendas, mas era difícil mostrar essa relação dos níveis de estoque com os principais objetivos da companhia, especialmente quando se tinha a situação oposta, ou seja, estoques inflados.
- manter a motivação do time de PCP, que tinha de atuar em um ambiente com alta pressão e pouco reconhecimento. Segundo a avaliação dos supervisores, o profissional precisa ser auto-motivado, ter liderança e saber lidar com pressão, pois é cobrado quando há falta de estoque, parada de máquina, falta de matéria-prima e nível de serviço ruim. Como o departamento de PCP trabalha nas interfaces, ele era cobrado pelos problemas que aconteciam nas outras áreas com os quais se relacionava.
- lidar com métricas funcionais conflitantes. Algumas métricas da função de Planejamento e Controle da Produção são intrinsecamente conflitantes em relação às métricas da manufatura (da produção). Para o PCP, quanto mais setups for possível fazer, mais se tem flexibilidade para atender à demanda e se pode trabalhar com estoques menores. Entretanto, isso prejudica diretamente a eficiência. Este é um conflito tradicional de objetivos na interface entre planejamento e produção.

Nesse momento da entrevista, em todas as empresas, os entrevistados foram deixados à vontade para relatar quaisquer pontos críticos que influenciavam na atuação da área de Planejamento e Controle da Produção. É interessante observar que a maioria dos pontos mencionados pelos respondentes da empresa 3 estão diretamente relacionados à questão da integração interfuncional, demonstrando a relevância desse tópico para a atuação do PCP.

5.4.3 Estrutura organizacional

Os entrevistados apresentaram o desenho de parte da estrutura organizacional da empresa 3, porém, solicitaram que esse material não fosse divulgado na pesquisa. Alguns comentários sobre essa estrutura serão feitos no subitem seguinte, já que ela foi apontada pelos respondentes como um relevante mecanismo de integração interfuncional.

5.4.4 Mecanismos de integração

Na empresa 3, identificou-se a presença dos seguintes fatores promotores da integração:

- estrutura organizacional diferenciada. A empresa 3 possui várias unidades de negócio, distribuídas em plantas com diferentes localizações geográficas. Numa situação anterior, a estrutura de Planejamento e Controle da Produção era descentralizada, vinculada à diretoria de manufatura de cada unidade de negócio. Depois, criou-se uma nova diretoria, à qual foi vinculada a função responsável pelo Planejamento e Controle da Produção de todas as unidades de negócio. Assim, o time de PCP tornou-se centralizado. A principal vantagem observada nessa estrutura, segundo a percepção dos supervisores de PCP, é a agilidade e a unidade de comando. O planejador faz a previsão de demanda juntamente com o representante do departamento de *Marketing* de cada unidade de negócio, tendo a co-responsabilidade pela previsão, mas também tem contato direto com os fornecedores internos e externos. Ele exerce um papel integrador e tem a visão de toda a cadeia, pois as informações estão centralizadas. Por exemplo, se o *Marketing* está planejando uma campanha promocional, o planejador verifica diretamente com os fornecedores se estes serão capazes de suprir esta campanha. Além disso, o fato de os planejadores de diferentes unidades estarem reunidos em um só departamento faz com que eles se conheçam e se comuniquem, mesmo estando separados geograficamente. Há reuniões com toda a equipe para discussão de questões comuns. Caso haja alguma questão a ser resolvida envolvendo duas unidades de negócio distintas, essa decisão é tomada pelo gerente de planejamento. O gerente toma, por exemplo, uma decisão de alocação de recursos e

matérias-primas quando duas linhas de produtos competem por esses mesmos recursos e há certa escassez. A decisão é centralizada, há unidade de comando. Os entrevistados relatam ainda que esta estrutura organizacional, por outro lado, implica o aumento da responsabilidade do departamento de PCP e da responsabilidade individual de cada planejador. Assim, torna-se necessário ter pessoas com uma visão holística de todas as atividades de planejamento para suas respectivas linhas de produtos, incluindo a previsão de demanda, o programa mestre, o planejamento dos níveis de estoque, a liberação de ordens de compra e fabricação, etc. Na estrutura anterior, cada funcionário tinha um escopo mais limitado e determinado dentro do processo de planejamento. Nesta nova estrutura, os planejadores têm que ser qualificados, pois tem que ter autonomia para tomar decisões e fazer análises. Na empresa 3, esse cargo de planejador corresponde geralmente a um nível acima em relação ao nível de supervisor em outras empresas. A maioria dos planejadores tem nível superior e pós-graduação, e são relativamente bem remunerados.

- melhoria da ferramenta computacional de previsão de demanda. Na época da entrevista, o PCP estava implantando um novo software de previsão de demanda e estimulando a revisão do processo pelos envolvidos, os planejadores e funcionários da área de *Marketing*, mais especificamente. Houve um esforço para mobilizar os funcionários para esta mudança: confeccionou-se material de divulgação e programou-se a realização de treinamentos e palestras.
- processo de S&OP consolidado. Na empresa 3 há um processo de S&OP (Planejamento de Vendas e Operações) consolidado e com responsabilidades bem definidas. Os líderes de PCP coordenam e os planejadores são os executores do processo, sendo que cada um desses pares cuida de uma linha de produtos. Eles são responsáveis pela previsão daquela linha e por envolver a área de *Marketing* no processo. Dependendo da linha de produtos, todos os níveis de *Marketing* participam: os funcionários, o gerente da Unidade de Negócios (que é o gerente de *Marketing*) e até mesmo o diretor da Unidade de Negócios, mas isso não é regra geral. Em algumas linhas, o envolvimento da área de *Marketing* é menor. O gerente de Manufatura e alguns engenheiros de processo também participam, de acordo com a necessidade. Dependendo da linha, se está ocorrendo um lançamento de produto, há reuniões denominadas de pré-S&OP, que são reuniões de trabalho para montar a reunião executiva. A área de engenharia geralmente participa dessas reuniões, pois se verifica se há equipamentos, capacidade, gargalos, etc. A frequência das reuniões executivas

de S&OP é mensal e a agregação é feita por famílias. Tais reuniões são marcadas com antecedência, para o ano todo, geralmente na terceira semana do mês.

- apoio da alta direção e reuniões executivas regulares. Na empresa analisada, além das reuniões de pré-S&OP e S&OP executiva, realiza-se mensalmente uma reunião executiva na qual cada diretor de negócio apresenta para o presidente da empresa todas as métricas do seu grupo de negócio: métricas de serviço, de nível de estoque¹³, de inventário não-rotativo, número de SKUs etc., além de métricas financeiras, como vendas, lucros e fluxo de caixa. Os líderes de PCP montam a parte dessa apresentação relativa ao nível de serviço e nível de estoques. Depois de compilarem todos os dados, eles fazem uma reunião prévia com o diretor de negócio, informando a posição dos estoques, os desvios entre a situação real e as metas, etc. Assim, o diretor de negócio é compelido a se comunicar com os gerentes de *Marketing*, questionando-os por sobras de estoque, por exemplo. Na empresa 3, o desempenho da função de PCP é avaliado com base em métricas de nível de serviço e de estoque, nessa ordem de importância. As métricas da divisão responsável pelo *Marketing*, por outro lado, estão relacionadas a vendas e lucro. Portanto, observa-se a existência de objetivos funcionais intrinsecamente conflitantes. Como consequência, havia anteriormente uma tendência da área *Marketing* de inflar as previsões para garantir disponibilidade do produto e cumprir as metas de vendas. A área de PCP fazia ajustes nessa previsão por conta própria, assumindo os riscos, visando reduzir os níveis de estoque. Existiam duas previsões em paralelo. As reuniões executivas compelem as funções de PCP e *Marketing* a assumirem uma responsabilidade conjunta pelos níveis de estoque e serviço. Segundo os relatos dos entrevistados, esta mudança só foi alcançada devido à postura austera do presidente da empresa em relação às reuniões executivas. É ele quem patrocina tais reuniões, exigindo sua ocorrência nas datas planejadas e cobrando resultados positivos. Anteriormente, essa prestação de contas existia apenas de maneira informal e o presidente anterior cobrava diretamente o PCP pelos indicadores de operação. A posse do novo presidente e a mudança da estrutura organizacional relatada no outro tópico ocorreram de forma quase simultânea. Assim, ambos os fatores contribuíram, segundo os entrevistados, para a melhoria da acurácia das previsões e da comunicação entre as áreas de PCP e *Marketing*. Eles crêem fortemente

¹³ No meio empresarial, o termo "nível de inventário" é comumente empregado para significar "nível de estoques". Na literatura internacional da área, frequentemente utiliza-se o termo "*inventory*". Assim, alguns autores no Brasil também utilizam esse termo "inventário" em substituição ao termo "estoque".

que, se o próximo presidente não continuar patrocinando essas reuniões, essa cultura de prestação de contas e responsabilidade conjunta vá se dissolver.

5.4.5 Reprogramações: frequência e causas

Na empresa 3, os planos de vendas e operações (*Sales and Operations Planning*, S&OP) são feitos mensalmente e raramente são modificados. Eventualmente acontece alguma campanha promocional de última hora, para algum produto cujas vendas estão baixas. Nesse caso, a área de *Marketing* verifica com a área de Planejamento se o nível dos estoques é suficiente para suprir o período de vendas promocionais.

No nível de Programa Mestre, a frequência de reprogramações é um pouco maior, conforme esperado, e a maioria das mudanças é executada devido ao recebimento de pedidos urgentes de clientes que não podem esperar o *lead time* padrão de entrega. Em geral, tais mudanças são feitas informalmente, mediante conversas entre o Planejamento e a Manufatura. Se a mudança for muito grande, níveis superiores na hierarquia organizacional da empresa são consultados; caso se necessite de uma decisão formal, o processo torna-se mais demorado. As mudanças geralmente ocorrem para produtos feitos contra pedido, pois para produtos fabricados no sistema MTS, deve haver estoques para suportar as flutuações. A meta para a quantidade de pedidos atendidos a partir do estoque é de 95%. Caso algum estoque acabe, busca-se antecipar a ordem para reposição deste estoque.

No nível da programação do chão de fábrica, as mudanças tem uma frequência diária. Conforme relatam os supervisores de PCP, há diferentes demandas que concorrem pela utilização de um mesmo equipamento. Assim, um dado equipamento pode ter que fabricar produtos contra pedido, produtos para estoque, amostras para negociação de vendas, e ao mesmo tempo, estar sujeito à realização de manutenção. Nesse contexto, é comum ocorrerem reprogramações.

Algumas das causas citadas para estas reprogramações foram: atraso de fornecedor, falta de matéria-prima, atraso na importação e problemas de qualidade. Na área de negócio de um dos respondentes, há problemas relacionados à manutenção, pois os equipamentos são antigos. Na área de negócio de outro respondente, predomina o problema de vida útil dos produtos. Segundo a política da empresa, os produtos com prazo de validade menor do que 12 meses são retidos, não sendo enviados aos canais convencionais de distribuição. Em alguns

casos, os produtos já chegam com os prazos de validade apertados devido à morosidade nos trâmites de importação; em outras situações, ocorrem falhas no ciclo de distribuição e venda e os estoques não giram. Com relação às reprogramações informais feitas pelo próprio usuário dos planos no chão de fábrica, os respondentes supõem que elas devam acontecer, entretanto, eles não tem contato direto com essa situação para informar sua frequência de ocorrência.

5.4.6 *Objetivos de desempenho e indicadores*

No contexto da época em que a entrevista foi realizada, os principais indicadores de desempenho para a empresa 3 como um todo eram custo e nível de serviço, sendo este último relacionado às datas de entrega e à disponibilidade de produtos em estoque. Em momentos anteriores, segundo os respondentes, priorizou-se muito a flexibilidade em detrimento do custo, seguindo-se os princípios da Produção Enxuta. Assim, buscou-se utilizar lotes pequenos, o que acarretava alta quantidade de setups. Isso começou a afetar significativamente os custos. Por outro lado, observou-se que o ganho com o aumento da flexibilidade, a partir de certo ponto, não era relevante. Consequentemente, em muitas unidades produtivas, revisaram-se os tamanhos de lote, definindo-os em um nível intermediário, mais equilibrado. Na empresa estudada, foca-se também na qualidade do processo como um dos objetivos de desempenho devido ao seu impacto no custo.

As métricas de desempenho específicas do PCP são nível de serviço e nível de estoque, sendo este último denominado nível de inventário (ver nota de rodapé 13). As métricas da área de *Marketing* são relacionadas diretamente a vendas e lucro. O nível de estoque também está no conjunto de métricas do *Marketing*, mas é a quarta prioridade. A alta diversidade de produtos da empresa dificulta que a parcela variável da remuneração dos vendedores seja estabelecida em função da acurácia de previsão, como ocorre em outras empresas. Nesse caso estudado, um único vendedor é responsável por uma extensa gama de produtos, o que impossibilita a previsão com acurácia de cada produto individual, segundo a percepção dos supervisores de Planejamento.

5.4.7 *Quadro resumo e avaliação da relação entre os constructos*

Um resumo dos aspectos observados na empresa 3 são apresentados no Quadro 5.5. Com base nas notas dadas pelos respondentes, avalia-se a integração organizacional da empresa como sendo média-alta. Alguns fatos que sustentam tal avaliação são a existência de reuniões frequentes e com cronograma definido, a realização de planejamentos conjuntos e o entendimento comum dos objetivos de desempenho. Segundo os relatos, há uma compreensão dos *trade-offs* associados aos objetivos funcionais, ou seja, das compensações envolvidas no cumprimento de objetivos funcionais conflitantes.

A integração técnica na empresa 3 situa-se em um nível intermediário, uma vez que as diferentes atividades de planejamento da produção são realizadas por meio de diferentes ferramentas computacionais. Estas ferramentas, por outro lado, são relativamente compatíveis entre si. Além disso, parte dos processos anteriormente realizados com diferentes softwares já foi integrada ao sistema ERP utilizado na empresa.

Dentre as fontes de incerteza ambiental, a variação na demanda foi considerada a mais relevante, resultado semelhante ao observado para a empresa 2. No caso da empresa 3, entretanto, esse fator de incerteza associado à demanda é provavelmente amplificado devido à alta diversidade de produtos fabricados. Quanto maior o *mix* de produção, maior é a flexibilidade exigida para se atender às demandas de produtos e componentes individuais, e maior é a complexidade de gestão dos sistemas de manufatura. A complexidade é destacada na literatura como uma das dimensões da incerteza, conforme apresentado no capítulo 2.

De acordo com os relatos, ocorriam mudanças diárias nos planos, ou seja, havia uma alta frequência de reprogramações. Como consequência positiva disso, conseguia-se obter um alto nível de serviço. Um dos entrevistados declarou que o nível de serviço da unidade em que ele atuava estava em 98%. A variação nas demandas foi apontada como a causa principal de reprogramações. As questões de comunicação interna também se constituíam uma causa relevante, pois foram listadas em segundo lugar.

Como já mencionado anteriormente, os objetivos de desempenho da empresa como um todo eram o custo e o nível de serviço, ou seja, custo e confiabilidade, sendo esta última relacionada às datas de entrega e à disponibilidade de produtos. O desempenho da função de PCP, por sua vez, era avaliado por meio de métricas de nível serviço e nível de estoque (inventário).

Esse caso suscitou vários pontos interessantes. Um deles refere-se aos mecanismos de integração presentes na empresa, no âmbito do PCP e de suas inter-relações com outras funções. A maioria dos mecanismos observados é apontada na literatura como elementos promotores da integração. Além disso, os entrevistados relataram casos e situações práticas reais que ilustraram alguns das dimensões e constructos investigados. Entende-se que estas evidências tenham um peso maior do que respostas diretas, baseadas no julgamento individual do entrevistado.

Um segundo ponto a se destacar, e talvez o mais importante desse caso, é que a observação dos constructos em dois momentos distintos no tempo evidenciou as relações existentes entre eles. Os entrevistados perceberam que, após a troca da presidência e a mudança na estrutura organizacional, a quantidade de reprogramações causadas por erros de previsão diminuiu. Segundo eles, com um planejamento de vendas e operações (S&OP) mais realista, houve menos faltas de matérias-primas e menos problemas de suprimento interno. Assim, nota-se que uma melhoria na qualidade da informação das previsões de demanda gerou uma diminuição no nível de reprogramações. Tal melhoria na qualidade de informação, por sua vez, foi desencadeada por um fortalecimento da integração interna propiciado pela mudança da estrutura organizacional e pelo incentivo da alta direção.

Estas relações positivas entre os constructos de integração, qualidade da informação e desempenho ficaram evidentes a partir de dois relatos dos entrevistados. O primeiro refere-se a uma das fábricas de produto acabado, na qual o produto é finalizado contra-pedido, a partir de um estoque de produtos intermediários. Na situação anterior, o produto intermediário frequentemente não estava disponível para ser finalizado. Após as mudanças, esse problema de suprimento interno deixou de ser a principal causa das reprogramações, pois havia uma melhor informação de entrada para o planejamento, ou seja, uma melhor previsão. Na área de negócio do outro entrevistado, quatro anos antes do estudo, tinha-se um nível de serviço 10% mais baixo e uma grande quantidade de pedidos em atraso, totalizando 1,5 milhões de reais. Na época em que o estudo foi realizado, estava-se com um nível de serviço de 95%, com uma quantidade baixíssima de pedidos em atraso e com nível de estoque apenas um pouco maior. Em resumo, observou-se um aumento significativo do nível de serviço, com nível de estoque controlado, mesmo com as vendas crescendo no nível de 10 a 15% ao mês.

Este é outro fator de destaque nesse contexto: no mesmo período em que ocorreu o aumento da integração interna, as vendas estavam crescendo significativamente, pois havia uma pressão por tal crescimento, para se aproveitar as oportunidades de mercado. Com esse crescimento, a empresa fica sujeita a maiores níveis de incerteza; a necessidade de se

aumentar o volume de produção de uma extensa gama de produtos gera um aumento da complexidade de gestão e uma intensificação do uso dos recursos. Assim, observa-se que a relação entre integração e desempenho, nesse caso, é moderada pela incerteza. A empresa, estando sujeita a uma situação de alta incerteza, buscou a fortalecer seus mecanismos de integração interna para conseguir atingir altos níveis de desempenho. Esta é, de fato, uma hipótese formulada por alguns autores da área, conforme apresentado no capítulo 2.

Segundo os entrevistados, essa melhoria no planejamento e integração deve ser atribuída à mudança cultural promovida pelo presidente. Eles enxergam que uma ruptura nessa nova cultura estabelecida levaria a um retrocesso, causando quedas drásticas no desempenho. No entanto, ressaltou-se que esses resultados têm sido conseguidos com um alto nível de estresse. No novo contexto descrito, a principal causa de instabilidade é a questão da capacidade e escassez de recursos, especialmente humanos, para atender ao volume crescente demandado.

Quadro 5.5 – Resumo das observações relativas à empresa 3.

Empresa 3		
Porte / volume		grande
Tipo de sistema de produção	em relação à demanda	MTS e MTO, ATO e até ETO (muito variável, dependendo da linha de produtos) - para as linhas analisadas, predomina MTS e alguns produtos ATO
	em relação ao processo de produção	diferentes sistemas de produção, dependendo da unidade de negócio
Variedade (no. SKUs)		altíssima - muitos SKUs divididos em várias divisões de negócio
Atividades do PCP		S&OP, MPS, MRP, definição de limites máximos e mínimos de estoque para rodar kanban, compras (Scheduling é compartilhado com a função de Produção/Manufatura)
Estrutura organizacional		funcional, corporativa
Problemas ou questões críticas		<ul style="list-style-type: none"> - dificuldade em mobilizar a área de Marketing p/ participar ativamente das reuniões de S&OP (área de Marketing não é medida por acurácia de previsão) - dificuldade em convencer o restante da empresa da importância do PCP - métricas do PCP não diretamente relacionadas a vendas e lucro - os profissionais de PCP tem que ter auto-motivação para trabalhar em um ambiente de alta pressão e pouco reconhecimento - conflito das métricas do PCP com as métricas da manufatura (eficiência)
S&OP		- há um procedimento formalizado e bem consolidado dentro da empresa (15 anos)
Mecanismos de integração		<ul style="list-style-type: none"> - estrutura organizacional: criação de um departamento corporativo de PCP, que responde a um único diretor - unidade de comando - planejador responsável por liderar o S&OP e pelo desdobramento de todas as atividades do PCP - comunicação e reuniões com todos os planejadores - reuniões corporativas de S&OP e acompanhamento de indicadores patrocinadas/ lideradas pelo presidente - cobrança do presidente aos diretores de unidade (marketing) pelo nível dos estoques e, conseqüentemente, pela acurácia das previsões
Integração organizacional	comunicações e reuniões	<i>sem contato vs. existência de grupos de trabalho:</i> nível médio alto - em geral, grupos de trabalho
		<i>reuniões com rotina/procedimentos estabelecidos:</i> nível médio alto só falta uma situação mais formalizada, que não depende do planejador, i.e. incorporar totalmente à cultura
	decisões compartilhadas	<i>planos elaborados conjuntamente:</i> 3, planos feitos em conjunto, mas não 100% deles. Alguns planos são comunicados e ajustados.
		<i>procedimento formal de S&OP - existente e com que frequência:</i> nível alto - mas a questão da responsabilidade melhorar. O diretor patrocina, e exige que cada área de negócio participe, mas depende dele. As reuniões corporativas e a reunião local de S&OP de cada divisão de negócio são mensais.
	troca de idéias	nível médio - ainda se tem feudos, cada departamento ou grupo olhando para dentro – Manufatura, Marketing e PCP (este último tenta balancear, mas também acaba olhando para dentro)
	entendimento comum dos objetivos	<i>objetivos funcionais alinhados, integrados:</i> nível médio alto - os objetivos são bem entendidos e explicados. Com um objetivo forte de crescimento em vendas, o nível de inventário não é tão exigido. Isso foi negociado. Há um entendimento dos trade-offs. <i>entendimento dos demais processos e objetivos:</i> respondido no item acima.

Quadro 5.5 – Resumo das observações relativas à empresa 3 (continuação).

Integração técnica	interface	nível médio pois há muitos dados e planos ainda em planilhas.
	compatibilidade	nível médio alto
	comentários	A volta do Excel para o ERP não existe. O ERP é compatível com o software de TOC/ kanban e com o software de previsão (integra esses dois braços). A volta é manual mas com formato padronizado. O ERP é aberto, totalmente customizado. Muitas processos antes em planilhas foram incorporados.
Incerteza	variações na demanda	semanalmente ou mais de uma vez por semana (obs. altíssima diversidade)
	comportam/o do fornecedor	atrasa 25% das vezes (antes era 50% - problemas de cadastro de lead times)
	ação dos competidores	quase não afeta ou afeta razoavelmente - depende da divisão (as vezes há mudanças de preço no S&OP devido ao reposicionamento dos concorrentes; outras divisões são líderes absolutas); estratégia geral de diferenciação
	mudanças das tecnologias de produção	nível baixo - anual ou mais
Frequência das reprogramações	formais	alterações diárias; planos com horizonte de 2 ou 3 dias; entretanto, alto nível de serviço (98%)
	informais	não aplicável - não é área de domínio dos respondentes
Causas das reprogramações		Para a área 1: 1 - mudanças na demanda (absorvidas por estoques, mas se precisa repôr); 2 - dificuldades de comunicação entre as áreas (PCP e Marketing); 3 - problemas com fornecedores externos; 4 - problemas de suprimento interno; 5 - reprogramação informal Para a área 2: inverte-se o 2 e o 3 (a questão de suprimento externo é mais crítica)
Objetivos de desempenho	gerais da empresa ou un. de negócios	- custo e serviço, relacionado a datas de entrega, à promessa e à disponibilidade
	do PCP	- nível de serviço e inventário - a acurácia da previsão tem sido observada. A meta é de 80% para itens A e B e o real está em torno de 60 a 65%
Outras observações		Impacto dos mecanismos de integração nas reprogramações: - ao mesmo tempo em que foram implantados os mecanismos de integração, definiu-se um plano de crescimento muito acelerado - ainda assim, conseguiu-se aumentar significativamente o nível de serviço (10%), com nível de inventário controlado (não muito alto) - essa melhoria é atribuída à mudança cultural promovida pelo novo presidente - alta diversidade de SKUs dificulta que vendedores sejam medidos por acurácia de previsão
Conclusões parciais		No caso da empresa 3, o apoio da alta direção é o mecanismo predominante da integração entre Vendas e PCP. A partir das respostas dos entrevistados, pode-se observar que as reprogramações são um elemento intermediário relacionado ao desempenho, pois a dinâmica do ambiente e a natureza da atividade (atender a demanda) exigem reprogramações e flexibilidade. Isso é intrínseco à atuação do PCP. Assim, para a avaliação do desempenho, o nível de reprogramações deve ser analisado juntamente a outros dois indicadores considerados muito relevantes: nível de serviço e nível de inventário.

5.5 Análise da empresa 4

5.5.1 Fluxo de atividades do PCP

A informação de demanda que chega ao planejamento é gerada pela equipe de *Marketing* e Administração de Vendas. A equipe de Planejamento e Controle da Produção, por outro lado, determina os limites de capacidade da fábrica junto com o time de engenharia industrial e tecnologia. Os dados de demanda são confrontados com os de capacidade para ajustar-se a configuração da fábrica e gerar um plano de produção já desagregado, no nível de produtos finais (programa mestre) e componentes. O sistema de ERP instalado faz essa ligação entre a demanda e a capacidade. A demanda é passada pelo time de vendas em unidades por dia, pois os limites de capacidade já estão inseridos no sistema. Ajusta-se então a configuração da fábrica definindo-se o número de turnos para cada família em um dado período, de forma a se atender a demanda e reduzir os custos. Por questões de robustez e desempenho, trabalha-se com períodos rolantes de congelamento, durante os quais o programa mestre não pode mais sofrer modificações. Tais períodos são estabelecidos para se conseguir lidar com as inércias dos sistemas de produção e suprimento, e costumam ser denominados na literatura tradicional de PCP por *time fences*.

Em seguida, esse programa mestre é desdobrado no nível de componentes e operações, e realiza-se a programação de operações (*Scheduling*). Nessa programação, há o sequenciamento idealizado e o ajuste fino, visando-se diminuir o tempo de *setup*, por exemplo. Na empresa 4, essa tarefa também está sob a responsabilidade do PCP, enquanto nas empresas 2 e 3 ela é comumente realizada pelas funções de Produção ou Manufatura.

Além desse planejamento detalhado, no nível desagregado, realiza-se também o Planejamento de Vendas e Operações (S&OP), no nível de famílias de produtos, com horizonte de um ano. Existe uma equipe de planejamento corporativa que é responsável pela operacionalização desse plano; pela ligação com as áreas de Vendas, *Marketing* e Logística; pela análise na demanda; pela definição da política de estoques visando a otimização financeira; pela análise de viabilidade do plano de vendas, em vista das restrições de capacidade.

No momento em que esse caso foi estudado, estava sendo implantado um sistema puxado de produção em parte da planta. Anteriormente, a programação detalhada era

centralizada, realizada pelo PCP, e havia cinco pontos de inserção da informação (linha, almoxarifado e áreas de fabricação). O sistema era empurrado, ou seja, cada centro de trabalho produzia segundo a programação recebida. Na época da entrevista, haviam sido lançados alguns testes pilotos em que a programação era enviada a um determinado ponto da linha e, a partir desse ponto, todas as demais operações a montante eram puxadas, ou seja, eram iniciadas mediante a solicitação da operação subsequente. Na prática, estava funcionando um sistema híbrido. Em alguns pontos a produção puxada, mas também havia pontos que ainda seguiam a programação. Existia certa dificuldade em se implantar a produção puxada completamente, pois ainda eram enviadas algumas programações em planilhas eletrônicas em paralelo ao sistema puxado. Como resultado inicial da mudança, os respondentes declararam terem observado uma redução dos estoques em processo nas áreas de fabricação.

5.5.2 *Questões críticas relacionadas ao PCP*

Os seguintes pontos foram destacados pelos respondentes como dificuldades ou possibilidades de melhoria relacionadas ao PCP:

- integração com a cadeia de suprimentos, em termos da extensão do sistema puxado para os fornecedores. No momento em que o estudo foi conduzido, planejava-se implantar o sistema puxado já operante em parte da planta para coordenar também as entregas dos principais fornecedores. Havia limitações para isso, uma vez que, com esse sistema, a informação demorava mais para percorrer toda a cadeia de produção a montante e chegar ao fornecedor. Isso, por sua vez, requeria que o fornecedor fosse mais flexível, para conseguir entregar em lotes menores e com uma velocidade de resposta maior.
- ajuste de capacidade considerando a demanda por peças de reposição. A empresa 3 trabalha com cerca de 26.300 itens de reposição, e não consegue fabricar todos esses itens seguindo um sistema contra-pedido (MTO). Por outro lado, também é difícil realizar previsões de demanda para estas peças com acurácia, para que se possa trabalhar com um sistema para estoque (MTS). A principal dificuldade consiste em definir uma forma de se inserir essas demandas das peças de reposição no sistema de informação, para que elas sejam contabilizadas no cálculo da capacidade necessária. A

inserção dessas peças no sistema como produto acabado aumentaria muito a complexidade dos cálculos de produção e capacidade, pois seria necessário gerenciar 26 mil itens com uma demanda errática. Assim, quando tais peças são incluídas no *mix* de produção, é difícil obter uma definição clara de capacidade, até mesmo para uma operação simples de embalagem de peças, por exemplo. Caso ocorra uma epidemia em campo, é necessário ter alta velocidade de resposta e flexibilidade para mobilizar recursos, o que não é trivial. Na época de realização do estudo, essa análise de capacidade de produção regular e de produção de peças de reposição não era feita de forma integrada.

- dimensionamento dos níveis de estoque de produtos acabados e matérias-primas de acordo com o *lead time* de produção ou fornecimento. Segundo o entrevistado, os esforços da empresa para se integrar a cadeia de produção e suprimento, olhando desde a demanda final até a ponta extrema do fornecimento, passam pela definição dos níveis de estoque de produtos acabados, de componentes (fornecidos internamente e externamente) e de matérias-primas. A questão principal reside na determinação do equilíbrio entre os estoques de produto acabado e estoques de matéria-prima, ou estoques de produtos intermediários, em função dos *lead times* de fabricação e fornecimento. Para alguns itens cujo *lead time* de fabricação é curto, por exemplo, pode-se ter mais estoque de matérias primas e menos estoque de componentes finalizados. Esta definição da política de gestão estoques para cada item seria feita com base na velocidade de fabricação ou produção do item.
- flexibilidade versus formalização das mudanças. De acordo com os relatos, atender a demanda, em alguns momentos, exige muita flexibilidade. Quando ocorrem problemas na fabricação ou problemas no abastecimento de materiais, é necessário alterar as programações de uma forma muito dinâmica, e tais alterações devem ser colocadas no sistema, o que consome um tempo significativo. Esse fato, em alguns momentos, gera um descompasso entre a informação que está circulando na fábrica e a informação que está no sistema.

5.5.3 Estrutura organizacional

Os entrevistados apresentaram o desenho da estrutura organizacional da empresa 4 durante as entrevistas, porém, solicitaram que esse material não fosse divulgado na pesquisa. Alguns comentários sobre essa estrutura serão feitos no subitem seguinte, já que se constatou que ela representa um relevante mecanismo de integração interfuncional, assim como no caso da empresa 3.

5.5.4 Mecanismos de integração

Na empresa 4, observou-se a presença dos seguintes mecanismos de integração:

- sistema de comunicação. Segundo os relatos do chefe de planejamento, uma integração intrafuncional e interfuncional forte é conseguida com base nos processos de comunicação. Existe um sistema de comunicações bem definido em torno das atividades de planejamento e controle da produção, envolvendo pessoas determinadas. Existem também algumas reuniões formais realizadas com uma frequência determinada.
- estrutura e cultura organizacionais. A estrutura organizacional da empresa 4 é vista com um fator de integração entre a equipe de PCP e a equipe de Planejamento de Vendas e Operações, pois propicia um conflito tido como saudável entre demanda e suprimento. Essas duas equipes estão no mesmo nível hierárquico dentro da estrutura organizacional, e respondem ao mesmo gerente geral corporativo. Assim, a equipe de PCP cobra a equipe de Planejamento de Vendas e Operações pela acurácia das previsões e questiona aspectos dos planos recebidos, como a configuração de turnos, por exemplo. As duas equipes ficam separadas geograficamente, uma vez que a equipe de Planejamento de Vendas e Operações, que é corporativa, fica no escritório central da empresa, enquanto as equipes de PCP ficam em cada uma das plantas produtivas. Essa separação é percebida como positiva pelo chefe de PCP, exatamente por gerar esse confronto. Ele supõe que a existência uma área única de Planejamento de Vendas e PCP, por exemplo, não geraria o questionamento entre os lados que tratam do suprimento e da demanda. Algumas das mudanças solicitadas pela equipe de PCP,

quando possível, são atendidas. Quando a demanda por um dado produto não vai ser atendida devido a restrições de capacidade, por exemplo, a equipe de Planejamento de Vendas e Operações tenta influenciar a demanda futura, dentro de limites, fazendo a migrar para outro produto. De acordo com o entrevistado, existe um entendimento de que ambos os lados precisam ser flexíveis e aceitar fazer alterações. Se as exigências do lado da demanda forem sempre seguidas, prioriza-se demais o atendimento (nível de serviço) em detrimento do custo, e os recursos não são otimizados. O lado do suprimento, da operação, propõe então alterações que não prejudiquem significativamente o atendimento da demanda, mas que buscam otimizar custos. Estas reuniões de discussão dos planos são feitas com uma frequência semanal, e o ponto de contato é o funcionário do PCP responsável pelo planejamento de longo prazo junto com o coordenador de PCP. Cerca de duas vezes por mês participam também das reuniões o chefe do PCP e o chefe da área de Planejamento de Vendas e Operações.

- presença de pessoas com função integradora na interface entre as áreas de PCP e Engenharia Industrial. A integração do PCP com a área de Engenharia Industrial foi um dos fatores que proporcionou a melhoria dos indicadores de reprogramações, segundo os relatos. A Engenharia Industrial é um grande fornecedor de informação para o PCP, pois esta área define e atualiza os processos de fabricação. O chefe de PCP tem consciência disso e dá importância a esse fato. Assim, melhorou-se a acurácia das informações de eficiência das máquinas, roteiro e tempo de fila registradas no sistema ERP. Em outras palavras, melhorou-se a Qualidade da Informação disponível para o planejamento. O cadastro correto das eficiências, por exemplo, fez com que os planos se tornassem bem equiparados ao que de fato consegue produzir na fábrica. Essa integração entre fábrica e engenharia industrial foi estabelecida pela ação de um funcionário do PCP trabalhando nessa interface, o mesmo que é responsável pelo planejamento de longo prazo. Por outro lado, a empresa ainda sofre de problemas em relação à acurácia dos registros de estoque, que geram reprogramações, denominadas na empresa de viradas de linha não programadas. Não foram detalhadas as causas desse problema de acurácia.
- presença de pessoas com função integradora dentro da área de planejamento e controle da produção. Outro fator que propicia a integração é o fato de existirem dois planejadores na equipe de PCP, sendo um responsável pela análise de longo prazo e outro responsável pelo controle de curto prazo. Ambos trabalham conjuntamente, na mesma planta. A função de planejamento no longo prazo é responsável por analisar as

alterações que estão sendo feitas no momento e atualizar a visão futura, tanto para a fábrica quanto para os fornecedores. O planejador de longo prazo analisa o impacto dos adiantamentos ou adiamentos da produção propostos no curto prazo. Por exemplo, às vezes há uma ordem já programada para faturar e não se pode fazer uma alteração no curto prazo; é necessário executar a ordem de qualquer maneira. A presença dos dois planejadores propicia essa análise. Eles trabalham na mesma sala e se comunicam continuamente. Além disso, o planejador de longo prazo tem a responsabilidade de se comunicar com a equipe corporativa de Planejamento de Vendas e Operações, conforme descrito anteriormente.

5.5.5 Reprogramações: frequência e causas

Os entrevistados estimam que cerca de 30% dos planos sofram alterações formais. Mensurando-se de outra forma, tem-se uma média de uma reprogramação por dia, ou seja, uma virada de linha não programada por dia, segundo a terminologia utilizada na empresa. Estas reprogramações ficam registradas no sistema, sendo possível acompanhar as estatísticas.

As variações na demanda em termos de *mix* foram colocadas em primeiro lugar como causas das reprogramações. Entretanto, há estoques altos de produto acabado e matéria-prima para absorver essa variação. Se os estoques forem reduzidos pela metade, a variação de demanda torna-se o principal problema. Além disso, esse fator é considerado incontrolável, portanto, ele não entra no levantamento de prioridades de melhoria da empresa (tais prioridades são levantadas estatisticamente, e são representadas em gráficos de Pareto). Dado que essa variação na demanda existe, busca-se sanar outras falhas.

Excetuando-se a questão da demanda, destacam-se como principal causa das reprogramações as falhas de suprimento interno. Internamente, a quantidade de quebras de máquinas é relevante, e a empresa mantém menos estoques de componentes fabricados do que seus fornecedores. Além das quebras, há ainda outros fatores que afetam o suprimento interno, como problemas de qualidade e outros problemas inesperados, como a falta de energia elétrica.

A próxima causa relevante das reprogramações refere-se às falhas de suprimento externo, isto é, o atraso de fornecedores. Antes dessa questão de fornecimento externo, os entrevistados mencionaram o problema de acurácia dos registros de estoque, ou seja, a

discrepância entre o estoque físico e aquele registrado no sistema. Depois, eles desconsideraram esse fator, já que esta questão está relacionada a detalhes operacionais, de almoxarifado, e não seria interessante, segundo eles, entrar nesse nível de detalhamento.

Os problemas de comunicação entre as áreas da empresa e as questões de reprogramações informais feitas pelo próprio usuário foram fatores considerados não relevantes como causa das reprogramações. Num momento anterior, os usuários dos planos, i.e., os supervisores de linha, alteravam por conta própria os planos de produção buscado otimizar o *setup* e melhorar os indicadores de produtividade. O PCP então desenvolveu um mecanismo de controle interessante: um sistema de impressão de etiquetas com código de barras, de forma que o produto só era apontado nos estoques se tivesse as etiquetas. Essa impressão ficava unicamente sob o controle do PCP, o que eliminou essa cultura de mudança informal nos planos de produção.

5.5.6 *Objetivos de desempenho e indicadores*

Segundo o chefe do PCP, no nível de empresa, não há uma priorização clara de algum dos 5 objetivos de desempenho da produção. Todos são importantes, de acordo com a cultura da empresa. Por outro lado, os objetivos específicos da área de PCP estão associados ao nível de estoque e à otimização dos custos de fabricação, conforme mencionado anteriormente.

Deve-se notar que, diferentemente da empresa 3, a área de *Marketing* e vendas, nesse caso, é cobrada pela acurácia das previsões e pelo nível de estoque. O time de Planejamento de Vendas e Operações (subordinado ao gerente geral de Planejamento) é responsável por realizar essa cobrança. Na empresa 4, tais indicadores são direcionadores dos esforços de vendas. Um produto com 60 dias de estoque, por exemplo, indica que houve um erro no planejamento de vendas. Sendo assim, o time de *Marketing* fica responsável por tentar estimular as vendas desse produto. Esse alinhamento de objetivos funcionais constitui-se um mecanismo de integração adicional que, segundo a literatura de Estratégia, é bastante relevante para o desempenho competitivo da empresa.

5.5.7 *Quadro resumo e avaliação da relação entre os constructos*

O Quadro 5.6 apresenta um resumo dos aspectos observados na empresa 4. Com relação à integração, observa-se que a frequência de comunicação e reuniões é alta. Existem canais de comunicação bem estabelecidos, e os processos de comunicação foram mencionados diretamente como um mecanismo de integração relevante. Com relação ao compartilhamento de planos e decisões, os respondentes declararam que algumas diretrizes são recebidas dos níveis mais altos da hierarquia organizacional, mas boa parte dos planos é elaborada conjuntamente. Vários relatos demonstraram que há abertura para discussão entre a equipe de PCP e a equipe de Planejamento de Vendas em torno dos planos de produção. Tal abertura, inclusive, é propiciada pela estrutura organizacional, uma vez que ambas as equipes se situam em níveis correspondentes da estrutura, respondendo ao mesmo diretor geral. De acordo com os respondentes, os objetivos de cada equipe ou função da empresa são conflitantes, mas existe consciência da necessidade de haver esse conflito para otimizar o desempenho globalmente, ao invés de pontualmente. O chefe de PCP entende que este confronto entre o lado da demanda, orientado à otimização do nível de serviço, e o lado do suprimento, orientado à redução dos custos, é positivo para o desempenho global da empresa. Por outro lado, segundo ele, tal percepção não está presente em todos os níveis organizacionais. Na base da estrutura, no nível organizacional, este entendimento não é tão claro. De acordo com os relatos e notas dadas pelos respondentes, no geral, pode-se considerar que a empresa apresenta um nível médio-alto de integração organizacional.

Além dos fatores já mencionados, a integração na empresa 4 também é impulsionada pela presença de pessoas com função integradora, trabalhando na interface de dois processos ou equipes distintas. Na planta estudada, havia dois planejadores em comunicação direta, atuando na interface do planejamento de curto e de médio prazo. O planejador de médio prazo também atuava como um elemento de ligação entre a equipe de PCP na planta e a equipe corporativa de Planejamento de Vendas e Operações. De forma similar, havia um membro da equipe de PCP designado para atuar na interface com a Engenharia Industrial, visando manter a acurácia dos registros de roteiro de processo, *lead times* de fabricação e utilização das máquinas.

Observa-se também no quadro-resumo, que a integração técnica na empresa 4 é alta, tanto em termos de interface quanto de compatibilidade; utilizam-se interfaces mais automatizadas, como sistemas compartilhados e portais na intranet, ao invés de e-mail ou

planilhas eletrônicas, por exemplo, e as diferentes ferramentas utilizadas são compatíveis entre si. Os entrevistados comentaram que a empresa foi pioneira na integração entre software de apoio ao S&OP e o software de ERP.

No que tange à incerteza, observa-se que a dimensão mais relevante é a variação na demanda em função da atualização da carteira de pedidos. Tal variação tende a ocorrer com uma frequência entre diária e semanal e semanalmente avalia-se o impacto dessa variação nos custos e no atendimento dos planos de longo prazo. Outra dimensão que se destaca são as mudanças nas tecnologias de produto e processo. Tais mudanças, em especial no projeto dos componentes, são razoavelmente frequentes, visando-se obter ganhos em custo por meio da mudança dos materiais ou aumento da facilidade de fabricação. As demais fontes de incerteza investigadas não são tão significativas, uma vez que a empresa é líder em seu mercado, sendo pouco afetada pelos concorrentes, e a entrega de seus fornecedores é relativamente consistente em termos de prazo. Nesse caso, a dimensão complexidade, discutida nas bases teóricas, é menos intensa, uma vez que a empresa não trabalha com uma alta diversidade de produtos.

As variações na demanda, ou seja, na carteira de pedidos, foram destacadas como a principal causa das reprogramações. No entanto, é interessante ressaltar que a equipe de PCP considera essa variação na demanda como uma causa incontrolável, intrínseca ao ambiente. Parte-se também da premissa de que o Planejamento de Vendas e Operações, ligado à área de Vendas, se empenha em otimizar o processo de previsão de demanda, buscando a maior acurácia possível. Assim, dado que essa variação na demanda existe e pode ser pouco controlada, a equipe de PCP busca atacar as demais causas de reprogramações, que se referem às operações internas e são mais controláveis. Assim, desconsiderando-se a variação na demanda, foram listadas como causas, em ordem de prioridade: as falhas de suprimento interno, devido à quebras de máquinas e problemas de qualidade; as falhas de suprimento externo, devido ao atraso de fornecedores; e, por fim, as dificuldades de comunicação entre as áreas, as quais não foram consideradas um fator relevante. O caso também ilustrou o desenvolvimento de um mecanismo interessante para inibir as reprogramações informais, feitas pelos próprios usuários, relatado no tópico 5.5.5.

Conforme discutido nas bases teóricas desse trabalho, os autores de pesquisas empíricas dividem o constructo de incerteza em duas dimensões: a ambiental e a executiva (ou do sistema). Fazendo um paralelo entre a teoria e a situação observada, pode-se perceber que parte das causas das reprogramações tem sua fonte na incerteza ambiental, e parte deve-se às incertezas internas do sistema de produção, i.e., aos fatores internos que impedem que a

programação seja executada conforme os planos. É interessante observar que a equipe de PCP da empresa 4 demonstrou ter essa percepção da diferença entre as fontes de reprogramações.

Na empresa 4, a área de PCP busca otimizar os níveis de estoque e os custos de fabricação, uma vez que seu desempenho é avaliado com base nesses indicadores. No nível de empresa, os respondentes declararam não haver uma priorização de um objetivo de desempenho específico dentre o conjunto tradicional de objetivos: custo, qualidade, velocidade, confiabilidade e flexibilidade. Segundo eles, todos esses objetivos são perseguidos e, de alguma forma, monitorados.

Além da relação entre as dimensões da incerteza e as causas de reprogramações, comentada anteriormente, o estudo de caso na empresa 4 ilustrou a relação entre a integração, a qualidade de informação e o desempenho, avaliado em termos de reprogramações. A presença de um integrador, atuando na interface entre PCP e Engenharia Industrial propiciou a melhoria da qualidade de informação disponível ao planejamento, principalmente em termos de acurácia das informações de roteiros de processo, utilização das máquinas, tempos de fila, etc. Isso, por sua vez, refletiu em uma melhora de desempenho, uma vez que estes problemas de qualidade da informação deixaram de ser causas significativas de reprogramações, gerando uma melhora na frequência total de reprogramações.

Quadro 5.6 – Resumo das observações relativas à empresa 4.

Empresa 4		
Porte / volume		grande
Tipo de sistema de produção	em relação à demanda	MTS (principal) e MTO (mercado externo)
	em relação ao processo de produção	montagem: flowshop
Variedade (no. SKUs)		baixa - 60 SKUs - 2 grandes famílias (tipos de produto), mix 70%-30% (naquela planta)
Atividades do PCP		equipe corporativa de PCP: operacionalização do S&OP, dimensionamento de estoques; equipe local de PCP: análise de capacidade, MPS, scheduling
Estrutura organizacional		funcional; uma equipe corporativa e outra local (por planta)
Problemas ou questões críticas		<ul style="list-style-type: none"> - extensão do sistema puxado para a cadeia de suprimentos (fornecedores) x perda de velocidade de resposta; - questão de ajuste de capacidade para peças de reposição; - dimensionamento dos níveis de estoque de produtos acabados e matérias-primas de acordo com o lead time (velocidade de resposta) - flexibilidade x tempo para inserir informações no sistema;
S&OP		- há um procedimento formalizado e bem consolidado dentro da empresa.
Mecanismos de integração		<ul style="list-style-type: none"> - integração com base em sistemas (não ERP), mas sim em termos de processos de comunicação - estrutura organizacional é vista como um aspecto positivo, pois propicia um conflito saudável entre demanda e suprimento - integração do PCP com a Engenharia Industrial (responsável pelos processos) resultou em melhor acurácia nos registros das eficiências, roteiros e tempos de fila - existência de dois planejadores, um dedicado ao controle de curto prazo e outro responsável por analisar os impactos das mudanças no horizonte de mais longo prazo
Integração organizacional	comunicações e reuniões	<i>sem contato vs. existência de grupos de trabalho</i> : nível alto - grupos de trabalho
		<i>reuniões com rotina/procedimentos estabelecidos</i> : nível alto
	decisões compartilhadas	<i>planos elaborados conjuntamente</i> : nível médio - depende da decisão. O chefe do PCP recebe poucas diretrizes. A maioria dos planos é desenvolvida conjuntamente; há argumentação com o chefe do Planejamento de Vendas e Operações
		<i>procedimento formal de S&OP - existente e com que frequência</i> : há procedimento de S&OP consolidado. A frequência da reunião corporativa é trimestral (avaliação dos indicadores da empresa e resultados financeiros); a reunião operacional (em que o Planejamento de Vendas passa a demanda revisada para o PCP) é mensal
	troca de idéias	respondido no item decisões compartilhadas
	entendimento comum dos objetivos	<i>objetivos funcionais alinhados, integrados</i> : nível médio - Objetivos separados porém bem entendidos; "São conflitantes e aprendemos a entender isso. Não sei se no time, na operação, todos entendem isso. Porque a operação trabalha muito focada numa pequena parte".
		<i>entendimento dos demais processos e objetivos</i> : nível médio - Alto grau de entendimento dos outros processos (porém não em todos os níveis da empresa)

Quadro 5.6 – Resumo das observações relativas à empresa 4 (continuação).

Integração técnica	interface	nível alto - ERP, servidor, portais, intranet
	compatibilidade	nível alto - compatíveis
	comentários	software de S&OP interligado ao ERP, que contém as restrições de capacidade; pioneiros nessa integração; integração ERP-portal e ERP-kanban eletrônico
Incerteza	variações na demanda	mudanças semanais (ou até diárias) - avaliam o impacto semanal
	comportam/o do fornecedor	atrasa 25% das vezes
	ação dos competidores	não aplicável - a empresa não é afeta da pelas ações dos competidores
	mudanças das tecnologias de produção	nível médio alto - entre razoável e frequente - trimestral (processos e produtos)
Frequência das reprogramações	formais	30% dos planos; 1 virada não programada por dia
	informais	os usuários não alteram devido à implantação de um sistema que impede
Causas das reprogramações		1 - mudanças na demanda (absorvidas por estoques - não considerado); 1 - suprimento interno; 2 - suprimento externo; 3 - dificuldade de comunicação entre as áreas (está muito baixo); 4 - reprogramação informal: eliminando - atualmente a empresa implantou um mecanismo de impressão de etiquetas das peças e produtos acabados que é liberado somente pelo PCP. Isso eliminou as mudanças informais de programação, antes feitas pelo próprio pessoal do chão-de-fábrica
Objetivos de desempenho	gerais da empresa ou un. de negócios	todos - otimização multi-propósito. "Segurança eu não negocio, qualidade eu cumpro à risca, consumidor está em primeiro lugar, e para atendê-lo, eu preciso de flexibilidade, velocidade e custo"
	do PCP	inventário e custo; o indicador de nível de serviço está ligado a Vendas e Logística; flexibilidade - como medir melhor?
Outras observações		- mudanças no PCP buscando um sistema puxado. Antes havia 5 pontos de inserção da informação, da programação (linha, almoxarifado e áreas de fabricação). Posteriormente, foram lançados alguns pilotos em que a programação é mandada para a montagem, que puxa a fabricação, que puxa o almoxarifado, etc. Mais detalhes no arquivo. - ponto interessante: a empresa possui registros formais das reprogramações e da flexibilidade, ou seja, da % das solicitações de alteração que se conseguiu atender
Conclusões parciais		Na empresa 4, as próprias métricas de desempenho cobradas das diferentes funções da empresa (como vendas e PCP) favorecem a integração. A partir das respostas dos entrevistados, pode-se observar que as reprogramações são um elemento intermediário relacionado ao desempenho, pois a dinâmica do ambiente e a natureza da atividade (atender a demanda) exigem reprogramações e flexibilidade. Isso é intrínseco à atuação do PCP. Assim, para a avaliação do desempenho, o nível de reprogramações deve ser analisado juntamente a outros dois indicadores considerados muito relevantes: nível de serviço e nível de inventário.

5.6 Análise comparativa dos casos

Uma análise comparativa dos casos foi realizada buscando-se identificar padrões comuns ou divergências entre eles e, sobretudo, buscando-se observar as relações entre os constructos investigados. A categorização apresentada nos quadros-resumo de cada empresa (Quadros 5.3 a 5.6) foi utilizada para a síntese e comparação das informações.

Após a caracterização inicial das empresas e da área de PCP, os entrevistados foram questionados quanto às dificuldades ou pontos críticos que permeiam as atividades da área de Planejamento e Controle da Produção. Dentre esses, o aprimoramento do Planejamento de Vendas e Operações (S&OP) e da interface com a função de Vendas/*Marketing* foram pontos comuns, mencionados pelos respondentes de duas das empresas. Outros pontos particulares citados foram a melhoria dos sistemas de informação que integram as atividades, o dimensionamento dos níveis de estoque, o conflito entre as métricas de desempenho funcionais, as questões de motivação dos funcionários do PCP, bem como de reconhecimento da importância dessa área funcional.

Em termos de estrutura organizacional, observou-se que o PCP das unidades de negócio pesquisadas é organizado de maneira semelhante, com posições de gerência, supervisão e execução do planejamento (planejadores). Na empresa 3, a estrutura é diferenciada, pois o PCP para todas as unidades de negócio é centralizado (corporativo) e isso funciona como um elemento de integração interna. Na empresa 4 a função de PCP é dividida entre duas equipes, sendo uma também corporativa e outra local, vinculada a cada planta.

Além da estrutura organizacional, foram identificados vários outros mecanismos de integração, apresentados no Quadro 5.7. Observa-se que o mecanismo de reuniões e comunicação direta está presente em todas as empresas, e que estrutura organizacional é um fator de integração comum às empresas 3 e 4. Nas empresas 2, 3 e 4 há a presença de pessoas com papel integrador. Além disso, foram observados alguns mecanismos de integração particulares a cada empresa: os sistemas de informação foram mencionados como um importante elemento de integração na empresa 1; a cultura organizacional mostrou-se ser um fator relevante na empresa 2; o apoio da alta direção estava fortemente presente na empresa 3; e um alinhamento entre indicadores das áreas funcionais foi observado na empresa 4.

Em resumo, os casos estudados ilustraram mecanismos de integração diversos, e os resultados obtidos estão alinhados com o corpo teórico da área, apresentado no capítulo 2. Dentre os dez mecanismos listados no Quadro 5.7, sete deles são mencionados na literatura: os fatores 1, 2, 5, 7, 8, 9 e 10, os quais são discutidos por Pagell (2004).

Quadro 5.7 – Mecanismos de integração presentes nas empresas estudadas

empresa mecanismo	1	2	3	4
1. sistema de informação	x			
2. comunicação e reuniões	x	x	x	x
3. padronização de atividades e definição de responsabilidades	x			
4. porte da empresa	x			
5. cultura organizacional		x		
6. presença de funções integradoras		x	x	x
7. estrutura organizacional			x	x
8. apoio da alta direção			x	
9. processo de S&OP consolidado			x	
10. alinhamento de indicadores das áreas funcionais				x

Nos casos estudados, buscou-se avaliar comparativamente as várias dimensões dos constructos investigados, i.e., integração, incerteza, qualidade da informação, reprogramações e desempenho. Uma síntese das informações é apresentada no Quadro 5.8.

Primeiramente, pode-se observar que todas as empresas ou unidades de negócio pesquisadas apresentaram um nível alto de integração organizacional, conseguido por meio dos diferentes mecanismos já apresentados. O caso da empresa 2 mostrou uma particularidade, pois constatou-se que a integração da área de PCP com a área de Produção era bastante alta, enquanto a integração desta mesma área com a área de Vendas/*Marketing* era reduzida. Com relação à integração técnica, as empresas 3 e 4 apresentaram um nível um pouco maior em relação às demais, uma vez que seus sistemas de informação tinham um grau maior de compatibilidade.

Nas investigações relativas à incerteza, observa-se que as variações na demanda constituem-se a dimensão mais significativa. Esta tendência geral não se aplica somente à empresa 1, visto que esta produz contra-pedido, ou seja, segundo o sistema MTO (*Make To Order*). A incerteza relacionada a fornecedores externos não é um fator muito relevante nos casos estudados, provavelmente porque algumas das empresas, em momentos anteriores ao

estudo, já haviam empreendido esforços na melhoria de desempenho de seus fornecedores. Como as empresas pesquisadas são líderes nos mercados em que atuam, os entrevistados declararam que a incerteza proveniente de ações dos concorrentes é praticamente inexistente ou afeta pouco o comportamento da empresa.

Quadro 5.8 – Resumo comparativo das informações obtidas em relação aos constructos do estudo

empresa constructos/dimensões	Avaliação dos constructos			
	1	2	3	4
integração organizacional	alta	alta*/baixa**	alta	alta
integração técnica	média baixa	média	alta	alta
incerteza - demanda	inexistente	alta	alta	alta
incerteza - fornecedores	baixa	baixa	baixa	baixa
incerteza - concorrentes	baixa	baixa	baixa	baixa
incerteza - tecnologia	baixa	baixa	baixa	média
incerteza - variedade/personalização	alta	baixa	muito alta	baixa
incerteza - crescimento	presente	não mencionada	presente	não mencionada
qualidade da informação - previsões	não aplicável	baixa	média alta	média alta
reprogramações formais - frequência	baixa (médio prazo); sem informação (curto prazo)	entre quinzenal e semanal	diárias	entre semanal e diária
reprogramações informais - frequência	sem informação	não significativa	sem informação	inexistente
causas principais das reprogramações	suprimento interno (qualidade)	1.demanda 2. suprim. externo	1. demanda 2. comunicação (QI)	1. demanda 2. suprim. interno
indicadores específicos do PCP	OTIF (nível de serviço)	sem informação	nível de serviço e inventário	inventário/ custo
objetivos de desempenho priorizados	confiabilidade (entrega)	qualidade	custo e confiabilidade	sem priorização
metas de desempenho (gerais ou específicas da área de PCP)	atingidas (nível de serviço 95%)	atingidas	atingidas (nível de serviço 95%)	atingidas

* a integração é alta na interface entre as áreas PCP e Produção (Manufatura)

**a integração é mais baixa na interface entre as áreas de PCP e Vendas

Durante a realização dos estudos, foram consideradas duas dimensões adicionais de incerteza que não haviam sido previstas no protocolo de coleta de dados: a alta variedade de itens produzidos e a taxa de crescimento das operações da empresa. A alta variedade de itens é comparável à alta personalização dos produtos, característica que estava presente no caso da empresa 1. É importante considerar esta dimensão nas análises, uma vez que essa variedade implica uma complexidade de gestão muito maior, tanto dos planos de produção quanto dos estoques. Alguns autores consideram essa complexidade do ambiente como uma dimensão da incerteza, conforme discutido no capítulo 2. A taxa de crescimento das operações foi incluída na análise porque o estudo das empresas 1 e 3 revelou que elas estavam ou estiveram submetidas a um período de elevado crescimento do volume de produção em um curto espaço

de tempo. Essa situação aumenta o nível de incerteza enfrentado pela empresa, o que tende a gerar um aumento no nível de reprogramações.

Nas três empresas que trabalham segundo o sistema MTS (*Make To Stock*), pode-se observar que a frequência de reprogramações é alta. Em geral, os planos são alterados diariamente ou mais do que uma vez por semana. Para tais empresas, a causa primária das reprogramações são as variações na carteira de pedidos, ou seja, na demanda real de curto prazo em relação à demanda prevista. Em segundo lugar, destacam-se as falhas de suprimento interno, como, por exemplo, a falta de determinados componentes fabricados pela própria empresa para a montagem de um dado produto final. Na empresa 3, a comunicação entre as funções de PCP e *Marketing* é colocada como segunda causa de reprogramações. Nesse caso, pode-se associar este fator mencionado ao constructo qualidade de informação, uma vez que as deficiências na interface entre PCP e *Marketing* fazem com que a informação utilizada para planejamento da produção não apresente elevada acurácia. Para a empresa que trabalha sob encomenda, as reprogramações são causadas principalmente por problemas de qualidade, os quais geram refugo e retrabalho.

Com relação ao desempenho, observou-se que as empresas dão diferentes ordens de prioridade às dimensões custo, qualidade, confiabilidade, velocidade e flexibilidade, as quais formam o conjunto de objetivos de desempenho genéricos da produção. No caso da função de PCP, especificamente, o desempenho é cobrado principalmente por meio dos indicadores de nível de estoque e nível de serviço, segundo mencionaram os entrevistados. Em uma das empresas, a acurácia das previsões também é monitorada. O nível de estoque está diretamente relacionado ao aspecto financeiro, pois estoques excessivos representam capital imobilizado. Por outro lado, é necessário manter um nível adequado de estoques de forma que os pedidos possam ser atendidos dentro das datas de entrega estipuladas. Segundo foi possível observar, o PCP é cobrado por esse equilíbrio entre custos e nível de serviço. Em uma das empresas, no PCP, a ênfase maior é colocada em custos, enquanto que o nível de serviço é cobrado da área de Logística.

A análise individual e comparativa dos casos evidenciou a existência de algumas relações entre os constructos investigados, que serão discutidas a seguir.

Com resultado da observação das causas de reprogramações na empresa 4, constatou-se ser possível separá-las em dois grupos: causas derivadas da incerteza ambiental, como mudanças na demanda, ações dos concorrentes e atrasos pontuais dos fornecedores, e causas derivadas de ineficiências internas, como falta de acurácia das informações de processo e da

previsão de demanda, quebra de máquinas por falta de manutenção, falhas de suprimento interno devido a problemas de coordenação, problemas de qualidade, etc. A primeira categoria agrupa as causas inevitáveis ou incontroláveis, enquanto a segunda corresponde às causas evitáveis ou controláveis. Conforme apresentado no capítulo 2, os eventos que levam a falhas internas podem ser associados ao conceito de incerteza do sistema, ou incerteza executacional, pois impedem que os planos sejam executados conforme o planejado. Assim, pode-se estabelecer uma relação entre as dimensões da incerteza e as causas de reprogramações, conforme mostrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – relação entre incerteza e reprogramações, observada na empresa 4

O chefe de PCP da empresa 4 tinha a percepção dessa relação, ou seja, reconhecia a existência de duas fontes distintas de causas de reprogramações. Com base nisso, a equipe de PCP buscava atuar principalmente sobre as causas mais controláveis de reprogramações.

Como um dos resultados principais do estudo de casos múltiplos, observou-se a existência de uma relação positiva entre integração e desempenho nas empresas 1, 3 e 4. No caso das empresas 1 e 3, ambas estiveram submetidas a uma situação de significativo crescimento de demanda, ou seja, estiveram submetidas a maiores incertezas e, ainda assim, conseguiram manter ou melhorar o nível de serviço, devido à intensificação da integração. No caso da empresa 3, além do nível de serviço, conseguiu-se também manter o nível de estoque razoavelmente controlado, segundo a declaração dos entrevistados. Cada empresa utilizou mecanismos de integração relativamente diferentes, mas, independentemente do mecanismo, os respondentes tinham a percepção do impacto positivo da integração no desempenho.

A análise da situação relatada nas empresas 1, 3 e 4 também mostrou que a qualidade da informação estava presente na relação positiva entre integração e desempenho como um elemento intermediário. Primeiramente, a integração gerou a melhoria da qualidade da informação disponível para o planejamento. No caso da empresa 1, isso significou maior

acurácia nos dados de pedidos em carteira e dados do processo de produção; no caso da empresa 3, significou maior acurácia nas previsões de demanda. Com isso, a frequência de reprogramações causadas por informações inexatas e falhas internas diminuiu, acarretando a melhoria do desempenho em termos de nível de serviço e nível de estoque. A Figura 5.3 mostra essas relações positivas entre integração, qualidade de informação e desempenho.

Figura 5.3 – relação observada entre integração, qualidade da informação e desempenho, moderada pela incerteza

Na situação analisada, percebeu-se a influência da incerteza na relação entre integração e desempenho, como um fator moderador. O aumento do volume de produção tenderia a desestabilizar as operações, aumentando o nível de reprogramações e afetando negativamente o desempenho, em maior ou menor grau. Em resposta a isso, as empresas desenvolveram ou intensificaram a integração visando manter um desempenho competitivo. Em outras palavras, elas buscaram adaptar suas estruturas para se manterem ajustadas ao ambiente, conseguindo obter, assim, melhor desempenho. Esta visão, portanto, está alinhada à Teoria da Contingência, discutida no capítulo 2.

A análise dessas situações similares de crescimento envolvendo as empresas 1 e 3 também permitiu a observação de algumas dimensões específicas dos constructos investigados. Observou-se o desenvolvimento de estruturas de integração no nível intra e

interfuncional, e constatou-se a presença de duas dimensões da incerteza, uma associada ao ambiente e outra à alta variedade de itens produzidos. Além disso, observou-se que os indicadores de desempenho do PCP estavam relacionados à confiabilidade e custo, dois objetivos genéricos da produção destacados na literatura.

É interessante destacar que o caso conduzido na empresa 2 ilustra o sentido inverso da relação entre integração, qualidade de informação e desempenho. Nesse caso, um nível relativamente baixo de integração organizacional entre as funções de PCP e Vendas gerava deficiências na qualidade da informação, causando um aumento na frequência de reprogramações, ou seja, impactando o desempenho negativamente. Por outro lado, o entrevistado dessa empresa tinha a percepção de que a melhoria da integração afetaria positivamente a qualidade da informação e a frequência de reprogramações, numa relação em cadeia. Assim, essa evidência da situação inversa também corrobora a existência da relação direta entre os constructos mencionados.

Outra situação relatada pelos entrevistados da empresa 4 também ilustrou a relação positiva entre estes mesmos constructos. Tal situação envolve a interface entre a área de PCP e de Engenharia Industrial, responsável pelas informações de roteiro de processo de componentes e produtos finais, utilização das máquinas e tempo de fila, entre outros. Roteiros com operações faltantes, tempos de processamento incorretos ou taxas irreais de utilização das máquinas fazem com que os planos gerados não correspondam às situações reais de produção, ou seja, a acurácia de tais informações afeta diretamente a qualidade dos planos. Para abordar essa situação, um funcionário da equipe de PCP foi destacado para trabalhar nessa interface com a Engenharia Industrial, atualizando e corrigindo os dados de roteiro de processo. Como resultado, o chefe de PCP relatou uma diminuição significativa na frequência de reprogramações, ou seja, obteve-se uma estabilidade maior no planejamento. Assim, novamente observa-se a relação positiva entre integração, qualidade da informação e desempenho, apresentada na Figura 5.4.

Figura 5.4 – relação observada entre integração, qualidade da informação e desempenho na empresa 4

Em termos de desempenho geral de negócio, a amostra de empresas selecionadas para o estudo de casos múltiplos é relativamente homogênea, uma vez que foram escolhidas empresas que são líderes em seus mercados de atuação, ou seja, que apresentam um desempenho superior em relação aos concorrentes. Esse foi um aspecto importante para fundamentar a pesquisa, uma vez que, sabendo-se que tais empresas tinham um bom desempenho, buscou-se observar como os demais constructos investigados, i.e., a integração, incerteza e a qualidade da informação propiciavam tal nível de desempenho. Por outro lado, a amostra também se mostrou relativamente heterogênea, já que cada empresa analisada apresentou alguma peculiaridade em relação às demais, como o porte, a variedade de itens produzidos, a estrutura organizacional diferenciada, etc. Estas particularidades enriqueceram o estudo, uma vez que foi possível observar, por exemplo, a presença de mecanismos de integração variados. Outro ponto relevante para a pesquisa foi o fato de as empresas estudadas terem uma função de PCP bem estruturada. Assim, os processos e atividades de planejamento e controle da produção apresentavam certo nível de maturidade e as pessoas envolvidas tinham responsabilidades definidas. Isso permitiu obter um conjunto consistente de informações sobre os aspectos específicos buscados nesta pesquisa.

Ainda que as observações não sejam generalizáveis, o estudo de casos múltiplos evidenciou algumas relações entre os constructos investigados, conforme já apresentado. Mais especificamente, a relação direta entre integração, qualidade da informação e desempenho, moderada ou não pela incerteza, foi observada em todos os casos analisados. Três desses casos ilustraram a relação positiva entre os constructos, partindo-se da melhoria da integração interna. Em um dos casos, observou-se a relação oposta, gerada por um baixo nível de integração interna. De qualquer forma, é o mesmo tipo de relação que está sendo evidenciado, em um sentido ou em outro. Assim, apesar das particularidades de cada empresa, foram encontradas evidências similares dessa relação direta entre os constructos investigados. Entende-se, portanto, que os objetivos do estudo de casos múltiplos tenham sido alcançados.

Em última análise, os estudos de caso demonstraram que a integração, a incerteza e a qualidade da informação são fatores de influência para o desempenho da função de PCP e para o desempenho geral da empresa. O modelo dinâmico para controle da produção proposto neste trabalho está alinhado a esta constatação, por vários motivos. Em primeiro lugar, ele é um modelo integrado, pois considera, de forma conjunta e interdependente, os recursos e fluxos necessários à produção de todo o conjunto produtos comercializado pela empresa analisada. Assim, as informações relativas às várias famílias de produtos são centralizadas e processadas

de forma integrada. Isso é importante pois, como a produção de cada família compartilha das mesmas instalações produtivas, as decisões relativas a uma determinada família afetam as demais. Ao considerar essas relações de interdependência, o modelo disponibiliza informações de melhor qualidade para a programação (de curto prazo) e o controle da produção. Em outras palavras, ele promove a melhoria da Qualidade da Informação disponível para a programação e controle. Por fim, os estudos de caso mostraram que tanto as incertezas externas ao sistema de produção, como as flutuações na demanda real, quanto as incertezas internas, como quebra de máquinas e indisponibilidade de material, são fatores relevantes ao desempenho do PCP. A característica principal de modelos dinâmicos como o desenvolvido é exatamente a capacidade de responder a essas incertezas, buscando tornar o sistema produtivo mais robusto a tais influências.

No capítulo 6 a seguir, são apresentados os detalhes do desenvolvimento e simulação do modelo dinâmico para controle da produção. Esse modelo foi baseado no corpo teórico apresentado no capítulo 3, mais especificamente, nos itens 3.4.4 e 3.4.5. Seu desenvolvimento seguiu a metodologia e as etapas de modelagem apresentadas no item 4.6, do capítulo 4.

Desenvolvimento e simulação do modelo dinâmico para controle da produção de múltiplas famílias de produtos

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento de um modelo dinâmico para controle da produção de múltiplas famílias de produtos. O modelo proposto foi desenvolvido com base na teoria de Modelagem de Sistemas Dinâmicos e na metodologia dos grafos de ligação, discutidas no capítulo 3. Assim, na modelagem, estabelece-se uma analogia entre os elementos de produção do chão de fábrica e os componentes ideais de sistemas elétricos e mecânicos, seguindo uma abordagem semelhante à proposta por Ferney (2000). Para que o modelo proposto pudesse representar a produção de múltiplas famílias de produtos, foi necessário considerar dados de *mix* de produção de cada família e acrescentar elementos não contidos no modelo do autor supracitado. Adicionalmente, também foram tecidas algumas considerações sobre as restrições e condições de contorno do modelo, para que fosse possível obter a solução deste no regime permanente. Esses aspectos serão apresentados e discutidos nos itens subsequentes, juntamente à descrição das etapas da modelagem.

Visando-se avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta a uma situação real, utilizou-se tal metodologia para modelar um sistema de produção de embalagens de uma empresa do interior de São Paulo. As características desse sistema serão apresentadas a seguir.

6.1 O sistema de produção de embalagens de ráfia

Originalmente, o termo ráfia designa a fibra de uma palmeira do gênero *Raphia*, presente na África, Ásia e América, a qual, devido à sua resistência, tem aplicações na confecção de tramas e amarraduras. A designação geral para a palavra, presente no dicionário, é a de uma espécie de palha, formada de filamentos (WEISZFLOG, 1998).

No contexto atual, a ráfia é um tecido de fibras de polipropileno, uma resina termoplástica derivada do petróleo. Assim, as indústrias fabricantes de ráfia pertencem ao

setor têxtil e também à terceira geração da cadeia produtiva do setor petroquímico. Este último grupo agrega as indústrias de transformação de matérias-primas derivadas do petróleo.

As embalagens de rafia podem ser utilizadas para acondicionar diversos produtos, como fertilizantes, rações, farináceos, sementes, cereais, açúcar, sal, produtos frigoríficos, peças metalúrgicas, compostos de PVC, produtos químicos, entre outros. A rafia também pode ser empregada na confecção de cortinas para galpões de suinocultura e avicultura, na composição de mantas térmicas revestidas de alumínio, na confecção de sacolas retornáveis e de grandes sacolas para transporte de cargas diversas. A Figura 6.1 mostra algumas embalagens de rafia.

Figura 6.1 – Embalagens de rafia.

As informações sobre o sistema de produção de embalagens de rafia foram obtidas a partir dos trabalhos de Minotti (2011) e Perez (2012). Para a realização desses trabalhos, por sua vez, realizou-se um esforço de coleta de dados *in loco*, por um período de 2 anos (do início de 2010 ao final de 2011). No total, 6 pessoas estavam envolvidas nessa atividade, sendo 2 alunos de mestrado, 2 engenheiros de produção recém-formados e 2 alunos de graduação. Com isso, obteve-se uma variedade e volume de dados significativos.

A empresa foco da modelagem trabalha com uma política de resposta à demanda do tipo *MTO* (Make To Order), ou seja, os produtos são fabricados sob encomenda. Assim, os principais fatores competitivos para este tipo de empresa são o atendimento da demanda do cliente no prazo determinado e com o nível de qualidade requerido. Além disso, em geral, tais empresas devem ser flexíveis para fabricar produtos com certo nível de personalização para seus clientes. Os sacos de rafia podem apresentar diferentes características de gramatura, resistência e acabamento, conforme pode ser observado na Figura 6.1. Para atender às necessidades de seus clientes, a empresa analisada fabrica nove grupos distintos ou famílias de produtos.

Existem diferentes critérios para a formação de famílias de produtos, os quais são estudados por áreas como Tecnologia de Grupo e Manufatura Celular. De acordo com Singh e Rajamani (1996), essa formação de grupos é baseada em atributos de projeto das peças ou atributos de processos de fabricação das mesmas. Os atributos de projeto incluem a geometria das peças (por exemplo, prismática ou rotacional); o tamanho; as tolerâncias ou qualidade superficial requeridas; o tipo de material e características da matéria-prima (por exemplo, barra forjada, fundida ou extrudada); etc. Como atributos de processo entendem-se basicamente as operações de produção das peças e sua sequência. Além disso, podem ser incluídos nesse segundo grupo critérios como tamanho de lote, tipos de ferramentas de usinagem utilizados, tempos de processamento, volume de produção, entre outros.

Hyer e Wemmerlöv (2002) apresentam ainda um sistema mais abrangente para a formação de famílias de produtos, baseado em nove dimensões:

1. tipo de produto: agrupar produtos de mesmo tipo ou função;
2. mercado: agrupar produtos vendidos em um determinado mercado geográfico;
3. clientes: agrupar os produtos vendidos a determinados clientes;
4. grau de contato com o cliente: agrupar os produtos de acordo com o grau de influência do consumidor no produto final, ou seja, produtos personalizados (projeto feito para o cliente), produtos fabricados contra pedido (MTO) ou produtos padronizados feitos para estoque (MTS);
5. faixa de volume: agrupar produtos com volumes de fabricação similares;
6. padrão de pedido: agrupar produtos com padrões de pedido semelhantes, isto é, pedidos grandes e frequentes ou pedidos menores e com frequência irregular;
7. base competitiva: agrupar produtos segundo suas prioridades competitivas, como, por exemplo, produtos que competem em custo, produtos que competem em velocidade, produtos que competem em *design* personalizado;
8. tipo de processo: agrupar produtos por similaridade de roteiros e processos de fabricação;
9. características dos produtos: agrupar produtos com as mesmas características físicas ou a mesma matéria-prima.

Um dos critérios mais comumente utilizados para a formação de famílias de produtos é a similaridade de roteiros e processos de fabricação. Este foi o critério adotado neste trabalho, uma vez que se deseja modelar as características e comportamento do sistema

produtivo em questão. Assim, no subitem seguinte, apresenta-se uma descrição detalhada dos processos produtivos da empresa de embalagens.

6.1.1 O processo produtivo

A empresa em questão foca-se na produção de embalagens de ráfia utilizadas especificamente para a embalagem de rações para animais, fertilizantes e açúcar, sendo também especializada na fabricação de mantas térmicas revestidas de alumínio. Tais produtos são obtidos a partir de 6 processos produtivos: extrusão, tecelagem, impressão, laminação, corte e costura, conforme mostrado na Figura 6.2. Além disso, há também uma operação de acabamento manual, em que um saco plástico, denominado *liner*, é inserido dentro do saco de ráfia, no final do processo produtivo. Na modelagem do sistema, as operações de corte e costura foram agrupadas, formando um único setor, uma vez que ambas as operações são realizadas em uma mesma máquina.

Figura 6.2 – Fluxograma simplificado da produção de embalagens de ráfia. Fonte: adaptado de Minotti (2011) e Perez (2012).

Conforme já mencionado, a matéria-prima principal é o polipropileno, uma resina muito resistente ao calor e à fadiga, o que possibilita sua dobra repetidas vezes sem se romper. Assim, o processo se inicia com a transformação do polipropileno em fitas. Para tanto, as matérias-primas básicas, polipropileno, antifibrilante e corante, são misturadas e depositadas em um funil coletor. A mistura que passa pelo coletor é despejada na rosca da extrusora, passando em seguida para o canhão, onde será homogeneizada. A rosca está localizada no início do canhão e tem sua base resfriada por uma bucha onde a temperatura ideal da água é de 30 °C. A dosagem de cada componente é determinada em função das características da fita que será produzida, em termos de massa, resistência, elasticidade e cor.

Segundo Minotti (2011), o canhão da extrusora pode ser dividido em 4 seções, nas quais são mantidas as temperaturas mostradas na Tabela 6.1. A mistura passa sequencialmente por cada uma dessas seções, com uma velocidade determinada de acordo com as especificações de cada fita.

Tabela 6.1 – Temperatura nas seções do canhão da extrusora.

Seções do canhão da extrusora	Temperatura (°C)
01	240
02	245
03	250
04	255

A extrusora apresenta ainda oito seções adicionais, numeradas de 05 a 12. Na seção 05 localiza-se o engate da rosca, no final do canhão. Nesta seção, a temperatura é mantida em 265 °C. Acoplado a esse engate há um filtro composto por três telas de aço de diferentes espessuras, que realizam a filtragem da matéria-prima e insumos já homogeneizados. Essa parte da extrusora é denominada seção 06.

Figura 6.3 – Seções 01 a 07 da extrusora. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).

Em seguida, na seção 07, a massa é distribuída para uma matriz, na qual é moldada e transformada em um filme. Há 5 seções distintas na matriz, numeradas de 08 a 12. A temperatura nas seções da extremidade (seções 08 e 12) é mantida 5 °C acima da temperatura nas seções intermediárias, que é de 260 °C. O filme é então puxado da matriz, mergulhado em uma caixa de resfriamento preenchida com água, e encaminhado para o corte em um rolo de lâminas. O equipamento que realiza esta etapa do processo é denominado torre, e é mostrado na Figura 6.4. A distância entre as múltiplas lâminas de corte é regulada por calços, de acordo com o tipo de fita (fio) a ser produzido.

Figura 6.4 – Matriz e torre. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).

No processo de tecelagem de sacos de rfia so utilizados trs tipos de fios: fio de urdume, fio de trama e fio de costura. Urdume ou urdidura o conjunto de fios dispostos longitudinalmente atravs dos quais a trama tecida. A trama, por sua vez, formada pelo fio que tecido para frente e para trs atravs do urdume. O fio de costura utilizado para unir as extremidades do tecido de rfia e formar os sacos.

Na Tabela 6.2 so apresentadas as diferentes larguras dos fios produzidos na empresa analisada, bem como a quantidade de fios de cada tipo obtidos a partir do filme de polipropileno. Estes dados foram extrados do trabalho de Minotti (2011).

Tabela 6.2 – Largura dos diferentes tipos de fios e quantidade produzida a partir do filme de polipropileno.

Fio	Largura	Quantidade
Urdume	2,8 mm	125 fitas
Trama	3,6 mm	97 fitas
Costura	4,0 mm	90 fios

Aps o corte do filme no rolo de lminas, os fios resultantes passam por cilindros com diferentes velocidades de rotao, para serem alongados e atingirem as especificaes determinadas de dimenso e resistncia. Esse processo feito em trs etapas, ou seja, os fios sofrem trs estiros consecutivos. Para se obter o alongamento adequado, as velocidades mdias relativas do conjunto de cilindros de cada uma das etapas seguem uma proporo determinada. Estas velocidades tambm esto relacionadas velocidade da torre, ou seja, velocidade do filme que, aps ser cortado, alimenta os cilindros de estiramento. Assim, segundo Minotti (2011), a velocidade da torre deve ser 4 m/min menor do que a velocidade do primeiro estiro, e a velocidade mdia dos cilindros no segundo estiro deve ser 5,4 vezes maior

do que a velocidade no primeiro estiro. Por fim, no terceiro estiro, a velocidade deve ser 5% menor do que a velocidade do segundo estiro.

O primeiro estiro é realizado com 3 cilindros, o segundo com 7 cilindros e o terceiro, novamente com 3 cilindros, como se pode observar na Figura 6.5. Entre o primeiro e o segundo estiros, os fios passam por uma estufa, cuja temperatura é regulada de acordo com as velocidades de trabalho do sistema (cilindros e torre).

Figura 6.5 – Cilindros do primeiro, segundo e terceiro estiros. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).

Depois de estirados, os fios passam por um cilindro resfriado com água gelada e são direcionados pelos operadores até as bobinadeiras, onde são enrolados em torno de rocas, também denominadas tubetes. Essa operação é mostrada na Figura 6.6.

Figura 6.6 – Bobinadeiras. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).

A próxima etapa do processo produtivo é a tecelagem. Nos teares são utilizadas rocas de urdume e rocas de trama produzidas no processo de extrusão. Há procedimentos estabelecidos para o cálculo da quantidade de rocas de cada tipo, dependendo das dimensões e

tipo de tecido a ser fabricado. O tempo de *setup* para passar as fitas nos teares e iniciar a tecelagem é em torno de 4 horas, quando o *setup* é realizado por um único operador. Para a obtenção de sacos de rafia, os teares produzem tecidos contínuos e sem cortes nas laterais, formando um “tubo” de tecido dobrado. As larguras desse tecido variam de 380 mm a 800 mm. Para se produzir telas de rafia (ao invés de sacos), o tecido é cortado em um dos lados com uma resistência, dando origem a telas com largura de 760 mm a 1600 mm. Ambos os tecidos para tela ou embalagem de rafia são enrolados em bobinas que são estocadas ou despachadas para o setor de acabamento. Destas bobinas também são retiradas amostras para controle de qualidade da gramatura e especificações desejadas. Os tubetes vazios gerados após a utilização dos fios retornam para as bobinadeiras do setor de extrusão para serem reutilizados. A Figura 6.7 mostra os teares da empresa estudada.

Figura 6.7 – Duas vistas distintas dos teares da empresa. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).

Os parâmetros e matérias-primas do processo de tecelagem variam de acordo com a família de produtos fabricada. Considerando a funcionalidade ou tipo de produto final obtido, pode-se dividir a produção da empresa estudada em seis famílias distintas, conforme apresentado por Minotti (2011):

- 1. Família L** – embalagens de rafia laminadas;
- 2. Família R** – embalagens de rafia para ração (convencional);
- 3. Família A** – embalagens de rafia para açúcar (pesado convencional);
- 4. Família T** – Telas (tecido convencional – a bobina de embalagens de rafia é cortada ao meio – exemplo: uma bobina de tecido tubular com 50 cm de diâmetro gera duas mantas de 50 cm de largura);

5. Família S – tela para sacolas retornáveis de supermercado;

6. Família Z – Zerust (cliente especial – embalagens de ráfia com 55 gramas por metro quadrado no tear devendo atingir 75 gramas por metro quadrado na laminação).

As fitas (ou fios) de trama e urdume empregados na tecelagem de cada uma dessas famílias tem características distintas em relação a cor, título (*denier*) e largura. O título é uma medida da massa do fio ou fita em relação a seu comprimento. A unidade de medida mais comumente utilizada para avaliar esta grandeza é o *denier*, valor que representa a massa em gramas de 9.000 metros de fio.

Em termos de processo, o principal parâmetro que varia de acordo com a família, na tecelagem, é o batimento. Tal parâmetro representa o número de fitas de trama a cada 10 cm, ou seja, indica se a trama é mais aberta ou fechada. Assim, batimentos diferentes implicam mudanças de *setup* do tear. Além disso, a velocidade de operação do tear depende do batimento do tecido sendo produzido.

Após a operação de tecelagem, seguem-se as operações de acabamento, conforme já apresentado na Figura 6.2.

Na laminação, um filme de polipropileno e polietileno é depositado sobre o tecido de ráfia, para impedir que o conteúdo embalado (como açúcar refinado, por exemplo) passe pelos vãos da malha. A velocidade de operação da laminadora varia em função das especificações dos tecidos, como peso e largura, sendo em média de 100 m/min. Amostras de tecido laminado são retiradas para controle de qualidade, onde se avalia sua gramatura. Se o tecido laminado estiver de acordo com as especificações, ele segue para a impressão ou para a seção de corte e costura, caso não haja impressões a serem feitas. Nem todas as famílias de produtos fabricadas pela empresa passam pelo processo de laminação. Nesse caso, após a tecelagem, essas famílias seguem diretamente para as outras operações subsequentes de acabamento.

Após a tecelagem ou laminação, o tecido de ráfia de algumas famílias passa pelo processo de impressão, mostrado na Figura 6.9. Segundo Minotti (2011), a empresa analisada possui duas impressoras, sendo que uma delas realiza impressões com até 4 cores e a outra, mais nova, realiza impressões com até 6 cores. As impressoras podem imprimir na frente e no verso das bobinas, em uma única passada. Assim, cada impressora pode imprimir simultaneamente 2 faces de um mesmo tecido ou de tecidos diferentes (ou seja, frente e verso, 2 frentes ou 2 versos). A velocidade das impressoras varia em função do número de cores empregadas, do lado que está sendo impresso e do tipo de tecido (ou seja, laminado ou não). De acordo com Minotti (2011), a velocidade média das impressoras é de 70 m/min.

Figura 6.8 – Laminadora. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).

Figura 6.9 – Impressoras. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).

A próxima etapa do acabamento consiste nas operações de corte e costura. Essas operações podem ocorrer de forma automatizada, em máquinas que executam ambas as funções (Figura 6.10), ou de forma manual. Neste último caso, há uma máquina somente para corte e outra somente para costura. As máquinas de corte e costura possuem diferentes taxas de produção, sendo que uma delas, mais antiga que as outras, requer maior tempo e frequência de manutenção. Essas diferenças serão consideradas no modelo dinâmico proposto para representar o sistema de produção. Uma particularidade desse processo de corte e costura é que, dependendo do tipo de material, pode-se executar o corte a quente ou a frio.

Uma vez realizados o corte e a costura dos sacos, estes passam por um controle de qualidade onde são classificados em embalagens de primeira linha ou embalagens de segunda linha. De acordo com o tipo de embalagem sendo produzida, as embalagens de primeira linha podem receber ainda um envelope plástico interno, denominado *liner*. Esta operação é realizada manualmente. No modelo desenvolvido, esta atividade foi denominada de “montagem”.

Figura 6.10 – Máquina de corte e costura. Fonte: Minotti (2011) e Perez (2012).

Na tabela a seguir apresentam-se as quantidades de máquinas que a empresa possui para executar os processos de produção descritos.

Tabela 6.3 – Máquinas utilizadas na produção de embalagens de rafia.

Processo	Quantidade de máquinas
Extrusão	1
Tecelagem	12
Laminação	1
Impressão	2
Corte e Costura	4
Corte (manual)	1
Costura (manual)	5

6.1.2 Agrupamento em famílias segundo roteiros de processo

No item anterior apresentou-se uma classificação das famílias de produtos fabricadas pela empresa em função do tipo ou funcionalidade do produto final. Conforme apresentado no início do tópico 6.1, podem ser utilizados diferentes critérios para a formação de famílias de produtos. Para se realizar a modelagem dinâmica do sistema de produção estudado, faz-se necessário formar famílias em função dos roteiros de processo. No Quadro 6.1 são apresentadas as famílias de produtos formadas em função desse critério.

Quadro 6.1 – Classificação dos produtos em famílias segundo seu roteiro de processo.

Família	Roteiro de processo							
	extrusão	tecелagem	laminação	bobina- mento	impressão	corde e costura	montagem (<i>liner</i>)	corde e costura manual
1	x	x	x	x				
2	x	x	x		x	x		
3	x	x	x			x		
4	x	x	x					x
5	x	x	x					
6	x	x		x				
7	x	x			x	x	x	
8	x	x			x	x		
9	x	x				x		

Segundo o critério adotado, os produtos de uma dada família podem variar em termos de dimensões, cores, características de fio, gramatura, abertura da trama, entre outros. Entretanto, todos os produtos da família seguem uma mesma sequência de operações. Assim, observa-se que os produtos da família 1 consistem em bobinas de tecido de rafia laminado, sem nenhuma impressão. No caso da família 2, são produzidos sacos de rafia individuais, laminados e com impressão em suas faces. Entretanto, esses sacos apresentam características individuais diferentes. Por exemplo, um dos produtos da família 2 consiste em um saco com dimensões 60 cm x 100 cm, branco, com gramatura 70 e impresso com 2 cores na frente e 2 no verso. Outro produto dessa mesma família possui dimensões 60 cm x 85 cm, é branco, com gramatura 70 e recebe uma impressão com 5 cores distintas na frente e 1 cor no verso, por exemplo. Outro exemplo interessante é o da família 7, na qual os sacos de rafia, ao invés de serem laminados para impedir o escape de conteúdo, recebem um saco plástico interno (denominado *liner*) para exercer a mesma função.

Além dos dados de roteiro de processo, outros parâmetros essenciais para a modelagem são os dados de demanda de cada família de produtos, ou seja, o histórico de vendas de cada família, em um determinado período de tempo. Estes dados foram extraídos do trabalho de Minotti (2011).

No caso da empresa estudada, a demanda por embalagens de polipropileno apresenta significativa sazonalidade, uma vez que os principais clientes são produtores agrícolas. Assim, ocorre um aumento acentuado da demanda no período da colheita ou processamento de determinados produtos agrícolas. Como referência, foram utilizados no modelo os dados de demanda do mês de junho de 2011, uma vez que este é o mês em que ocorre a mais alta demanda do ano. Com isso, buscou-se analisar o comportamento do sistema no pior caso, quando a carga de trabalho é mais elevada.

Os dados absolutos de demanda mensal foram utilizados para se estabelecer os valores de saída do sistema, ou seja, os valores desejados de fluxo de material na saída. Esta demanda mensal é originalmente medida em unidades (número de sacos) ou em metros quadrados. Conforme as matérias-primas são submetidas às diversas etapas de processamento, torna-se necessário medir o fluxo de material com diferentes unidades, de acordo com o produto intermediário que está sendo formado. A capacidade de processamento da extrusora, por exemplo, é comumente medida em quilogramas por unidade de tempo. O fluxo de material na saída dessa máquina, por outro lado, é medido em unidades de comprimento linear por tempo, já que nessa operação são geradas fitas de polipropileno. As saídas da operação de tecelagem, por sua vez, podem ser medidas em unidades de área por tempo.

Para que seja possível comparar as capacidades ou disponibilidades das diferentes máquinas envolvidas no processo de produção, é necessário representar todos os valores em uma unidade comum. Portanto, devem-se estabelecer as taxas de conversão de unidades referentes a cada operação. Este levantamento foi realizado por Minotti (2011), que apresenta os valores de disponibilidade real de todas as máquinas em metros por dia. No caso da operação de extrusão, por exemplo, sabe-se que um quilograma de material equivale a 5,79 metros de fio.

As embalagens fabricadas pela empresa têm dimensões diversas. Dessa forma, duas unidades de produto podem utilizar quantidades de material muito diferentes, dependendo das especificações. Para evitar essa variação e obter respostas mais realistas, optou-se por trabalhar, nas simulações, com todos os dados de demanda em metros quadrados por dia. Entretanto, calculou-se a solução do modelo no regime permanente para dois casos:

utilizando-se os dados de metros quadrados por dia e em metros (lineares) por dia. O segundo caso foi calculado para que fosse possível comparar a solução obtida com os dados reais de capacidade das máquinas apresentados por Minotti (2011).

Os dados históricos de demanda não foram utilizados apenas para se estipular as saídas desejadas, mas também para se definir o *mix* de produção da empresa, isto é, as razões entre o volume a ser produzido de cada família em relação ao volume total de produção. Estes parâmetros são necessários para se definir a porcentagem do fluxo de material que deve seguir cada roteiro de produção, ou seja, a quantidade relativa de fluxo que deve ir para cada ramo do sistema, a partir de um dado ponto de dispersão. Os dados da demanda diária das famílias e do *mix* de produção são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Dados de demanda e *mix*. Fonte: adaptado de Minotti (2011).

Família	Demanda [m/dia]	Demanda [m ² /dia]	Mix (para demanda em m/dia)	Mix (para demanda em m ² /dia)
1	20.350	5.286	36,75%	11,61%
2	10.239	12.287	18,49%	26,98%
3	245	294	0,44%	0,65%
4	1.720	1.452	3,11%	3,19%
5	220	265	0,40%	0,58%
6	1.935	967	3,49%	2,12%
7	7.540	9.048	13,62%	19,86%
8	11.061	13.273	19,98%	29,14%
9	2.058	2.676	3,72%	5,88%
Totais	55.368	45.548	100,00%	100,00%

Pode-se observar que as demandas em metros por dia e em metros quadrados por dia não são proporcionais entre si. Assim, o cálculo do *mix*, em cada caso, resulta em diferentes porcentagens. A taxa de conversão entre as duas unidades é diferente para cada família devido a vários fatores, a saber: os sacos possuem larguras diferentes; em algumas famílias, são produzidas telas ao invés de sacos; outros parâmetros, como o batimento (que define a densidade da trama), influenciam na taxa de conversão.

6.2 Modelagem

6.2.1 *Modelo físico do processo de produção das nove famílias de produtos*

Com base no entendimento das etapas do processo produtivo, nos roteiros de processo e nos dados de maquinário da empresa, elaborou-se um modelo físico para representação do sistema de produção de embalagens de rafia, apresentado na Figura 6.11. Nesse modelo, as máquinas são representadas por círculos, sendo precedidas por estoques intermediários, i.e., pontos de armazenagem de estoque em processo. As variáveis U_i correspondem às frequências de processamento das máquinas, e as linhas contínuas representam as diversas possibilidades de fluxo de material no sistema, seguindo os roteiros de processo apresentados no Quadro 6.1.

Considerou-se, para a modelagem, a existência de onze máquinas distintas. Optou-se por não representar a operação de bobinamento final do tecido de rafia no modelo, uma vez que é uma operação bastante simples e não se constitui um gargalo produtivo, ou seja, não influencia a dinâmica das demais operações. Isso evita o aumento desnecessário da complexidade do sistema.

Conforme apresentado na Tabela 6.3 (p. 213), as seções de tecelagem, impressão e corte e costura automatizados possuem máquinas operando em paralelo. No caso da tecelagem, todos os teares são idênticos. Assim, optou-se por representá-los como uma única máquina (máquina 2), com capacidade de processamento equivalente à soma das capacidades individuais de cada tear. Entende-se que esta escolha não implicará uma perda de informação ou acurácia na representação da dinâmica do sistema. Pode-se simular, por exemplo, a quebra de um dos teares impondo-se um decréscimo de 1/12 na capacidade total da máquina 2. A vantagem dessa representação é a redução da complexidade em termos de programação computacional, uma vez que se reduz a quantidade de código necessária. Além disso, esta medida também facilita a interpretação gráfica dos resultados da simulação, pois a quantidade de curvas geradas é reduzida à metade (caso cada tear fosse representado individualmente no sistema, seriam 22 máquinas no total). Por outro lado, as impressoras e as máquinas de corte e costura foram representadas individualmente, uma vez que há diferenças significativas em suas características, em especial, no que tange à produtividade das mesmas. Nesse caso, julgou-se necessário representar tais diferenças no estudo da dinâmica do sistema.

Figura 6.11 – Modelo físico do sistema de produção de embalagens de rafia.

A partir do modelo físico, pode-se observar que o fluxo de materiais no sistema é relativamente complexo. Para representar simultaneamente todas as possibilidades, foram utilizadas uma junção divergente e quatro junções convergentes-divergentes. Três dessas junções estão associadas diretamente aos roteiros de processo de cada família (denominadas junção 1, 2 e 3 na Figura 6.11). As outras duas junções restantes estabelecem a divisão de fluxo nas máquinas que operam em paralelo, ou seja, nas impressoras e nas máquinas de corte e costura.

As porcentagens de fluxo nas junções associadas aos roteiros de processo foram derivadas do *mix* de produção da empresa, apresentado na Tabela 6.4. Entretanto, foi necessário normalizar essas porcentagens em relação ao total de fluxo envolvido em cada junção. Como exemplo, apresenta-se a seguir o cálculo das porcentagens da junção 2 mostrada na Figura 6.11. Para auxiliar esse cálculo, utilizou-se o Quadro 6.2 mostrado a seguir.

Como se pode observar, o roteiro de produção de duas famílias de produtos, a família 1 e a família 5, termina após a operação de laminação. Cada uma dessas famílias representa, respectivamente, 11,61% e 0,58% do *mix* total de produtos fabricados (Quadro 6.5). Os produtos da família 4, depois de laminados, vão para a seção de corte e costura manual. Eles representam 3,19% do total. O quarto ramo da junção 2 corresponde ao fluxo de produtos que serão impressos, pertencentes às famílias 2, 7 e 8. A soma das porcentagens de *mix* dessas respectivas famílias, mostradas no Quadro 6.5, resulta em 75,98%. Por fim, o último ramo da junção representa o fluxo de produtos da família 3, os quais não passam pela operação de impressão, sendo diretamente encaminhados às máquinas de corte e costura.

Quadro 6.2 – Dados para cálculo das porcentagens de fluxo na junção 2.

Família	<i>mix</i>	laminação	Roteiro de processo				
			bobina- mento	impressão	corte e costura	montagem (<i>liner</i>)	corte e cost.manual
1	11,61%	x	x				
2	26,98%	x		x	x		
3	0,65%	x			x		
4	3,19%	x					x
5	0,58%	x					
6	2,12%		x				
7	19,86%			x	x	x	
8	29,14%			x	x		
9	5,88%				x		
Totais	100,00%						

Na Figura 6.11 pode-se observar que nem todo o fluxo de material do sistema passa pela junção 2. Os produtos da família 2 já saíram do sistema logo após a tecelagem (sendo posteriormente encaminhados para a operação de bobinamento). Além disso, os produtos da família 9 também não passam por essa junção, uma vez que pulam as operações de laminação e impressão, reintegrado o fluxo principal novamente para serem submetidos à operação de corte e costura automatizados. Assim, a porcentagem total de fluxo na junção 2 é de 92,01%. Conforme mencionado, para manter a consistência do modelo, foi necessário normalizar as porcentagens de fluxo em cada junção. Caso isso não fosse feito, estar-se-ia assumindo a ocorrência de perdas de fluxo nas junções. A Tabela 6.5 a seguir apresenta os resultados dos cálculos das porcentagens de fluxo nas junções, com e sem normalização. No modelo da Figura 6.11, são apresentadas as porcentagens já normalizadas. No caso da junção 1, não é preciso normalizar, já que todo o fluxo passa por essa junção.

Tabela 6.5 – Normalização das porcentagens de fluxo nas junções (pesos), obtidas a partir do *mix* de produtos da empresa.

	Junção 1 (2-3)	Junção 2 (3-4-5-6)		Junção 3 (final)	
	<i>mix</i>	<i>mix</i>	<i>mix</i> normalizado	<i>mix</i>	<i>mix</i> normalizado
Pesos	0,4300	0,0319	0,0347	0,1986	0,2407
	0,4900	0,1161	0,1262	0,2698	0,3270
	0,0588	0,0058	0,0063	0,0065	0,0079
	0,0212	0,7598	0,8258	0,2914	0,3532
	-	0,0065	0,0071	0,0588	0,0713
Soma	1,0000	0,9201	1,0000	0,8251	1,0000

A definição das porcentagens de fluxo distribuído a cada uma das máquinas em paralelo no sistema foi feita com base nas diferenças de produtividade entre essas máquinas. Minotti (2011) levantou, a partir de apontamentos, o volume de produção das impressoras e máquinas de corte e costura no mês de junho. As porcentagens de distribuição de fluxo foram calculadas com base nesses dados, apresentados na Tabela 6.6. Cada impressora processou volumes diferentes de produtos principalmente devido ao *mix* de produção. Os produtos vendidos requerem impressões com diferentes quantidades de cores. Conforme já mencionado, uma das impressoras, denominada Thunder Comat, trabalha com no máximo 4 cores e a outra, Padane, trabalha com até 6 cores. No caso das máquinas de corte e costura, as diferenças de produtividade se devem a diferenças de marca, modelo e principalmente idade das máquinas. A máquina Supra, por exemplo, é antiga e frequentemente apresenta de

problemas técnicos que exigem manutenção. Este é o principal motivo pelo qual sua produtividade é significativamente inferior em relação às demais máquinas.

Tabela 6.6 – Dados de produção das máquinas em paralelo e porcentagens de divisão de fluxo.

	Impressoras		Corte e costura			
	Padane (máq. 5) [m/tempo]	Thunder (máq. 4) [m/tempo]	Chinesa (máq.7) [un/tempo]	Supra (máq. 8) [un/tempo]	Taubaté (máq. 9) [un/tempo]	Vitra (máq. 10) [un/tempo]
Produção própria	194.377	394.501				
Produção para terceiros	80.000	51.800				
Produção total mensal	274.377	446.301	241.373	119.918	221.601	275.064
Produção diária	13.065,6	21.252,4	11.494,0	5.710,4	10.552,4	13.098,3
Porcentagem de fluxo	38,07%	61,93%	28,13%	13,98%	25,83%	32,06%

6.2.2 Grafos de Ligação do sistema

A conversão do modelo físico do sistema de produção de embalagens de rafia em um diagrama de grafos de ligação foi realizada utilizando-se os elementos de sistema de manufatura discutidos no capítulo 3, item 3.4.4.2. Assim, conforme proposto por Ferney (2000), a estação composta por uma máquina e um estoque precedente foi representada pela junção de um capacitor, uma fonte de esforço e um resistor, ou seja, elementos puros utilizados na metodologia de grafos de ligação. Já a parte divergente das junções foi representada por elementos transformadores com módulo correspondente à porcentagem de fluxo passante no ramo em questão. Os Grafos de Ligação que representam o sistema são apresentados na Figura 6.12.

a)

Figura 6.12 – Grafos de Ligação do sistema de embalagens de rafia: a) parte 1.

b)

Figura 6.12 – Grafos de ligação do sistema de embalagens de rafia: b) parte 2.

Figura 6.12 – Grafos de Ligação do sistema de embalagens de ráfia: c) parte 3.

6.2.3 Equacionamento do modelo

As equações para os Grafos de Ligação propostos foram obtidas a partir das equações das entidades definidas para o sistema de manufatura e apresentadas no capítulo 3, ou seja, fontes, estações, junções e tanques. Essas equações associadas a cada entidade de manufatura, por sua vez, derivam das equações constitutivas dos elementos puros, fontes e junções que fazem parte da metodologia de modelagem por grafos de ligação. A dedução detalhada dessas equações é apresentada no capítulo 3.

As principais equações do capítulo 3 que foram utilizadas para representar o modelo proposto são retomadas a seguir. A equação 3.58 define o fluxo de saída f_{si} de uma dada estação i , sendo U_i a frequência de operação da máquina i . A equação 3.62, por sua vez, é baseada na relação fundamental entre a variável de fluxo (f) e a variável de deslocamento (q) na metodologia de grafos de ligação. Segundo essa relação, a variável de deslocamento é obtida a partir da integral da variável de fluxo. Em termos diferenciais, tem-se que a taxa de material acumulado no sistema é equivalente à diferença entre o fluxo de entrada e o fluxo de saída, conforme mostrado na equação 3.62. Esta é a equação fundamental de estado do sistema. As demais equações serão manipuladas e inseridas nessa equação de estado, para que a taxa de material acumulado nos estoques intermediários seja escrita somente em função das frequências U_i de operação das máquinas e da quantidade de material em estoque q_i . A equação 3.64 se refere à equação de uma junção convergente de esforço constante, na qual há conservação de fluxos e na qual o fluxo que chega ao nó converge para uma única saída. Por fim, a equação 3.64 está associada aos elementos transformadores, usados na modelagem para representar a dispersão do fluxo que chega a um dado nó do sistema de manufatura. Os pesos w_j presentes nessa equação foram calculados a partir dos dados de *mix* de produção e produtividade das máquinas, segundo os procedimentos apresentados na seção anterior.

$$f_{si} = U_i \min(1, q_i) \quad (3.58)$$

$$q'_i = f_{ei} - U_i \min(1, q_i) \quad (3.62)$$

$$f_{si} = \sum_{k=1}^m f_{ek} \quad (3.63)$$

$$f_{sj} = w_j f_{ei}, \text{ com } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \text{ e } w_j > 0 \quad (3.64)$$

A seguir apresenta-se o conjunto de equações referentes ao modelo de grafos de ligação proposto. Os fluxos de produção são dados em m^2/dia . Conforme mencionado, para se modificar a unidade de medida, é necessário alterar os valores dos pesos presentes nas equações, uma vez que as porcentagens de *mix* de produção são diferentes para cada unidade. As equações foram organizadas de acordo com a operação ou junção à qual se referem.

Extrusão:

$$f_{01} = U_{01} 1m^2/dia \text{ (fonte primária de fluxo)} \quad (6.1)$$

$$f_{e1} = f_{01} \quad (6.2)$$

$$f_{s1} = U_1 \min(1, q_1) \quad (6.3)$$

$$q'_1 = f_{e1} - U_1 \min(1, q_1) = U_{01} - U_1 \min(1, q_1) \quad (6.4)$$

Tecelagem:

$$f_{e2} = f_{s1} = U_1 \min(1, q_1) \quad (6.5)$$

$$f_{s2} = U_2 \min(1, q_2) \quad (6.6)$$

$$q'_2 = U_1 \min(1, q_1) - U_2 \min(1, q_2) \quad (6.7)$$

Junção 2-3 – divergente (transformador):

$$f_{e3} = 0,4301 f_{s2} \quad (6.8)$$

$$f_{e245} = 0,4900 f_{s2} \quad (6.9)$$

$$f_{ec1} = 0,0588 f_{s2} \quad (6.10)$$

Equação de saída da família 6 (adicional):

$$f_{sf6} = 0,0212 f_{s2} = 0,0212 U_2 \min(1, q_2) \quad (6.11)$$

Laminação:

$$f_{s3} = U_3 \min(1, q_3) \quad (6.12)$$

$$q'_3 = 0,4301 f_{s2} - U_3 \min(1, q_3) = 0,4301 U_2 \min(1, q_2) - U_3 \min(1, q_3) \quad (6.13)$$

Junção 3-4-5 – convergente-divergente

- parte convergente:

$$f_{sc3} = f_{s3} + f_{e245} = U_3 \min(1, q_3) + 0,4900 U_2 \min(1, q_2) \quad (6.14)$$

- parte divergente:

$$f_{e6} = 0,0347f_{sc3} = 0,0347U_3\min(1, q_3) + 0,0170U_2\min(1, q_2) \quad (6.15)$$

$$f_{sf1} = 0,1262f_{sc3} = 0,1262U_3\min(1, q_3) + 0,0618U_2\min(1, q_2) \quad (6.16)$$

$$f_{sf5} = 0,0063f_{sc3} = 0,0063U_3\min(1, q_3) + 0,0031U_2\min(1, q_2) \quad (6.17)$$

$$f_{345} = 0,8258f_{sc3} = 0,8258U_3\min(1, q_3) + 0,4042U_2\min(1, q_2) \quad (6.18)$$

$$f_{ec2} = 0,0071f_{sc3} = 0,0071U_3\min(1, q_3) - 0,00348U_2\min(1, q_2) \quad (6.19)$$

$$f_{s6} = f_{sf4} = U_6\min(1, q_6) \quad (6.20)$$

$$q'_6 = f_{e6} - f_{s6} = 0,0347U_3\min(1, q_3) - 0,0170U_2\min(1, q_2) - U_6\min(1, q_6) \quad (6.21)$$

Equações de saída das famílias 1, 4 e 5 (adicionais):

$$f_{sf4} = U_6\min(1, q_6) \quad (6.22)$$

$$f_{sf1} = 0,1262U_3\min(1, q_3) + 0,0618U_2\min(1, q_2) \quad (6.23)$$

$$f_{sf5} = 0,0063U_3\min(1, q_3) + 0,0031U_2\min(1, q_2) \quad (6.24)$$

Impressão:

A divisão do fluxo entre as duas impressoras foi determinada com base na proporção de volume de produção processado por elas, conforme apresentado na Tabela 6.6 (p.221).

$$f_{e4} = 0,6198f_{345} \quad (6.25)$$

$$f_{e5} = 0,3802f_{345} \quad (6.26)$$

$$f_{s4} = U_4\min(1, q_4) \quad (6.27)$$

$$f_{s5} = U_5\min(1, q_5) \quad (6.28)$$

$$q'_4 = 0,6198[0,8258U_3\min(1, q_3) - 0,4046U_2\min(1, q_2)] - U_4\min(1, q_4) = 0,2507U_2\min(1, q_2) + 0,5118U_3\min(1, q_3) - U_4\min(1, q_4) \quad (6.29)$$

$$q'_5 = 0,3802[0,8258U_3\min(1, q_3) - 0,4046U_2\min(1, q_2)] - U_5\min(1, q_5) = 0,1538U_2\min(1, q_2) + 0,3140U_3\min(1, q_3) - U_5\min(1, q_5) \quad (6.30)$$

Junção 5-10 – convergente-divergente

- parte convergente:

$$f_{sc} = f_{s4} + f_{s5} + f_{ec1} + f_{ec2} \quad (6.31)$$

- parte divergente:

Conforme apresentado na Tabela 6.6 (p.221), a divisão do fluxo entre as máquinas de corte e costura foi determinada com base nas relações de produtividade entre tais máquinas.

$$f_{e7} = 0,2811f_{sc} = 0,2811U_4\min(1, q_4) + 0,2811U_5\min(1, q_5) + 0,0175U_2\min(1, q_2) + 0,00200U_3\min(1, q_3) \quad (6.32)$$

$$f_{e8} = 0,1399f_{sc} = 0,1399U_4\min(1, q_4) + 0,1399U_5\min(1, q_5) + 0,00871U_2\min(1, q_2) + 0,00099U_3\min(1, q_3) \quad (6.33)$$

$$f_{e9} = 0,2588f_{sc} = 0,2588U_4\min(1, q_4) + 0,2588U_5\min(1, q_5) + 0,0161U_2\min(1, q_2) + 0,00183U_3\min(1, q_3) \quad (6.34)$$

$$f_{e10} = 0,3204f_{sc} = 0,3204U_4\min(1, q_4) + 0,3204U_5\min(1, q_5) + 0,0200U_2\min(1, q_2) + 0,00228U_3\min(1, q_3) \quad (6.35)$$

$$f_{s7} = U_7\min(1, q_7) \quad (6.36)$$

$$f_{s8} = U_8\min(1, q_8) \quad (6.37)$$

$$f_{s9} = U_9\min(1, q_9) \quad (6.38)$$

$$f_{s10} = U_{10}\min(1, q_{10}) \quad (6.39)$$

$$q'_7 = 0,0175U_2\min(1, q_2) + 0,00200U_3\min(1, q_3) + 0,2811U_4\min(1, q_4) + 0,2811U_5\min(1, q_5) - U_7\min(1, q_7) \quad (6.40)$$

$$q'_8 = 0,00871U_2\min(1, q_2) + 0,00099U_3\min(1, q_3) + 0,1399U_4\min(1, q_4) + 0,1399U_5\min(1, q_5) - U_8\min(1, q_8) \quad (6.41)$$

$$q'_9 = 0,0161U_2\min(1, q_2) + 0,00183U_3\min(1, q_3) + 0,2588U_4\min(1, q_4) + 0,2588U_5\min(1, q_5) - U_9\min(1, q_9) \quad (6.42)$$

$$q'_{10} = 0,0200U_2\min(1, q_2) + 0,00228U_3\min(1, q_3) + 0,3204U_4\min(1, q_4) + 0,3204U_5\min(1, q_5) - U_{10}\min(1, q_{10}) \quad (6.43)$$

Junção final – convergente-divergente

- parte convergente:

$$f_{sf} = f_{s7} + f_{s8} + f_{s9} + f_{s10} \quad (6.44)$$

- parte divergente:

$$f_{e11} = 0,2407f_{sf} = 0,2407[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] \quad (6.45)$$

Equações de saída das famílias 2, 3, 8 e 9 (adicionais):

$$f_{sf2} = 0,3270f_{sf} = 0,3270[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] \quad (6.46)$$

$$f_{sf3} = 0,0079f_{sf} = 0,0079[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] \quad (6.47)$$

$$f_{sf8} = 0,3532f_{sf} = 0,3532[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] \quad (6.48)$$

$$f_{sf9} = 0,0713f_{sf} = 0,0713[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] \quad (6.49)$$

Montagem (liner):

$$f_{s11} = U_{11}\min(1, q_{11}) \quad (6.50)$$

$$q'_{11} = 0,2407[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] - U_{11}\min(1, q_{11}) \quad (6.51)$$

Equação de saída da família 7 (adicional):

$$f_{sf7} = U_{11}\min(1, q_{11}) \quad (6.52)$$

A manipulação algébrica das equações 6.1 a 6.52 resulta no sistema de equações de estado do sistema, apresentado a seguir:

$$\begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ q'_3 \\ q'_4 \\ q'_5 \\ q'_6 \\ q'_7 \\ q'_8 \\ q'_9 \\ q'_{10} \\ q'_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4300 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2508 & 0,5118 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1538 & 0,3140 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0170 & 0,0347 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0175 & 0,0020 & 0,2811 & 0,2811 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0087 & 0,0010 & 0,1399 & 0,1399 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0161 & 0,0018 & 0,2588 & 0,2588 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0200 & 0,0023 & 0,3204 & 0,3204 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2407 & 0,2407 & 0,2407 & 0,2407 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1\min(1, q_1) \\ U_2\min(1, q_2) \\ U_3\min(1, q_3) \\ U_4\min(1, q_4) \\ U_5\min(1, q_5) \\ U_6\min(1, q_6) \\ U_7\min(1, q_7) \\ U_8\min(1, q_8) \\ U_9\min(1, q_9) \\ U_{10}\min(1, q_{10}) \\ U_{11}\min(1, q_{11}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{01} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.53)$$

6.2.4 Obtenção da resposta do sistema em regime permanente

Conforme discutido no capítulo 3, a expressão $\min(1, q_i)$ é utilizada para realizar o acoplamento, no regime transiente, entre a operação da máquina e a quantidade de material armazenada no estoque antecedente. O uso dessa expressão garante que a taxa de material processado cresça de forma contínua e linear do instante em que o estoque $q_i = 0$ até o instante em que há pelo menos uma unidade em estoque. No regime permanente, considera-se que há mais de uma unidade de material nos estoques intermediários, ou seja, $\min(1, q_i) = 1$ para todo i . Além disso, tem-se que $q'_i = 0$, ou seja, a taxa de acúmulo de material é nula e, assim, todos os estoques intermediários permanecem em um nível constante.

Assim, simplificando-se a equação 6.53, obtém-se o seguinte sistema linear para o regime permanente:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4300 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2502 & 0,5118 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1538 & 0,3140 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0170 & 0,0347 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0175 & 0,0020 & 0,2811 & 0,2811 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0087 & 0,0010 & 0,1399 & 0,1399 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0161 & 0,0018 & 0,2588 & 0,2588 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0200 & 0,0023 & 0,3204 & 0,3204 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2407 & 0,2407 & 0,2407 & 0,2407 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \\ U_9 \\ U_{10} \\ U_{11} \\ U_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.54)$$

Pode-se observar que o sistema acima é subdeterminado, uma vez que possui 11 equações e 12 incógnitas. Tais incógnitas correspondem às frequências de operação das máquinas e da fonte de material no regime permanente. Uma condição de contorno relevante a ser considerada para a solução desse sistema é o atendimento da demanda das nove famílias de produtos fabricadas pela empresa. Essa condição é representada a partir de nove equações adicionais do modelo, apresentadas anteriormente, que representam os fluxos finais de saída do modelo. Tais equações são reapresentadas a seguir. Os valores do lado direito das equações correspondem às demandas diárias de cada família de produtos, em m²/dia, conforme apresentado na Tabela 6.4 (p. 216).

$$f_{sf6} = 0,0212U_2\min(1, q_2) = 967 \quad (6.55)$$

$$f_{sf4} = U_6\min(1, q_6) = 1452 \quad (6.56)$$

$$f_{sf1} = 0,1262U_3\min(1, q_3) + 0,0618U_2\min(1, q_2) = 5286 \quad (6.57)$$

$$f_{sf5} = 0,0063U_3\min(1, q_3) + 0,0031U_2\min(1, q_2) = 265 \quad (6.58)$$

$$f_{sf2} = 0,3270[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] = 12287 \quad (6.59)$$

$$f_{sf3} = 0,0079[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] = 294 \quad (6.60)$$

$$f_{sf8} = 03532[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] = 13273 \quad (6.61)$$

$$f_{sf9} = 0,0713[U_7\min(1, q_7) + U_8\min(1, q_8) + U_9\min(1, q_9) + U_{10}\min(1, q_{10})] = 2676 \quad (6.62)$$

$$f_{sf7} = U_{11}\min(1, q_{11}) = 9048 \quad (6.63)$$

Com estas equações adicionais de atendimento das demandas, o sistema linear passa a ser sobredeterminado. Para se obter diversas soluções possíveis e compará-las, resolveu-se o sistema da equação 6.54 várias vezes, acrescentando-se uma equação adicional por vez. As soluções foram obtidas com auxílio do software Matlab[®]. Na Tabela 6.7 indica-se qual equação de saída de família foi adicionada ao modelo de estado para se obter a solução.

Tabela 6.7 – Soluções do sistema no regime permanente.

Soluções - frequências das máquinas no regime permanente [dia ⁻¹]				
variáveis	1) eq. família 7	2) eq. família 8	3) eq. família 1	4) eq. família 6
U1	45.551,2	45.537,8	45.528,1	45.613,2
U2	45.551,2	45.537,8	45.528,1	45.613,2
U3	19.587,0	19.581,2	19.577,1	19.613,7
U4	21.449,4	21.443,0	21.438,5	21.478,5
U5	13.157,5	13.153,7	13.150,9	13.175,4
U6	1.454,2	1.453,7	1.453,4	1.456,2
U7	10.564,5	10.561,4	10.559,2	10.578,9
U8	5.257,8	5.256,3	5.255,2	5.265,0
U9	9.726,4	9.723,6	9.721,5	9.739,7
U10	12.041,5	12.038,0	12.035,4	12.057,9
U11	9.048,0	9.045,3	9.043,4	9.060,3
U01	45.551,2	45.537,8	45.528,1	45.613,2

Na tabela apresentada, pode-se observar que as diferenças entre as soluções encontradas são muito pequenas. A fim de se avaliar a consistência do sistema, os valores obtidos em cada solução foram substituídos nas demais equações adicionais de demanda (equações 6.55 a 6.63) e se verificou se tais equações foram atendidas. Na Tabela 6.8 são mostrados os resultados das substituições e os valores de erro relativo entre saída obtida para cada família (produção) e a demanda requerida.

Tabela 6.8 – Verificação do atendimento das demandas no regime permanente.

família	demanda	solução 1)	erro %	solução 2)	erro %	solução 3)	erro %	solução 4)	erro %
1	5.286	5.289	0,1%	5.287	0,0%	-	-	5.296	0,2%
2	12.287	12.292	0,0%	12.288	0,0%	12.286	0,0%	12.309	0,2%
3	294	297	1,0%	297	1,0%	297	1,0%	297	1,1%
4	1.452	1.454	0,1%	1.454	0,1%	1.453	0,1%	1.456	0,3%
5	265	264	-0,4%	264	-0,4%	264	-0,4%	264	-0,2%
6	967	966	-0,1%	965	-0,2%	965	-0,2%	-	-
7	9.048	-	-	9.045	0,0%	9.043	-0,1%	9.060	0,1%
8	13.273	13.277	0,0%	-	-	13.270	0,0%	13.295	0,2%
9	2.676	2.680	0,2%	2.679	0,1%	2.679	0,1%	2.684	0,3%
Totais	45.548	45.567		45.553		45.544		45.629	

Na tabela apresentada, observa-se que os erros relativos obtidos foram pequenos, em geral, menores do que 1% em módulo. Isso demonstra que a modelagem do sistema é consistente, pois o objetivo principal de um sistema de produção no médio prazo, isto é, em regime permanente, deve ser o atendimento das demandas dos produtos.

6.3 Simulação do modelo e estudo da resposta com controle

Uma vez obtidas as soluções no regime permanente, o sistema foi implementado em Simulink® para a aplicação do controle e a realização de simulações. A estrutura do modelo de simulação é mostrada na Figura 6.13. No modelo proposto, controla-se as frequências de operação das máquinas e da fonte de material do sistema (U_i). Os objetivos de controle são, em primeiro lugar, estabilizar os fluxos de saída em valores especificados, garantindo o atendimento à demanda e, em segundo lugar, ajustar os níveis de estoque do sistema em determinados valores desejados, de forma a absorver as incertezas de produção de curtíssimo prazo. Se ocorre a quebra de uma máquina ou um atraso em uma dada etapa do processo de produção, por exemplo, o controlador deve regular a frequência de operação das máquinas antecedentes (a montante) para que uma quantidade excessiva de estoque em processo não seja formada. Por outro lado, deve-se também garantir os níveis desejados de estoque em processo sejam atingidos para que, em caso de quebra de uma máquina, as demais máquinas a jusante tenham certa quantidade de material para processar, por um dado período de tempo, evitando a interrupção completa da produção em todo o sistema.

Figura 6.13 – Modelo de simulação elaborado no Simulink®.

Na terminologia da produção, a frequência nominal de operação de uma dada máquina pode ser denominada por tempo de ciclo. Assim, cada máquina possui um tempo de ciclo padrão ao executar uma dada operação em um determinado material. O fato de o controlador do sistema definir valores para as frequências de operação das máquinas não significa que esse tempo de ciclo será alterado. Em termos práticos, os valores determinados pelo controlador do sistema fornecem uma diretriz gerencial para ajuste dos tempos de parada das máquinas. Tais valores são uma estimativa para a frequência ideal média com a qual cada máquina deveria operar em cada instante. A partir desses valores, pode-se determinar, por exemplo, o período máximo em que determinada tarefa deve ser executada ou intervalos de tempo nos quais a máquina pode ficar ociosa ou deve estar operando com seu tempo de ciclo padrão. A partir desses dados de frequência, obtidos nas simulações, pode-se também calcular os valores ideais de utilização das máquinas, ou seja, a razão percentual entre seu tempo efetivo de operação e o tempo total disponível. Esses indicadores, assim como os indicadores de estoque em processo (*Work In Process*, WIP), são de interesse prático aos gerentes de

produção. Os valores de frequência determinados por meio da simulação ou da solução do sistema no regime permanente devem ser comparados com a frequência máxima de operação da máquina, isto é, com seu tempo de ciclo padrão para uma dada tarefa. Caso as frequências observadas na simulação, para uma dada máquina, sejam superiores à sua frequência máxima, conclui-se que tal máquina está com uma capacidade aquém da capacidade requerida pelo sistema, dentro dos parâmetros especificados. Assim, a simulação do modelo proposto auxilia a identificar gargalos na produção.

A função do Matlab[®] representada pelo bloco "Interpreted MATLAB Fcn" foi programada para implementar uma dada regra de controle com base no erro observado entre o nível de estoque q_j atual e o nível desejado q_{jc} . Assim, nesta função, são definidos os valores momentâneos das frequências de operação das máquinas, U_i . Estes valores de frequência são então substituídos nas equações de estado do sistema, apresentadas de forma matricial na equação 6.53, para cálculo das taxas de acúmulo de material, q'_j . Como se pode observar no modelo de simulação, estas taxas são integradas e realimentam o sistema para atualização do erro de nível de estoque e atualização das frequências U_i . A função mencionada possui vários parâmetros de entrada, a saber:

- os valores das frequências de operação das máquinas no regime permanente (U_{ip}), obtidos a partir da solução do sistema nos moldes descritos no item 6.1.5;
- os valores de referência para o nível de cada estoque intermediário do sistema, q_{jc} , ou seja, os valores desejados de estoque;
- os valores de estoque inicial q_{i0} presentes no sistema;
- os coeficientes da matriz de estado do sistema, exibidos na equação 6.54 (p.230), e calculados a partir do *mix* de produção e da modelagem do sistema;
- parâmetros específicos referentes à regra de controle escolhida.

Mais detalhes sobre essa função, incluindo seu código em linguagem Matlab[®], são apresentados no Apêndice B.

As simulações foram realizadas em um computador com as seguintes configurações: processador Intel[®] Core™ i7-3620M CPU @ 2.90GHz, memória RAM de 6 GB e sistema operacional de 64 bits. Utilizou-se a versão R2012b do Matlab[®] e a versão 8.0 (R2012b) do Simulink[®]. Os parâmetros e resultados das simulações são apresentados a seguir, nos itens 6.3.1 a 6.3.3.

6.3.1 Simulações iniciais com a regra de controle proposta por Ferney

Para as simulações iniciais do sistema, optou-se por implantar a mesma regra de controle proposta por Ferney (2000). Conforme mostrado no capítulo 3, esta regra de controle é representada pelas seguintes expressões:

$$U_i = (a_i + b_i)c_i \quad (3.85)$$

$$a_i = U_{ip}1\mu u^{-1} \quad (3.86)$$

$$b_i = U_{ip}\alpha_i \text{sign}(q_{jc} - q_j) \min(1, |q_{jc} - q_j|) \quad (3.87)$$

$$c_i = \min(1, |(1 + \beta_j)q_{jc} - q_j|), \text{ sendo} \quad (3.88)$$

U_{ip} = valor de U_i no regime permanente;

α_i = coeficiente homogêneo em um^{-2} (um significa unidades de material, de forma genérica);

β_i = coeficiente adimensional;

j = índice do estoque subsequente à máquina ou fonte i (estoque a jusante);

q_{jc} : valor de referência para o estoque q_j .

Para simplificar as expressões e facilitar a escrita da rotina, definiu-se a seguinte variável e_j para representar o erro de nível e estoque:

$$e_j = \text{sign}(q_{jc} - q_j) \min(1, |q_{jc} - q_j|) \quad (6.64)$$

Assim, a expressão de controle fica:

$$U_i = U_{ip}(1 + \alpha e_j)c_i \quad (6.65)$$

Analisando-se a equação 6.64 conclui-se que, caso a diferença em módulo entre o estoque atual q_j e estoque de referência q_{jc} seja maior do que uma unidade, a variável e_j assume o valor -1 ou 1, dependendo do sinal resultante da subtração. Tomando-se c_i igual a 1 na equação 6.65 e definindo-se $\alpha = 20\%$, por exemplo, tem-se que a frequência de operação U_i de uma dada máquina pode ser igual à sua frequência de operação no regime permanente, U_{ip} , pode ser 20% maior ou 20% menor que esta. Em outras palavras, caso não haja um sobressinal significativo, a frequência U_i assume valores discretos pertencentes ao conjunto $\{0,8U_{ip}, U_{ip}, 1,2U_{ip}\}$.

Na regra de controle apresentada, a frequência de operação de uma dada máquina depende do nível do estoque em processo localizado a jusante desta, conforme discutido no

capítulo 3. Para que essa regra possa ser seguida, a topologia do sistema modelado impõe uma questão adicional e inédita a ser resolvida: as frequências de algumas máquinas, no caso proposto, dependem dos níveis de dois ou mais estoques intermediários localizados à jusante, ao invés de um único estoque, uma vez que no sistema há juntas divergentes ligadas a máquinas em paralelo. Cada máquina em paralelo, por sua vez, é alimentada por um estoque antecedente, segundo os princípios da modelagem realizada. A jusante da máquina 3, por exemplo, estão localizados os estoques q_4 , q_5 e q_6 , como pode ser observado no modelo físico da Figura 6.11 (p. 218). Assim, a frequência U_3 deve ser controlada em função dos níveis dos três estoques mencionados. Para solucionar esta questão foram levantadas duas estratégias. A primeira delas consiste em definir uma dada frequência U_i a partir da média das compensações individuais que seriam feitas em função de cada estoque subsequente. Dessa forma, a frequência de operação da máquina i fica definida em função dos erros dos estoques subsequentes q_j , q_{j+1} , ..., q_{j+m-1} , onde m é o número de máquinas em paralelo que sucedem a máquina i . Para a máquina 3 do sistema obtém-se, portanto, a seguinte equação de controle:

$$U_3 = U_{3p}[(1 + \alpha e_4)c_4 + (1 + \alpha e_5)c_5 + (1 + \alpha e_6)c_6]/3 \quad (6.66)$$

De forma genérica, pode-se escrever:

$$U_i = U_{ip}[(1 + \alpha e_j)c_j + (1 + \alpha e_{j+1})c_{j+1} + \dots + (1 + \alpha e_{j+m-1})c_{j+m-1}]/m \quad (6.67)$$

A segunda estratégia de controle que poderia ser utilizada quando uma máquina antecede um conjunto de máquinas em paralelo consiste na soma das compensações individuais feitas em função de cada estoque subsequente. Tal estratégia pode ser representada pela mesma equação 6.67 retirando-se o divisor m .

Com base na regra de controle representada pelas equações 6.64, 6.65 e 6.67, foram realizadas seis simulações iniciais, de cunho exploratório, definindo-se diferentes valores de referência para os níveis dos estoques intermediários do sistema. Os níveis dos estoques iniciais q_{i0} foram definidos como sendo zero, para que se pudesse estudar o regime transiente a partir de uma situação na qual o sistema de manufatura está vazio e vai iniciar suas operações. Nas simulações de 1 a 4, definiu-se $\alpha = \beta = 20\%$. Nas simulações 5 e 6, o valor de α foi mantido e definiu-se $\beta = 5\%$ visando-se melhorar a reação do modelo ao sobressinal. Para os valores de fluxo, adotou-se a unidade metros quadrados por dia, sendo que as frequências das máquinas são dadas em dia^{-1} . Para se observar a dinâmica do sistema, a unidade de tempo de referência (dia) foi dividida por 100. Assim, os valores das variáveis do sistema foram calculados a cada 0,01 dia.

Nessas simulações iniciais, os valores de alguns parâmetros foram escolhidos, num primeiro momento, de forma arbitrária, pois não se dispunha de nenhum conhecimento prévio sobre a dinâmica do sistema. No caso de alguns parâmetros, como α e β , por exemplo, foram adotados os mesmos valores iniciais utilizados por Ferney (2000). Na medida em que os resultados das simulações foram sendo analisados, buscou-se refinar os valores desses parâmetros. O resultado desses ajustes pode ser observado principalmente na segunda e terceira rodadas de simulações, apresentadas nos itens 6.3.2 e 6.3.3 mais adiante.

Na simulação 1, foram definidos como níveis de estoque de referência valores arbitrários próximos das frequências de operação, em regime permanente, das máquinas subsequentes a cada estoque. Nas simulações seguintes, esse critério de escolha dos valores de referência foi aprofundado. Em situações reais de produção, é comum contabilizar os estoques em termos de dias de produção, considerado as taxas de produção do sistema. Assim, foram definidos como referência para os níveis de estoques valores múltiplos das frequências de operação das máquinas subsequentes em regime permanente, ou seja, valores múltiplos de U_{ip} . Em termos práticos, quando se define que o estoque de referência q_{3c} deve ser de um dia, isso equivale a estabelecer que $q_{3c} = 19.613 \text{ m}^2$, uma vez que $U_{3p} = 19.613/\text{dia}$. Isso significa que, caso a máquina 2 pare de funcionar, devido a algum imprevisto, e pare de abastecer o estoque q_3 , a máquina 3 ainda pode funcionar normalmente por um dia, sem que o restante do sistema, a jusante, seja afetado.

O Quadro 6.3 apresenta um resumo dos resultados, que serão discutidos em seguida, com mais detalhes.

Quadro 6.3 – Resumo dos parâmetros e resultados das simulações.

Simulações iniciais		
No.	Valores de referência para os níveis de estoque	Resultados e observações:
1	Valores de estoque sequencialmente decrescentes, próximos dos valores das frequências das máquinas subsequentes, no regime permanente: $q_{1c}=45.000$; $q_{2c}=40.000$; $q_{3c}=22.000$; $q_{4c}=19.000$; $q_{5c}=15.000$; $q_{6c}=13.000$; $q_{7c}=10.000$; $q_{8c}=9.000$; $q_{9c}=8.000$; $q_{10c}=7.000$; $q_{11c}=6.000$;	Alguns níveis de estoque não são atingidos, a saber: <ul style="list-style-type: none"> • $q_4 = 24.500$ - estoque que antecede a impressora mais rápida; • $q_6 = 4.000$ - estoque do posto de corte e costura manual; • $q_8 = 5.000$ - estoque que antecede a máquina de corte e costura mais lenta; • $q_{10} = 11.500$ - estoque que antecede a máquina de corte e costura mais rápida. Houve oscilação na frequência de algumas máquinas: <ul style="list-style-type: none"> • U8, U9 e U10, reguladas pelo estoque q_{11}; • U01, regulada em função do estoque q_1; • U2, regulada pelo estoque q_3; • U3, regulada pelos estoques q_4, q_5 e q_6.

Quadro 6.3 – Resumo dos parâmetros e resultados das simulações (continuação).

Simulações iniciais		
No.	Valores de referência para os níveis de estoque	Resultados e observações:
2	Valores de estoque em processo correspondentes a 1 dia em relação à máquina subsequente, ou seja: $q_{1c}=45.613$; $q_{2c}=45.613$; $q_{3c}=19.613$; $q_{4c}=21.478$; $q_{5c}=13.175$; $q_{6c}=1.456$; $q_{7c}=10.578$; $q_{8c}=5.264$; $q_{9c}=9.739$; $q_{10c}=12.058$; $q_{11c}=9.060$;	Foram observadas anomalias nos níveis de estoque: <ul style="list-style-type: none"> • nos estoques q_4, q_5, q_7, q_8, q_9 e q_{10}, foram acumuladas quantidades muito maiores que o desejado (de 5,58 a 31 vezes); • no estoque q_{11}, o valor acumulado foi 393 vezes maior que o desejado; • o estoque em processo q_6, por outro lado, ficou próximo de zero. A frequência da fonte de material (U_{01}), e as frequências das máquinas 1 e 2 (U_1 e U_2) oscilaram entre os mesmos valores discretos ($0,8U_{ip}$ ou $1U_{ip}$), de forma defasada entre si (esses três elementos apresentam a mesma frequência de funcionamento no regime permanente, isto é, $U_{1p} = U_{2p} = U_{3p}$).
3	Valores de estoque em processo correspondentes a 1/2 dia.	A resposta do sistema nesses dois casos foi muito similar à resposta obtida na simulação 2. Observou-se que quanto menores os níveis de estoque de referência estipulados, maior é o sobressinal, ou seja, maior o erro relativo entre o nível obtido e o nível desejado. As frequências iniciais de operação das máquinas, no instante zero, foram as mesmas para as simulações de 1 a 4.
4	Valores de estoque em processo correspondentes a 1/4 de dia.	
5	Valores de referência para o estoque como na simulação 2, mas com o parâmetro c_j definido de forma diferente, de acordo com uma regra condicional. Além disso, adotou-se $\beta = 5\%$, ou seja, tolerância para sobressinal de 5%.	O fato de o parâmetro c_j assumir valores menores do que 1 faz com que o estoque q_{11} passe a diminuir, pois as máquinas imediatamente antecedentes a ele (máquinas 7, 8, 9 e 10) passam a trabalhar em 64% da frequência do regime permanente, ou seja, $0,8 \times 0,8$. Como essas máquinas ficam mais lentas, as máquinas 4 e 5 também ficam mais lentas e o estoque passa a acumular antes dessas últimas, isto é, os estoques q_4 e q_5 começam a crescer. A máquina 3 não funciona em seu mínimo, a 64% da frequência do regime permanente, porque é feita uma média dos erros relacionados aos estoques q_4 , q_5 e q_6 . Como não há restrições para o estoque de saída após q_6 (pois é o final de produção de uma família), a média das compensações aumenta, o que faz com que a máquina 3 não funcione com a frequência mínima possível.
6	Valores de referência para estoque e parâmetro c_j definido como na simulação 5; $\beta = 5\%$. Entretanto, mudou-se a regra de controle para a máquina 3, que deixa de ser a média para ser o mínimo: $U_3 = U_{3p} \min[(1 + \alpha e_4)c_4; (1 + \alpha e_5)c_5; (1 + \alpha e_6)c_6]$	A alteração na regra de controle da máquina 3 eliminou a oscilação da frequência das máquinas antecedentes (U_1 e U_2) e da fonte (U_{01}). Os erros em relação ao nível de quase todos os estoques diminuem, com exceção do estoque q_{11} , que volta a aumentar muito, de forma desproporcional e similar ao que ocorre nas simulações 2 e 3.

Os resultados da simulação 1 são apresentados nas Figuras 6.14 e 6.15.

Figura 6.14 – Resultados da simulação 1: níveis de estoque.

Figura 6.15 – Resultados da simulação 1: frequências de operação das máquinas.

Com base na Figura 6.14, observa-se que todos os estoques estabilizam após aproximadamente 23 dias. Entretanto, alguns estoques apresentam oscilações de baixa amplitude em torno do nível alcançado, as quais refletem as oscilações significativas que ocorrem na frequência de operação das máquinas, mostradas Figura 6.15. Conforme apresentado no Quadro 6.3, alguns estoques não atingem o nível desejado.

A seguir são apresentados os resultados da simulação 2.

Figura 6.16 – Resultados da simulação 2: níveis de estoque.

Figura 6.17 – Resultados da simulação 2: frequências de operação das máquinas.

Na simulação 2, ocorre inicialmente um acúmulo excessivo de material no estoque q_{11} , durante os 5 primeiros dias de operação do sistema, como mostrado na Figura 6.16. Daí em diante, o sistema não é capaz de compensar esse excesso inicial dentro do horizonte de 250 dias. Os estoques q_4 e q_5 também apresentam excesso significativo de material e tendência crescente, indicando que o controle não está sendo capaz de gerar a diminuição desse excesso. Além disso, observa-se oscilação nas frequências de operação das duas máquinas localizadas no início do sistema e da fonte de material.

As simulações 3 e 4 são muito semelhantes à simulação 2, entretanto, observou-se que quanto mais baixos são os níveis de referência definidos, maior é a discrepância entre os valores de estoque obtidos e os desejados. Pode-se notar que os gráficos da Figura 6.18 são muito similares aos da Figura 6.16, entretanto, os níveis de estoque atingidos são ainda maiores no segundo caso.

Figura 6.18 – Resultados da simulação 4: níveis de estoque.

Após estas 4 simulações iniciais, observou-se que o parâmetro de controle c_i não estava funcionando efetivamente para conter o sobressinal. Analisando-se a equação 3.88 (reapresentada na p. 235) proposta por Ferney (2000) observa-se que o valor do parâmetro c_i é sempre 1, independentemente da magnitude da diferença entre o nível real e o nível desejado, exceto para o caso em que a diferença $(1 + \beta_j)q_{jc} - q_j$ é menor do que 1. Observou-se que, de fato, esse parâmetro sempre assumiu o valor 1 todas as simulações. Diante disso, propôs-se que tal parâmetro fosse definido da seguinte forma: caso a diferença $q_j - (1 + \beta_j)q_{jc}$ seja maior do que 0, então c_j deve ser igual a $1 - \alpha$; caso contrário, c_j deve assumir o valor 1. O parâmetro β representa a tolerância para o sobressinal. Assim, para $\beta = 5\%$, a regra proposta estabelece que se o nível de estoque obtido excede o valor desejado em mais de 5%, o parâmetro c_j deve receber um valor menor do que 1, uma vez que $0 < \alpha < 1$. Assim, esse parâmetro auxilia a reduzir ainda mais a frequência de operação da máquina que antecede o estoque, reduzindo a taxa de acúmulo de material.

As simulações 5 e 6 foram realizadas com o parâmetro c_j definido da forma mencionada. Conforme apresentado no Quadro 6.3, adotou-se $\beta = 5\%$.

Figura 6.19 – Resultados da simulação 5: níveis de estoque.

Comparando-se os resultados da simulação 5 com a simulação 2 para $t = 240$, observa-se que o nível do estoque q_{11} diminui de forma um pouco mais acentuada devido à mudança realizada no parâmetro c_j . Por outro lado, na simulação 5, os estoques q_4 e q_5 passam a crescer de forma mais acentuada. Ao final do período de 700 dias observa-se que o material tende a se acumular não mais no final do sistema, em q_{11} , mas em um ponto intermediário do mesmo.

Diante do acúmulo de material nos estoques q_4 e q_5 , era esperado que a máquina 3 passasse a operar no nível mínimo possível, para evitar o aumento dos níveis desses estoques. Entretanto, observou-se que isto não ocorre. Isso é explicado pelo fato de o controle da máquina 3 ser realizado em função da média dos níveis dos estoques q_4 , q_5 e q_6 . O nível do estoque q_6 , por sua vez, não aumenta muito, pois a máquina 6 não sofre reduções em sua frequência de operação. Tal máquina opera sempre com a frequência de regime permanente, U_{6p} , uma vez que ela antecede uma das saídas de fluxo do sistema, ou seja, tal máquina se localiza em uma extremidade livre do sistema, na qual não há restrição de fluxo. Com base nessa constatação, optou-se por modificar a regra de controle da máquina 3 para que sua frequência de operação fosse mínima, levando em consideração os nível individual de cada estoque subsequente. Tal regra é apresentada na equação 6.68 a seguir:

$$U_3 = U_{3p} \min\{(1 + ae_4)c_4; (1 + ae_5)c_5; (1 + ae_6)c_6\} \quad (6.68)$$

Realizou-se uma simulação adicional para verificar o efeito dessa modificação. Os resultados são mostrados nas Figuras 6.20 e 6.21.

Figura 6.20 – Resultados da simulação 6: níveis de estoque.

Figura 6.21 – Resultados da simulação 6: frequências de operação das máquinas.

Como era esperado, com a modificação mencionada, a máquina 3 passou a operar em sua frequência mínima possível, ou seja, a 64% da frequência de regime permanente (para $\alpha = 20\%$). Dessa forma, não houve mais o acúmulo de material nos estoques subsequentes, q_4 e q_5 , como é possível observar na Figura 6.20. Na Figura 6.21 nota-se que, após um período inicial de 10 dias, todas as máquinas do sistema passam a operar com frequência mínima, com exceção das máquinas 6 e 11, que se localizam imediatamente nas saídas do sistema, onde não há restrições e armazenagem. É interessante notar que o uso da regra de controle apresentada na equação 6.68 eliminou a oscilação das frequências U_1 , U_2 e U_{01} , que ocorria nas simulações anteriores. Por outro lado, a modificação da regra de controle da máquina 3 gerou um acúmulo ainda maior de material no estoque q_{11} .

A partir do momento em que há pelo menos 1 m^2 de material em cada estoque intermediário do sistema, as máquinas passam a operar com uma frequência equivalente a 1,2 vezes a frequência de regime permanente U_{ip} , uma vez que o nível inicial dos estoques é zero. Em seguida, os estoques deveriam tender ao nível desejado partindo-se do final do sistema, sucessivamente, até o seu início. Este foi o comportamento observado por Ferney (2000) para um sistema de 4 máquinas e um único produto. Isto significa que a informação é transmitida no sentido oposto ao sentido do fluxo de material, pois os níveis de estoque a jusante é que são utilizados para controlar as máquinas que os antecedem. Entretanto, há um atraso para que tal informação seja realimentada a cada máquina a montante, até chegar ao início do sistema. Na simulação 6, por exemplo, as máquinas 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 10, passam a ter sua frequência de operação reduzida somente em torno do quinto dia. Esse sinal de redução chega às máquinas 2 e 3 na metade do sétimo dia, aproximadamente, sendo transmitido à máquina 1 somente no nono dia. Por fim, a informação de redução chega à fonte primária um pouco antes do décimo dia de operação do sistema. Esta sequência de transmissão pode ser visualizada na Figura 6.22 a). Outro ponto a ser observado na Figura 6.22 b) é a existência de uma oscilação significativa no nível do estoque q_{11} em um curtíssimo espaço de tempo, em torno do quinto dia de operação do sistema. Nesse ponto, poucos instantes antes do estoque crescer abruptamente, há uma falta momentânea de material.

Supõe-se que uma quantidade excessiva de material seja acumulada no final do sistema porque, devido ao atraso, quando a informação chega à fonte primária de fluxo que alimenta o sistema, muito material já foi produzido em um período inicial. Em outras palavras, observa-se que a informação, nesse caso, tem uma inércia alta em relação à velocidade do fluxo de material.

Figura 6.22 – Detalhe dos gráficos da simulação 6 nos momentos iniciais: a) frequências de operação das máquinas; b) níveis de estoque.

O acúmulo de material se dá especificamente no estoque q_{11} provavelmente por dois motivos. O primeiro deles é o fato de tal estoque ser alimentado por 4 máquinas em paralelo. Além disso, a frequência de regime permanente da máquina 11, que consome esse estoque, é relativamente baixa em relação à frequência das demais máquinas. Na realidade, há duas outras máquinas com frequências de operação mais baixas que a máquina 11, a máquina 6 e a máquina 8. A máquina 6, entretanto, recebe apenas uma pequena porcentagem do fluxo de material total, correspondente a 3,47%, e a máquina 8, por sua vez, faz parte de um conjunto de máquinas em paralelo, ou seja, não absorve sozinha todo o fluxo que vem das operações anteriores.

Com base nessa análise exploratória do comportamento do sistema, baseada nas simulações iniciais, supõe-se que seja possível melhorar o controle fazendo com que as máquinas não operem com frequências altas no período inicial, para que os estoques sejam preenchidos de forma mais gradual. Essa ideia será retomada mais adiante, no subitem 6.3.3.

Nas simulações de 1 a 5, foi possível observar a ocorrência de oscilações nas frequências de operação das máquinas, conforme apresentado no Quadro 3 (p. 237 e 238). Supõe-se que essas oscilações estejam relacionadas a três fatores. Em primeiro lugar, observa-se que no controlador proposto por Ferney (2000), a frequência das máquinas é alterada em degraus, e não de forma contínua e suave. Conforme já mencionado na análise das equações 6.64 e 6.65 (p. 235), as frequências podem assumir apenas um conjunto reduzido de valores discretos. Além disso, a mudança ocorre somente em função do sinal do erro, e não do valor do erro em si. Assim, esse controlador não tem a capacidade de realizar um ajuste fino da frequência quando os valores de estoque estão muito próximos dos valores de referência, causando a oscilação.

Adicionalmente, foi possível constatar que a ocorrência de oscilações também depende dos níveis de estoque de referência estabelecidos. Esses foram os únicos parâmetros modificados na simulação 2, em relação à simulação 1, e o padrão de oscilações mudou com essa alteração, como se pode observar nas Figuras 6.15 e 6.17.

O terceiro fator de influência está ligado à topologia do sistema modelado. Em alguns pontos, o controle da frequência de operação de uma dada máquina depende não de um único estoque subsequente, mas sim de mais de um estoque, como ocorre para as máquinas 3 e para as máquinas 4 e 5. Em outras palavras, o controle depende, simultaneamente, de sinais de erros distintos. Diante disso, nas primeiras simulações, utilizou-se uma média das compensações, conforme mostrado nas equações 6.66 e 6.67. Isso também se constitui uma

fonte provável de instabilidade, pois, quando a média foi substituída pelo valor mínimo (equação 6.68), as oscilações deixaram de ocorrer.

6.3.2 Observação do sistema sem controle e segunda rodada de simulações

Pode-se observar que o controlador proposto na equação 6.65 possui dois parâmetros a serem ajustados α e c_i . Além disso, o nível de referência para os estoques intermediários, q_{jc} , também é um parâmetro a ser definido. Levantou-se a hipótese de que o equilíbrio do sistema proposto pudesse estar condicionado a determinados valores de q_{jc} . Em outras palavras, podem existir determinados valores de q_{jc} que o sistema de produção não consegue atingir simultaneamente, em uma situação de equilíbrio. Por outro lado, quando em equilíbrio, o sistema pode ter uma tendência a acumular, em cada ponto, um nível determinado de estoque intermediário, um tipo de "nível natural". Diante disso, supõe-se que seria possível levar o sistema com maior facilidade a atingir valores múltiplos desse nível natural dos estoques. Em resumo, as simulações iniciais suscitaram a seguinte questão: quais são os níveis de estoque intermediário formados quando todas as máquinas operam em equilíbrio?

Para investigar este tópico, realizou-se uma simulação com o sistema sem controle, na qual todos os estoques iniciais são definidos como nulos e todas as máquinas funcionam com sua respectiva frequência de regime permanente, U_{ip} . Os resultados de tal simulação são apresentados na Figura 6.23 e na Tabela 6.9.

Figura 6.23 – Resultado da simulação 7: níveis de estoque q_j (resposta do sistema sem controle).

Tabela 6.9 – Valores obtidos para os estoques intermediários com o sistema sem controle (malha aberta).

Níveis dos estoques [m ² /dia]										
q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	q_9	q_{10}	q_{11}
456,13	456,13	196,15	114,39	70,17	7,78	7,99	3,98	7,31	9,11	90,60

Para os estoques que são antecidos por apenas uma máquina, constatou-se que o nível de material em estoque alcançado no equilíbrio é proporcional a dois fatores: à frequência de operação da máquina antecedente, em regime permanente, e à fração de fluxo que é encaminhada ao respectivo estoque. Além disso, observou-se que este coeficiente de proporcionalidade é de 0,01. Estas conclusões foram inferidas a partir dos resultados da Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Valores para análise da relação entre estoque, frequência de operação da máquina antecedente e fração de fluxo.

estoques	nível obtido	U_{ip} da máquina antecedente	razão q_i/U_{ip}	fração de fluxo p_{ij}	$U_{ip} \cdot p_{ij}$	razão $q_i/U_{ip} \cdot p_{ij}$
q_1	456,1	45613,2	0,0100	1,00	45613,21	0,0100
q_2	456,1	45613,2	0,0100	1,00	45613,21	0,0100
q_3	196,2	45613,2	0,0043	0,43	19618,24	0,0100
q_4	114,4	19613,7	0,0058	0,51	10030,79	0,0114
q_5	70,2	19613,7	0,0036	0,31	6166,19	0,0114
q_6	7,8	19613,7	0,0004	0,03	680,59	0,0114

No caso dos estoques q_1 e q_2 , observa-se que a quantidade em estoque equivale a um centésimo da frequência de operação da máquina antecedente em regime permanente. Todo o fluxo advindo do elemento antecedente, ou seja, da fonte 01 ou da máquina 1, é encaminhado a estes estoques. Os estoques q_3 , q_4 , q_5 e q_6 , ao contrário, recebem apenas parte do fluxo que sai da máquina que os antecede. Assim, pode-se observar, na Tabela 6.10, que a razão entre o nível de um dado estoque e a frequência de operação da máquina anterior é aproximadamente equivalente a 0,01 vezes a fração de fluxo que é encaminhada àquele estoque. O estoque 5, por exemplo, é precedido pela máquina 3, cuja frequência de operação no regime permanente é $U_{3p} = 19.613 \text{ dia}^{-1}$. A razão entre q_5 e U_{3p} é igual a 0,0036, que equivale a aproximadamente 0,01 vezes 0,31, onde 0,31 é a fração de fluxo efetivo encaminhado ao estoque 5. De forma geral, para os estoques intermediários antecidos por uma única máquina, observou-se a seguinte relação:

$$q_{je} \cong 0,01U_{ip}p_{ij}, \quad (6.69)$$

sendo que q_{je} é o nível do estoque da estação j obtido com o sistema sem controle e em equilíbrio; U_{ip} é a frequência de operação em regime permanente da máquina i , que antecede o estoque j ; p_{ij} é a fração do fluxo encaminhado da máquina i para o estoque j (escrita em número decimal).

A relação mostrada na equação 6.69 não é observada para os estoques q_7 a q_{11} . Tais estoques estão em uma situação distinta em relação aos demais, pois são precedidos por duas ou mais máquinas e o fluxo de material que chega até eles é resultado de agregações e divisões relativamente complexas.

A simulação do sistema sem controle permitiu observar qual é a quantidade de material que tende a acumular em cada estoque intermediário quando não há interferência externa. Em outras palavras, identificou-se a tendência ou estado natural do sistema. A partir desse resultado, é razoável supor-se que seria mais fácil levar o sistema a atingir os níveis desejados de estoque quando tais níveis são múltiplos dos estoques observados com o sistema sem o controle. Assim, foram realizadas duas simulações adicionais, definindo-se os níveis de estoque desejados como duas vezes e cem vezes os "níveis naturais" q_{je} , respectivamente. Nessas simulações, adotou-se $\alpha = 0,05$ e $\beta = 0,05$. Os resultados são mostrados nas Figuras 6.24 a 6.26.

Figura 6.24 – Resultados da simulação 8: níveis de estoque.

Figura 6.25 – Resultados da simulação 9: níveis de estoque.

Figura 6.26 – Resultados da simulação 9: frequências de operação das máquinas.

A simulação 8 apresentou resultados semelhantes aos da simulação 6. Na simulação 9, por outro lado, com os níveis de referência dos estoques mais altos e proporcionais aos níveis naturais, o controlador conseguiu corrigir o excesso de material inicialmente acumulado na estação 11 e levar os estoques intermediários aos níveis desejados. Ainda foram observados erros nos níveis dos estoques das estações 7, 8, 9 e 10. Para os demais estoques, os erros foram nulos. O pior caso foi observado para o estoque q_7 , que estabilizou em um nível 100 vezes menor do que o desejado. Pode-se observar também que as frequências de operação das máquinas passam a oscilar a partir do momento em que o estoque q_{11} atinge o nível desejado.

Visando-se melhorar os resultados observados nesse conjunto inicial de simulações, propôs-se a utilização de um controlador proporcional, conforme será abordado no próximo subitem.

6.3.3 Simulações com um controlador proporcional e com um controlador proporcional híbrido - terceira rodada

No controlador proposto para a terceira rodada de simulações, o acréscimo ou decréscimo aplicado à frequência de operação das máquinas é proporcional ao erro relativo dos estoques, conforme apresentado nas equações 6.70 a 6.72:

$$U_i = U_{ip}(1 + ke'_j), \text{ para } m = 0 \quad (6.70)$$

$$U_i = U_{ip}[1 + \min(ke'_j, ke'_{j+1}, \dots, ke'_{j+m})], \text{ para } m \neq 0 \quad (6.71)$$

$$e'_j = -e_j = \frac{q_{jc} - q_j}{q_{jc}} \quad (6.72)$$

sendo que: j é o índice de uma dada estação subsequente a i e m é o número total de estações em paralelo a j ; e'_j é a compensação do erro relativo do estoque j (a compensação apresenta o sinal contrário sinal do erro propriamente dito, e_j); q_j é o nível do estoque intermediário que antecede a máquina j e q_{jc} é o nível de referência para o estoque q_j .

Em todas as simulações realizadas nessa terceira rodada, os níveis de estoque desejado foram definidos como sendo cem vezes os níveis naturais dos estoques, q_{je} , observados com o sistema em malha aberta. Este procedimento foi adotado para que os resultados dessa rodada pudessem ser comparados com o resultado da simulação 9, já que este último foi o melhor resultado obtido com o controlador proposto por Ferney (2000). Na simulação 10, cujos resultados são mostrados a seguir, utilizou-se um ganho k de 0,1.

Figura 6.27 – Resultados da simulação 10: níveis de estoque.

Figura 6.28 – Resultados da simulação 10: frequências de operação das máquinas.

Figura 6.29 – Resultados da simulação 10: erros relativos.

Nos gráficos apresentados, observa-se que o sistema levou cerca de 240 dias para alcançar o equilíbrio. Nesse momento, quase todos os estoques atingiram o nível desejado, com exceção de q_6 , q_7 , q_8 e q_9 , que atingiram o equilíbrio em um nível muito próximo de zero. As frequências de operação das máquinas, em $t = 240$ dias são aproximadamente iguais às respectivas frequências de operação no regime permanente.

A Figura 6.28 mostra que, no início da simulação, as máquinas operam com frequências superiores às frequências de regime permanente. Isso faz com que uma quantidade excessiva de material seja acumulada na estação 11, após 32 dias de operação, conforme mostrado na Figura 6.27. Tal excesso é um pouco maior do que o observado na simulação 9 (Figura 6.25). Para compensá-lo, a frequência de operação das máquinas diminui significativamente, sendo que algumas delas permanecem paradas por um certo período de

tempo. Com isso, os materiais acumulados em excesso vão sendo consumidos, e os estoques começam a se aproximar dos níveis desejados. A partir daí, as frequências de operação das máquinas vão novamente aumentando até atingir os respectivos valores de regime permanente.

A utilização do controlador proporcional conferiu ao sistema uma capacidade de reação muito maior, uma vez que o equilíbrio foi atingido em um tempo muito menor em comparação à simulação 9. Por outro lado, as frequências de operação das máquinas sofreram variações mais significativas, sendo que a operação de algumas máquinas foi, inclusive, interrompida por um certo período. Isto representa uma desvantagem do ponto de vista econômico, uma vez que tais variações geram a elevação dos custos unitários de produção, associados tanto à subutilização ou superutilização de capacidade. No primeiro caso, tal elevação de custos está relacionada à amortização dos custos fixos por um menor volume de produção, e, no segundo, aos custos maiores com horas extras, energia elétrica etc.

Diante desses resultados, buscou-se realizar modificações no controle de forma a suavizar as variações na frequência de operação das máquinas. Para tanto, propôs-se a utilização de um controlador híbrido, funcionando da seguinte forma:

- no início do regime transiente, com os estoques iniciais nulos, as máquinas operam com uma frequência constante e um pouco acima da frequência de regime permanente, até os estoques intermediários sejam preenchidos em um certo nível e os erros relativos dos estoques atinjam um determinado valor limite, e_{jl} ;
- a partir desse valor limite, um controlador proporcional é acionado para realizar o ajuste fino dos níveis de estoque. Tal controlador segue a regra de controle apresentada nas equações 6.70 e 6.71.

Em uma primeira tentativa, estabeleceu-se que, funcionando em regime constante, o controlador deveria fazer as máquinas operarem com uma frequência 2% acima do valor de regime permanente, ou seja, $1,02U_{ip}$. Esse valor foi estimado com base nos resultados das simulações anteriores, pois se observou que níveis de 5% já geravam material em excesso na estação 11. Assim, um valor menor foi escolhido. Como valor limite para o erro relativo, estabeleceu-se $e_{jl} = -0,2$, com os erros relativos instantâneos e_j calculados segundo a equação 6.71. Dessa forma, o controlador proporcional passa a ser aplicado quando um dado estoque intermediário chega a 20% abaixo do nível desejado. Antes disso, ou seja, quando o estoque está mais abaixo do nível desejado, as máquinas operam com frequência constante. O valor do

ganho k foi definido com sendo 0,1. Substituindo-se o valor de k na equação 6.70 e tomando-se $e_j = e_{jl} = -0,2$ (ou seja, $e'_j = 0,2$), obtém-se:

$$U_i = U_{ip}(1 + 0,1 \cdot 0,2) = 1,02U_{ip} \quad (6.73)$$

Assim, essa escolha do valor do ganho e do limite e_{jl} garantem a continuidade na transição entre o regime constante e o regime proporcional do controlador. Além disso, para $e_{jl} > -0,2$, $U_i < 1,02U_{ip}$, o que garante um ajuste fino, com variações mais suaves na frequência de operação das máquinas quando os níveis de estoque estão bem próximos do nível de referência.

Os resultados obtidos utilizando-se o controlador híbrido com os parâmetros descritos são apresentados nas Figuras 6.30 a 6.32.

Figura 6.30 – Resultados da simulação 11: níveis de estoque.

Figura 6.31 – Resultados da simulação 11: frequências de operação das máquinas.

Figura 6.32 – Resultados da simulação 11: erros relativos.

A utilização desta estratégia de controle híbrida com os parâmetros descritos forneceu o melhor resultado dentre os já apresentados. Evitou-se o acúmulo excessivo de material no estoque da estação 11 e conseguiu-se atingir praticamente todos nos níveis de referência para os estoques intermediários, com exceção dos estoques q_4 e q_5 , que ficam cerca de 20% abaixo do nível de referência estipulado, e do estoque q_6 , que fica com aproximadamente 1,7 vezes mais material do que o estipulado. Ainda assim, esse excesso na estação 6 é bem menor em comparação aos valores observados nas demais simulações. Nesta simulação, da mesma forma que na simulação 10, o sistema levou cerca de 240 dias para atingir o equilíbrio.

A partir dos gráficos e das matrizes de resultados, é possível analisar o comportamento do sistema durante a simulação 11. No início, todas as máquinas trabalham com uma frequência 2% maior que a frequência de regime permanente, com exceção das máquinas 6 e 11, que continuam operando com a frequência U_{ip} , pois é importante manter o fluxo de saída regular, de forma a atender a demanda. Assim, tais máquinas agem como uma pequena barreira ao fluxo total de material do sistema, pois estão trabalhando em um ritmo ligeiramente mais lento que as demais. Assim, o material começa a se acumular paulatinamente nos estoques q_6 e q_{11} . Quando falta apenas 20% de material para que esses estoques atinjam o nível desejado, o controlador proporcional começa a funcionar para as máquinas 7, 8, 9 e 10, que antecedem o estoque q_{11} . A partir daí inicia-se um efeito em cadeia, à montante do sistema, até que todas as frequências de operação das máquinas sejam progressivamente reduzidas.

Os resultados mostrados nas Figuras 6.31 e 6.32 levam ao questionamento das causas da oscilação da frequência da máquina 3 e das causas do acúmulo de material no estoque da estação 6. Uma análise mais detalhada deste ponto do sistema revela que estas ocorrências estão inter-relacionadas.

Quando uma dada máquina alimenta apenas um estoque intermediário subsequente, a frequência desta máquina é controlada pelo erro relativo deste estoque, e a transição entre o regime constante e o regime proporcional ocorre segundo a regra apresentada anteriormente. Entretanto, elaborou-se uma regra condicional composta para essa transição quando uma determinada máquina alimenta mais de um estoque subsequente. No caso da máquina 3, sucedida pelos estoques q_4 , q_5 e q_6 , estabeleceu-se a seguinte regra condicional:

$$\begin{aligned} & \text{Se } [(-1 < e_4 < -0,2) \text{ ou } (-1 < e_5 < -0,2) \text{ ou } (-1 < e_6 < -0,2)], \\ & \text{então } U_3 = 1,02U_{3p} \\ & \text{senão } U_3 = U_{3p}[1 + \min(ke'_4, ke'_5, ke'_6)], \end{aligned} \quad (6.74)$$

sendo que $e'_j = -e_j$.

Deve-se ressaltar que a utilização do operador lógico "ou" torna esta regra conservadora, uma vez que, em função de tal regra, a frequência de operação da máquina 3 não é reduzida mesmo que o estoque q_6 atinja um nível mais alto que o desejado. Essa redução também depende dos erros e_4 e e_5 , que atingem o valor limite e_l um certo tempo depois do que e_6 . Em outras palavras, o estoque da estação 6 é preenchido antes do que os estoques das estações 4 e 5.

Na simulação 11, a partir do 67º dia, aproximadamente, e_4 e e_5 atingem valores maiores do -0,2, e o controlador proporcional passa então a funcionar. Nesse momento, porém, o estoque da estação 6 já é cerca de 1,5 vezes maior do que o desejado. No dia 67, o valor de e'_6 , ou seja, a compensação do erro e_6 é:

$$e'_6 = \frac{q_{6c} - q_6}{q_{6c}} = -1,5375 \quad (6.75)$$

Assim, o controlador utiliza esse valor de compensação para determinar o valor de U_3 , utilizando a regra condicional da equação 6.74. Com isso, a frequência da máquina 3 cai de $1,02 U_{ip}$ para $0,8463 U_{ip}$. Com essa redução, um centésimo de dia depois, ainda no 67º dia, os níveis dos estoques 4 e 5 diminuem, e_4 e e_5 voltam a ser menores do que -0,2. Por conseguinte, a frequência de operação da máquina 3 é novamente ajustada para $1,02 U_{ip}$. A

partir daí, e_4 e e_5 atingem valores maiores do -0,2, e todo o ciclo descrito se repete, caracterizando a oscilação observada no gráfico da Figura 6.31.

Com o intuito de se extinguir esse problema, propôs-se inicialmente a mudança dos operadores lógicos "ou", na equação 6.74, por operadores "e". Com isso, a máquina 3 se tornaria mais reativa, pois teria sua frequência de operação reduzida antecipadamente, logo que o estoque 6 fosse preenchido até um nível 20% abaixo do desejado. Os resultados dessa modificação são mostrados a seguir.

Figura 6.33 – Resultados da simulação 12: níveis de estoque.

Figura 6.34 – Resultados da simulação 12: frequências de operação das máquinas.

Figura 6.35 – Resultados da simulação 12: erros relativos.

A modificação proposta acaba desestabilizando todo o sistema, pois a frequência de operação da máquina 3 começa a ser reduzida antes que as frequências das máquinas 4 e 5 sejam reduzidas. Isso gera instabilidade na operação das máquinas 4 e 5, conforme pode-se ver no gráfico da Figura 6.34, além de gerar um acúmulo de material nos estoques 8 e 9, para os quais se observa um alto erro relativo (Figura 6.35).

Na realidade, esta dificuldade de controle da máquina 3 se deve à topologia e características específicas desse ponto do sistema. Conforme se observa no modelo físico da Figura 6.11 (p. 218), parte do fluxo de material que deixa da máquina 3 é encaminhado às estações 4, 5 e 6, pois as operações executadas em tais estações sucedem a operação 3 nos roteiros de processo. Entretanto, a máquina 6 não é paralela às máquinas 4 e 5, pois executa uma operação diferente e, sobretudo, possui uma frequência de operação muito diferente das outras duas. Além disso, esta máquina está posicionada em uma das saídas do sistema de manufatura, sendo responsável por executar a última operação do roteiro de produção da família 4. Todos esses fatores fazem com que haja uma defasagem no preenchimento do estoque 6 em relação aos estoques 4 e 5, o que implica uma dificuldade adicional de controle deste ponto do sistema. Tal fato não ocorre em relação às máquinas 7, 8, 9 e 10, já que todas estão em paralelo e o fluxo gerado por elas converge para um mesmo ponto.

Portanto, se a frequência de operação da máquina 3 é reduzida em função do acúmulo de material no estoque q_6 , reduz-se, ao mesmo tempo, o suprimento de material necessário à operação das máquinas 4 e 5. No início da operação do sistema, o nível de estoque q_6 , em relação à referência, é muito diferente dos níveis dos estoques q_4 e q_5 . Com a regra de controle

estabelecida na equação 6.74 não é possível conciliar estes dois objetivos, ou seja, regular simultaneamente tanto q_6 quanto q_4 e q_5 . Para se solucionar esse problema, propõe-se o controle não só da frequência U_3 , mas também das porcentagens relativas de fluxo encaminhadas às máquinas 4 e 5 e à máquina 6.

Dessa forma, na simulação 13, foram utilizados os mesmos valores para e_{jl} e k definidos nas simulações 11 e 12, entretanto, foram realizadas as seguintes modificações na regra de controle:

- se os erros relativos e_j (equação 6.72) dos estoques 4, 5 e 6 estiverem entre -1 e -0,2, a máquina 3 opera com frequência constante e igual a $1,02 U_{3p}$, ou seja, se $-1 < e_4 < -0,2$ e $-1 < e_5 < -0,2$ e $-1 < e_6 < -0,2$, então $U_3 = 1,02 U_{3p}$;
- se os erros relativos dos estoques 4 e 5 permanecerem dentro do intervalo mencionado no tópico anterior e se o erro relativo do estoque 6 se tornar maior ou igual a -0,2, então 1% do fluxo que estava sendo encaminhado à máquina 6 é redistribuído às máquinas 4 e 5, e mantém-se a frequência de operação da máquina 3 em $1,02 U_{3p}$. Em outras palavras, se $-1 < e_4 < -0,2$ e $-1 < e_5 < -0,2$ e $e_6 \geq -0,2$, então $U_3 = 1,02 U_{3p}$ e $p_6 = p_6 - 1\%$ e $p_{45} = p_{45} + 1\%$, sendo p_6 a porcentagem de fluxo encaminhada à máquina 6 e p_{45} a porcentagem encaminhada às máquinas 4 e 5;
- com essa redistribuição de fluxo, caso o estoque q_6 seja esgotado e surja uma tendência de falta, ou seja, estoque passe a ficar negativo, o controlador restitui a distribuição de fluxo original entre as máquinas 4, 5 e 6, isto é, se $e_6 < -1$, então $p_6 = p_6 + 1\%$ e $p_{45} = p_{45} - 1\%$;
- quando os erros relativos dos estoques 4 e 5 se tornam maiores do que -0,2, o controlador proporcional é ativado, e passa a valer a regra de controle apresentada na equação 6.71.

As modificações mencionadas conduziram aos resultados mostrados nas Figuras 6.36 a 6.38 a seguir.

Figura 6.36 – Resultados da simulação 13: níveis de estoque.

Figura 6.37 – Resultados da simulação 13: frequências de operação das máquinas.

Figura 6.38 – Resultados da simulação 13: erros relativos.

Os gráficos apresentados demonstram que o sistema operou de forma estável. Eliminou-se a oscilação da frequência de operação da máquina 3 e, além disso, obteve-se um valor de erro relativo para o estoque 6 bem menor do que o observado na simulação 11. O gráfico da Figura 6.38 demonstra o funcionamento do controlador da distribuição de fluxo. O estoque da estação 6 começa a ser preenchido antes do que os estoques das estações 4 e 5, o que pode ser constatado pela inclinação crescente da curva do erro relativo ao estoque 6 os primeiros 25 dias de simulação. Quando a quantidade de material no estoque 6 chega a 20% abaixo do nível desejado, o fluxo é redistribuído e a quantidade em estoque diminui rapidamente, até que o estoque 6 é zerado (ou seja, e_6 torna-se igual a -1). A partir desse ponto, o controlador restitui as porcentagens de fluxo originais do sistema, o que gera um comportamento cíclico. Supõe-se que tal comportamento possa ser evitado por meio do ajuste do valor da porcentagem de redistribuição do fluxo. Com base na Figura 6.38, infere-se que uma forma de evitar o ciclo seria ajustar essa porcentagem de forma que o decréscimo da curva de e_6 fosse menos abrupto. Dessa forma, realizou-se uma simulação adicional mantendo-se todas as condições da simulação anterior, mas alterando-se a porcentagem de ajuste de fluxo para 0,1%. O resultado é apresentado a seguir.

Figura 6.39 – Resultados da simulação 13b: erros relativos.

Figura 6.40 – Resultados da simulação 13b: frequências de operação das máquinas.

Na Figura 6.39 nota-se que o comportamento cíclico foi substituído por uma oscilação de baixa amplitude e alta frequência em torno do nível zero do estoque q_6 . O ponto de inflexão das curvas e_4 e e_5 representa o momento em que as frequências de operação das máquinas 7, 8, 9 e 10 são reduzidas, conforme pode ser observado na Figura 6.40. Essa redução faz com que a taxa de acúmulo de material nas máquinas 4 e 5 aumente.

Observando-se as Figuras 6.38 e 6.39 é razoável supor que os resultados ainda possam ser otimizados mediante um melhor ajuste dos parâmetros. Observa-se que o nível de estoque q_6 é bastante sensível a uma pequena redistribuição de fluxo. Assim, se a porcentagem de

redistribuição for ainda menor, ou seja, da ordem de 0,01% e se o ponto de inversão da inclinação da curva de e_6 for definido como 0 ao invés de -0,2, supõe-se que seja possível deslocar o ponto de intersecção entre as curvas e_6 , e_4 e e_5 , fazendo com que as mesmas se interceptem após o ponto de inflexão das curvas e_4 e e_5 (em torno de $t = 50$ dias). A partir desse ponto de intersecção das três curvas, o controlador é programado para reestabelecer a condição inicial de distribuição de fluxo. A seguir apresentam-se os resultados obtidos com esses ajustes.

Figura 6.41 – Resultados da simulação 14: níveis de estoque.

Figura 6.42 – Resultados da simulação 14: frequências de operação das máquinas.

Figura 6.43 – Resultados da simulação 14: erros relativos.

Como pode ser visualizado na Figura 6.43, os resultados obtidos na simulação são melhores em relação aos obtidos nas simulações 12 e 13. Obteve-se um erro relativo máximo, e_6 , de aproximadamente 12,6%. Os erros associados aos demais estoque são praticamente nulos, com exceção de e_4 e e_5 , que valem, respectivamente, -4,7% e -8%. O equilíbrio é atingido em cerca de 240 dias. Durante todo o regime transiente, as máquinas funcionam de forma estável, pois não ocorrem oscilações em sua frequência de processamento.

Do ponto de vista gerencial, a estratégia de redistribuição de fluxo é interessante, justamente por que evita variações significativas na frequência de operação das máquinas. Conforme já discutido, tais variações, tanto para cima quanto para baixo, implicam custos operacionais, associados à subutilização ou superutilização de capacidade. É preferível realocar material não acabado entre estações do que alterar as frequências de operação das máquinas. Para que isso seja realizado na prática, deve-se dispor de material com as especificações corretas, em termos de título e batimento, por exemplo, para redistribuição entre as estações. Assim, a análise realizada com o modelo proposto fornece diretrizes gerais de controle que necessitam ser combinadas com uma programação adequada da produção, que aborde detalhes como cor, título, batimento e dimensões dos produtos fabricados.

Em termos econômicos, o período de 240 dias úteis requerido para o equilíbrio do sistema pode ser considerado demasiadamente longo. Assim, deve-se buscar controladores que minimizem esse tempo. Entretanto, deve-se ressaltar que este é o tempo necessário para que os estoques atinjam os níveis estipulados, não estando diretamente associado ao

atendimento da demanda. Mesmo que tais níveis de estoque não tenham sido atingidos, há produtos acabados saindo continuamente do sistema, com a frequência de regime permanente ou frequências muito próximas desta. Isso garante o atendimento das demandas, mesmo no regime transiente.

6.4 Discussões

O sistema estudado apresenta um número relativamente grande de variáveis e parâmetros. Além disso, a distribuição de fluxo no sistema também é complexa. Em problemas convencionais de programação de operações (*Scheduling*), sabe-se que o ambiente do tipo *job shop*, em que os produtos fabricados não seguem o mesmo roteiro de processos, é um caso difícil de ser resolvido, em termos de modelagem matemática e complexidade computacional. Por essas características citadas, percebe-se que o projeto de controladores para o sistema estudado não é uma tarefa trivial.

Entende-se que o modelo proposto tenha alcançado o objetivo delineado para este trabalho, uma vez que permitiu representar a dinâmica de um sistema de manufatura de múltiplos produtos. Além disso, o uso da metodologia dos grafos de ligação permitiu que o sistema fosse equacionado e implementado com o auxílio de um software de simulação. As simulações realizadas propiciaram o entendimento de alguns aspectos do comportamento do sistema.

Na análise conduzida neste trabalho, focou-se no estudo do regime transiente, considerando-se todos os estoques iniciais nulos. Dentre as simulações realizadas, os melhores resultados foram obtidos com o emprego de um controlador híbrido, agindo de forma constante em um período inicial e depois atuando de forma proporcional. A estratégia de redistribuição de fluxo em um ponto específico do sistema, aplicada de forma conjunta a este controlador, aumentou a eficácia do controle.

A modelagem desenvolvida apresenta algumas vantagens quando comparada a outros métodos. Um primeiro ponto a ser levantado refere-se à universalidade da linguagem dos grafos de ligação. No modelo realizado, foi empregada uma linguagem de Modelagem de Sistemas Dinâmicos que permite aos especialistas nessa área, mesmo que desconhecendo o problema específico de PCP, discutir suas características dinâmicas. Além disso, a

modelagem empregada permitiu que se obtivesse um modelo de sistema que possibilita a aplicação de técnicas de controle para melhorar o desempenho do sistema.

Outra característica interessante está relacionada à possibilidade de representar a produção de todas as famílias de produtos em um modelo unificado, em contraste com outros métodos de mapeamento, como o Mapeamento de Fluxo de Valor, ou VSM. Este método é utilizado dentro da Metodologia de Produção Enxuta, para alinhamento das taxas de produção e de demanda e para o controle da produção por meio da ferramenta *kanban* (cartões). Entretanto, o uso de tal método em ambiente *job shop* requer a elaboração de um mapa separado para cada família de produtos fabricada. No modelo desenvolvido, a possibilidade de se analisar produção das famílias de produto simultaneamente, permite calcular a carga total de trabalho requerida das máquinas. A frequência de operação das máquinas no regime permanente, obtida por meio da solução do sistema linear, fornece uma estimativa desta carga total de trabalho. O Controle de Carga de Trabalho, ou *Workload Control* (WLC) é uma área do PCP essencial para empresas como a estudada, que trabalham sob encomenda (MTO) e com fluxo *job shop*. Ainda nessa linha, salienta-se que o equacionamento do modelo proposto também explicita as relações de interdependência entre os elementos produtivos, reforçando essa análise integrada.

Deve-se destacar também que muitas das ferramentas utilizadas em Engenharia de Produção consideram sistemas ou situações estáticas, com exceção da Teoria de Filas e da Simulação de eventos discretos. O modelo apresentado permite analisar a resposta do sistema em um ambiente dinâmico. A vantagem desse modelo em relação à simulação convencional é que, com a primeira, é possível analisar a resposta do sistema considerando-se diferentes cenários, mas não é possível controlar o sistema automaticamente. Na simulação convencional, não se realiza uma realimentação automática das respostas observadas para modificar seu comportamento. A realimentação é feita pelo próprio analista com base, na maioria das vezes, em tentativa e intuição. A teoria de controle ligada às áreas de Engenharia Mecânica, Elétrica e Mecatrônica dispõe de um conjunto de ferramentas para o projeto sistemático de controladores visando atender diversos objetivos. A forma como o problema de manufatura foi modelado permite que se faça uso dessas ferramentas.

No modelo proposto, a solução em regime permanente fornece estimativas da frequência ideal mínima de operação das máquinas, pois não foram considerados, por exemplo, tempos de *setup* (preparação) das máquinas. Esses tempos de parada implicam que as máquinas, em períodos seguintes, tem que funcionar com frequências superiores à mínima

ideal. Em muitos sistemas produtivos, os tempos de preparação de algumas máquinas ou operações são bastante significativos. Prevê-se que esses elementos como o tempo de *setup* ou o tempo de parada para manutenção, por exemplo, possam ser incorporados ao modelo, ou seja, seu nível de detalhamento pode ser aprofundado para representar outros aspectos e parâmetros relevantes do sistema de produção. Também é possível representar tais elementos como eventos ocorridos no decorrer da simulação, em momentos programados ou aleatórios. Na realidade, a partir do momento em que se obtém um controle satisfatório do sistema operando em condições normais, é possível com o modelo proposto, simular a quebra de máquinas, paradas por falta de matéria-prima ou paradas para manutenção, por exemplo.

A pesquisa qualitativa realizada nesse trabalho, na forma de um estudo de casos múltiplos, foi importante para levantar aspectos relacionados à prática do PCP nas empresas, para que alguns desses aspectos fossem considerados no desenvolvimento do modelo. O estudo de casos múltiplos demonstrou que, para as empresas analisadas, os níveis de serviço e os níveis de estoque são os indicadores de desempenho mais relevantes à função de Planejamento e Controle da Produção. O modelo desenvolvido está alinhado a estes resultados, uma vez que o sistema é controlado para garantir níveis adequados de estoque em processo. Esses estoques, sendo mantidos no nível adequado, garantem que o sistema opere de forma estável, minimizando o *lead time* de produção e garantindo que os clientes sejam atendidos com as quantidades e especificações corretas, no prazo acordado. Em outras palavras, a definição adequada dos níveis de estoque em processo garante um bom nível de serviço ao cliente, sem incorrer em custos excessivos. Além disso, na solução do modelo proposto, impôs-se como condição básica que o sistema de produção atendesse a demanda de cada família em regime permanente, isto é, no médio prazo. Tal condição também concorre para a obtenção de um bom nível de serviço ao cliente.

O estudo dos casos também mostrou que incertezas relacionadas à demanda, ao fornecimento externo e ao fornecimento interno podem afetar significativamente o nível de reprogramações da produção, afetando o desempenho geral da empresa, em termos operacionais e financeiros. Assim, tais incertezas são um fator relevante a ser considerado nos modelos de sistemas produtivos. A representação da dinâmica de um sistema de produção utilizando linguagem de Modelagem de Sistemas dinâmicos é adequada para se estudar e controlar a reação do sistema a essas incertezas.

Conforme já mencionado, o modelo proposto é integrado, uma vez que representa, de forma conjunta e interdependente, os recursos e fluxos necessários à produção de todo o

conjunto produtos comercializado pela empresa. A produção desse conjunto de produtos requer o compartilhamento de instalações produtivas e recursos concorrentes, o que obviamente impõe restrições de capacidade à programação. O controle implantado no modelo proposto atende a essas restrições de capacidade, uma vez que as informações relativas às várias famílias de produtos e às instalações produtivas estão centralizadas e são processadas simultaneamente. Dessa forma, o modelo promove a melhoria da Qualidade da Informação disponível para o planejamento, a qual, por sua vez, impacta significativamente o desempenho do PCP, conforme observado na pesquisa qualitativa realizada.

No processo convencional de planejamento e controle da produção, gera-se um plano ou programação inicial da produção e, em seguida, executa-se uma análise de capacidade para verificar a viabilidade física e econômica de tal plano ou programação. Caso as restrições de capacidade e custos tenham sido violadas, ajusta-se o plano até que se atinja uma solução viável e satisfatória. No processo convencional, esse processo é feito de forma empírica ou por meio de heurísticas. Além disso, nem sempre é a mesma pessoa ou a mesma equipe que ficam responsáveis por ambas as atividades, ou seja, a programação/planejamento e a análise de capacidade. O modelo proposto garante a integração entre essas duas atividades do PCP, uma vez que, no modelo, tais atividades são realizadas automaticamente.

O Quadro 6.4 resume os aspectos discutidos, os quais caracterizam o alinhamento entre a pesquisa qualitativa realizada e o modelo dinâmico desenvolvido.

Quadro 6.4 – Alinhamento entre a pesquisa qualitativa realizada e o modelo dinâmico desenvolvido.

Pesquisa qualitativa - resultados		Modelo dinâmico	
<ul style="list-style-type: none"> Indicadores de desempenho considerados relevantes para o PCP: nível de serviço e nível de estoque 	↔	<ul style="list-style-type: none"> Concorre para o atendimento das demandas na quantidade e momento adequados (i.e., para um bom nível de serviço) Tem como objetivo o controle dos níveis de estoque em processo 	
<ul style="list-style-type: none"> Reprogramações e incerteza: elementos intrínsecos à prática do PCP, com os quais o PCP deve ser capaz de lidar 	↔	<ul style="list-style-type: none"> Capaz de responder às incertezas e controlar a produção automaticamente 	
<ul style="list-style-type: none"> Importância da qualidade da informação disponível para o planejamento 	↔	<ul style="list-style-type: none"> Modelo integrado, centraliza as informações das várias famílias de produtos 	
<ul style="list-style-type: none"> Importância da integração interfuncional e intrafuncional (entre as atividades do PCP) 	↔	<ul style="list-style-type: none"> Considera as relações de interdependência na produção simultânea das famílias - restrições de capacidade; integração entre as atividades de programação da produção e análise de capacidade 	

O intuito de se desenvolver este tipo de modelo não é realizar o projeto físico de controladores para de fato modificar a frequência de operação das máquinas. Como dito anteriormente, os valores observados na simulação do sistema fornecem diretrizes gerenciais para decisões sobre tempos de parada e tempos de operação das máquinas. Esses valores indicam uma frequência ideal média com a qual cada máquina deveria operar em diferentes momentos. A partir deles, é possível definir o período máximo em que determinada tarefa deve ser executada ou intervalos de tempo nos quais a máquina pode ficar ociosa ou deve estar operando com sua velocidade padrão. Com as simulações, pode-se também prever o desempenho do sistema calculando-se o valor de alguns indicadores tradicionais da área de produção, como a utilização das máquinas, ou seja, a razão percentual entre seu tempo efetivo de operação e o tempo total disponível e o nível de estoque em processo, WIP (*Work In Process*).

Conclusão

Neste trabalho foram desenvolvidas duas linhas de pesquisa relativamente distintas em termos de objetivos e métodos, mas que apresentam objetivos interligados e âmbito de análise comum. A primeira linha de pesquisa, de cunho qualitativo e descritivo, visou investigar as variáveis integração organizacional, incerteza ambiental, qualidade de informação e desempenho no âmbito da função de Planejamento e Controle da Produção (PCP) de empresas de manufatura. A segunda pesquisa realizada, de caráter quantitativo, teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo dinâmico de controle automático da produção, capaz de reagir a incertezas do ambiente, e executar reprogramações.

Na pesquisa qualitativa, buscou-se avaliar a influência das três primeiras variáveis citadas no desempenho da função de PCP e no desempenho geral da empresa. Para tanto, além de se realizar um levantamento das principais métricas de desempenho utilizadas para avaliação da função PCP, analisou-se o desempenho de tal função em termos de nível de reprogramações e qualidade de planejamento. Tal pesquisa qualitativa foi realizada utilizando-se o método de estudo de casos múltiplos.

A análise individual de cada caso permitiu observar com detalhes algumas relações de integração dentro da função de PCP e entre o PCP e outras funções, como a função de Vendas e Engenharia. A existência de tais relações foi constatada por meio de situações práticas e casos relatados pelos entrevistados, e não só por meio de respostas a perguntas fechadas. Os dados coletados foram sintetizados para gerar também uma análise comparativa dos casos, que permitiu:

- destacar diferenças na estrutura organizacional que envolve a área de PCP e avaliar o impacto dessas diferenças na integração interfuncional;
- observar dez mecanismos de integração distintos empregados pelas empresas;
- avaliar o nível de integração interna das empresas, nas dimensões técnica e organizacional, a partir da perspectiva dos gerentes ou supervisores de PCP;
- identificar as fontes de incerteza mais relevantes para o PCP de cada empresa;
- identificar a frequência e as causas de reprogramações nas diferentes empresas;
- identificar os principais indicadores de desempenho da função de PCP;

- contrastar os diferentes graus de prioridade dados pelas empresas aos objetivos de desempenho custo, qualidade, velocidade, confiabilidade e flexibilidade;
- levantar evidências das relações entre os constructos integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho, sendo este último avaliado tanto em termos de reprogramações quanto em termos de confiabilidade e custo.

As principais conclusões relacionadas aos tópicos supracitados são apresentadas a seguir.

- Os mecanismos de integração mencionados direta ou indiretamente pelos entrevistados foram: sistema de informação, comunicação e reuniões, padronização de atividades e responsabilidades, porte da empresa, cultura organizacional, presença de pessoas ou cargos com função integradora, estrutura organizacional, apoio da alta direção, existência do processo de Planejamento de Vendas e Operações (S&OP) e alinhamento de indicadores entre diferentes funções. Alguns destes mecanismos são comuns a mais de uma empresa, e a maioria deles é mencionada na literatura.
- Todas as empresas pesquisadas apresentaram um nível alto de integração organizacional, conseguido por meio dos diferentes mecanismos de integração mencionados. Esse resultado pode estar associado ao fato de as empresas selecionadas serem líderes em seus ramos de atuação. Com relação à dimensão técnica, duas das empresas apresentaram um nível um pouco maior de integração em relação às demais, pois seus sistemas de informação tinham um grau maior de compatibilidade.
- Para empresas que operam com sistemas de produção para estoque (MTS), as variações na demanda são tidas como a principal fonte de incerteza. Durante o estudo, foram identificadas duas fontes adicionais de incerteza que não haviam sido originalmente consideradas no protocolo de coleta de dados: a alta variedade de itens produzidos e o crescimento acelerado das vendas e operações da empresa. Duas das empresas do estudo estavam sujeitas a essas fontes de incerteza.
- As empresas estudadas que trabalhavam com sistema de produção para estoque (MTS) declararam fazer reprogramações com frequência diária ou de mais de uma vez por semana. As variações na carteira de pedidos, ou seja, na demanda de curtíssimo prazo, foram citadas como a causa primária das reprogramações. Em segundo lugar, foram destacadas as falhas de suprimento interno ou as deficiências de comunicação entre as funções de PCP e Vendas/*Marketing*. Este último fator mencionado está relacionado à

qualidade da informação, uma vez que essas dificuldades de comunicação entre funções geravam informações com baixa acurácia para o planejamento.

- Nas empresas estudadas, o nível de serviço e o nível de estoque foram destacados como os principais indicadores de desempenho relativos à função de PCP. Em duas das empresas, apenas um desses dois indicadores era cobrado; nas demais, o desempenho era medido por ambos os indicadores. Em uma das empresas, a acurácia das previsões também era monitorada.
- Observou-se a existência de uma relação positiva entre integração e desempenho em três empresas analisadas. Dentre essas, duas tiveram que aumentar significativamente o volume total de produção em um período relativamente curto, e conseguiram, concomitantemente, manter ou melhorar o nível de serviço. Nesses casos, constatou-se que a integração interna foi o principal elemento gerador do resultado obtido. Em resumo, a pressão por crescimento condicionou a intensificação da integração, que resultou na melhoria do desempenho. As incertezas relacionadas a esse crescimento, portanto, atuaram como uma variável contingencial para o fortalecimento da integração.
- A situação mencionada no tópico anterior também evidenciou a presença da qualidade da informação como um elemento intermediário na relação entre integração e desempenho. Segundo os relatos apresentados, pode-se observar que a integração gerou a melhoria da qualidade de informação disponível para o planejamento, que por sua vez causou a diminuição da ocorrência de reprogramações devido a falhas internas, resultando na melhoria do desempenho em termos de nível de serviço e inventário. Em uma das empresas, a melhoria na qualidade da informação significou maior acurácia nas previsões de demanda, causada pela aproximação entre as funções de PCP e Vendas; em outra, a integração entre as áreas de PCP e de Engenharia Industrial possibilitou a melhoria da qualidade das informações de roteiro de processo, tempo de fila e utilização das máquinas.
- Os entrevistados também descreveram situações que ilustram a relação inversa entre integração, qualidade da informação e desempenho, na qual a falta de incentivo à comunicação entre as funções de PCP e Vendas resultava em previsões com menor acurácia e planejamento menos eficaz.

O modelo dinâmico de controle da produção, referente à segunda linha de pesquisa explorada nesse trabalho, foi desenvolvido com base na teoria de Modelagem de Sistemas

Dinâmicos e na metodologia dos Grafos de Ligação. O objeto da modelagem foi um sistema real de produção de embalagens de rafia, que apresenta onze máquinas distintas e fluxo *job shop*. O *mix* de produtos fabricados no sistema foi dividido em nove famílias, cada qual com uma determinada demanda e roteiro de produção. Para a modelagem, desenvolveu-se um modelo físico do sistema (modelo esquemático) e um modelo de grafos de ligação, a partir do qual foram derivadas as equações de estado. O sistema foi simulado utilizando-se Matlab® e Simulink®.

No modelo proposto, as variáveis de controle são as frequências de operação das máquinas, e o objetivo do controle é manter os estoques em processo que antecedem cada máquina próximos dos valores desejados. Um conjunto de 14 simulações foi realizado, variando-se o tipo de controlador e alguns de seus parâmetros. Tais simulações foram conduzidas não apenas com o objetivo de encontrar um controlador adequado para o sistema, mas sobretudo analisar seu comportamento, explorar suas características dinâmicas e sua resposta. As conclusões derivadas das simulações realizadas são apresentadas a seguir.

- As soluções encontradas para as equações do modelo em regime permanente foram consistentes e garantem o atendimento das demandas das nove famílias de produtos, no médio prazo. Para se obter a solução do sistema em regime permanente, impôs-se a condição de que os fluxos de produção diários de cada família de produtos deveriam atender às respectivas demandas diárias. O acréscimo dessas equações ao conjunto de equações de estado resultou em um sistema linear sobredeterminado, uma vez o sistema de manufatura abrange nove famílias de produtos. Assim, foram geradas várias soluções, cada qual com a utilização de uma equação de demanda de uma dada família. As soluções obtidas foram muito próximas entre si, demonstrando que o modelo é consistente.
- Na simulação do comportamento do sistema sem controle, observou-se que ocorre um acúmulo de material em um nível determinado, sendo que este nível é diferente para cada estoque intermediário do sistema. Para os estoques intermediários que são antecidos por uma única máquina, observou-se que esse nível é proporcional à frequência de operação da máquina antecedente, no regime permanente, e à quantidade percentual de fluxo encaminhada ao estoque. Além disso, constatou-se que o valor desse coeficiente de proporcionalidade é 0,01.
- A partir das simulações, observou-se que a informação de controle do sistema é transmitida à montante, do final para o início, em sentido contrário ao fluxo físico de

material. Em outras palavras, o controle implantado faz com que o modelo opere como um sistema produção puxado. Além disso, constatou-se que o sistema apresenta uma inércia significativa, ou seja, como o processo produtivo apresenta várias etapas, um tempo relativamente alto é requerido para a transmissão da informação a cada etapa e para a reação do sistema.

- Foram realizados alguns testes nos quais se aplicou ao modelo proposto a mesma lógica de controle proposta por Ferney (2000), em que as frequências de operação das máquinas variam segundo degraus em torno da frequência de regime permanente, assumindo um conjunto restrito de valores discretos. Nos casos simulados, não se conseguiu um desempenho satisfatório com este tipo de controle. No regime transiente, partindo-se de estoques iniciais nulos, notou-se a tendência de acúmulo excessivo de material no último ponto de estoque intermediário do sistema. Entretanto, a utilização desse tipo de controlador não pode ser descartada; tal controlador pode se mostrar eficaz em algumas situações, dependendo das condições de contorno e do ajuste adequado de seus parâmetros. Uma avaliação mais consistente do desempenho deste controlador exige a realização de um maior número de testes e de um projeto sistemático de controle. Tais tópicos podem ser tratados em trabalhos futuros, conforme será discutido na seção 7.1.
- Os melhores resultados no regime transiente, dentre os resultados de todas as simulações realizadas, foram obtidos com a utilização de um controlador híbrido constante-proporcional. Nesse caso, parte-se da condição de estoques iniciais nulos, e as frequências de operação das máquinas são inicialmente mantidas em um nível constante, 2% acima do valor de regime permanente, até que um dado estoque intermediário esteja 20% abaixo do nível desejado. A partir daí, a frequência da máquina que antecede esse referido estoque intermediário passa a ser ajustada de forma proporcional ao erro relativo desse estoque. Este controlador híbrido gerou os melhores resultados, uma vez que quase todos os estoques atingiram o nível desejado, com exceção do estoque que antecede a máquina 6. No sistema modelado, as máquinas 4, 5 e 6 recebem partes do fluxo que sai da máquina 3. As máquinas 4 e 5 estão em paralelo, mas a máquina 6 não, pois executa uma operação muito diferente da realizada pelas outras duas, possuindo uma frequência de operação muito diferente. Supõe-se que esta seja a causa da dificuldade de controle deste ponto do sistema em especial.

- Obteve-se um melhor desempenho do sistema no ponto citado no tópico anterior mediante a aplicação do controle não só à frequência de operação das máquinas, mas também às porcentagens de divisão de fluxo. Observou-se que o estoque que antecede a máquina 6 tende a ser preenchido muito mais rapidamente do que o estoque que antecede as máquinas 4 e 5 e, quando isto ocorre, os valores dos erros relativos desses estoques se tornam muito discrepantes entre si. Nessa situação, as frequências de operação das máquinas são mantidas no nível em que se encontram, mas um segundo controlador reduz temporariamente a porcentagem de fluxo direcionado à máquina 6 e aumenta a porcentagem de fluxo direcionado às máquinas 4 e 5. A utilização dessa estratégia de controle gerou uma significativa redução do erro relativo do estoque 6. No caso dos estoques 4, 5 e 6, foram obtidos erros relativos em torno de 10% para mais ou para menos. Para os demais estoques, os níveis foram atingidos. Essa é uma estratégia interessante em termos práticos, pois significa que parte do produto não-acabado que seria encaminhado a uma dada máquina está sendo desviado para outras, a fim de atingir os níveis de estoque intermediário do sistema. Tal opção é desejável em comparação à variação da frequência de operação de uma dada máquina, pois quanto mais constante é a operação do sistema produtivo, menores são os custos operacionais.
- Notou-se ainda que o nível de estoque que antecede a máquina 6 é bastante sensível à estratégia mencionada de redistribuição de fluxo: uma modificação de 0,1% na porcentagem de distribuição de fluxo foi suficiente para a diminuição do nível do estoque da máquina 6 e equilíbrio entre o preenchimento dos estoques 4, 5 e 6.
- Deve-se mencionar que os resultados apresentados nesses três tópicos anteriores se aplicam ao conjunto de simulações realizadas, considerando-se os parâmetros e as condições de contorno definidas nesta pesquisa. O aprofundamento desta análise requer a realização de um projeto sistemático de controle, tópico que deve integrar o escopo de pesquisas futuras, a ser apresentado na seção 7.1.

Além das constatações específicas acerca do comportamento do sistema estudado, o desenvolvimento do modelo dinâmico de controle da produção demonstrou a viabilidade do uso da metodologia dos grafos de ligação para modelagem de sistemas de controle da produção de múltiplos produtos no nível de chão de fábrica. Como vantagens desse tipo de modelagem em relação a outras técnicas convencionais, podem ser destacadas:

- a facilidade para obtenção do modelo matemático a partir do modelo de grafos;

- a universalidade da linguagem de modelagem, no sentido em que a dinâmica do sistema de produção pode ser entendida por todos aqueles que conhecem a linguagem, mesmo que pertencentes a áreas externas à Engenharia de Produção;
- a possibilidade de representação conjunta da produção de múltiplas famílias de produtos, em um único diagrama ou mapa. Nesse ponto, a metodologia de modelagem utilizada é diferente da metodologia de Mapeamento de Fluxo de Valor (*Value Stream Mapping*), utilizada na Produção Enxuta, na qual é necessário realizar mapas de fluxo de valor separados para cada família de produtos;
- a consideração das relações de interdependência envolvidas na produção de múltiplos produtos, permitindo a contabilização da carga de trabalho total requerida do sistema. Essa característica é consequência da possibilidade de representação conjunta mencionada no item anterior. Uma das características principais dos sistemas *job shop* consiste no compartilhamento dos recursos produtivos entre uma gama variada de produtos, e a otimização das decisões de alocação de carga de trabalho é um dos principais objetivos da gestão deste tipo de sistema produtivo. O modelo proposto concorre para o alcance deste objetivo.

Por fim, uma característica específica da Modelagem de Sistemas Dinâmicos não existente nas técnicas convencionais de simulação refere-se exatamente à possibilidade de controlar automaticamente o sistema, por meio de realimentação. Com os métodos convencionais utilizados em Engenharia de Produção, como a simulação de Monte Carlo, é possível analisar o comportamento estocástico do sistema, mas não alterá-lo automaticamente durante a simulação. As intervenções e ajustes são feitos pelo próprio usuário, muitas vezes com base em tentativa e erro, antes de se iniciar uma nova rodada de simulação. A Modelagem de Sistemas Dinâmicos permite a aplicação de técnicas da Teoria de Controle para o projeto e otimização de controladores.

A pesquisa qualitativa deste trabalho foi conduzida com o principal intuito de fornecer bases para o desenvolvimento de um modelo de controle da produção que estivesse bem alinhado ao contexto do Planejamento de Controle da Produção executado nas empresas, um modelo aderente às situações práticas enfrentadas pela função de PCP. A partir dessa pesquisa, constatou-se que as reprogramações são elemento intrínseco à prática do PCP, e que o nível de serviço e nível de estoque são indicadores de desempenho relevantes à essa função de negócio. Com base nesses resultados, desenvolveu-se um modelo de controle da produção capaz de responder dinamicamente a mudanças e executar reprogramações de forma

automática, de forma a atender às demandas previstas e manter os estoques em processo próximo de níveis desejados. Portanto, o modelo proposto está alinhado aos objetivos tidos como relevantes ao PCP, já que o atendimento das demandas nos momentos adequados resulta em bons níveis de serviço e evita a formação de estoques excessivos. Além disso, a característica principal desse modelo, conforme mencionado, é a capacidade de responder à ocorrência de incertezas ambientais e incertezas do sistema de produção, como mudanças na demanda, quebras de máquinas, falta de matérias-primas, entre outras discutidas neste trabalho. A pesquisa qualitativa realizada mostrou que tais incertezas afetam significativamente o desempenho da função PCP, pois se constituem causas relevantes de reprogramações.

Conforme já mencionado, o modelo desenvolvido também é integrado, pois considera, de forma conjunta e interdependente, os recursos e fluxos necessários à produção de todo o conjunto produtos comercializado pela empresa analisada. No caso modelado, a produção das famílias de produtos requer o compartilhamento das mesmas instalações produtivas, e portanto, as decisões relativas a uma determinada família afetam as demais. No modelo, há uma centralização e integração das informações relativas às várias famílias de produtos. Ao considerar essas relações de interdependência, obtêm-se informações de melhor qualidade para a programação (de curto prazo) e o controle da produção. Em resumo, o modelo promove a melhoria da Qualidade da Informação disponível para a programação e controle.

Pelos motivos apresentados, pode-se perceber que o modelo desenvolvido está alinhado a algumas das necessidades da função de Planejamento e Controle da Produção, observadas na prática, por meio de pesquisa qualitativa. Esse alinhamento entre o modelo quantitativo e a pesquisa qualitativa está mostrado no quadro-resumo do capítulo 6, item 6.4.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados da pesquisa qualitativa realizada e nas contribuições dos entrevistados, elaborou-se um questionário com perguntas fechadas para a investigação objetiva das relações entre integração, incerteza, qualidade da informação e desempenho. Assim, como possibilidade de trabalho futuro sugere-se a realização de um levantamento

(*survey*) para ampliação da abrangência dessa pesquisa iniciada por meio do estudo de casos múltiplos.

A modelagem desenvolvida na etapa quantitativa do trabalho abriu espaço para pesquisas futuras especialmente no que tange ao projeto de controladores mais eficazes ao sistema de manufatura estudado, ao aprofundamento do nível de detalhamento do modelo proposto e à criação de cenários para simulação. Assim, como possibilidades de extensão e melhoria do modelo dinâmico proposto, apontam-se:

- a proposição e teste de outros tipos de controladores, como controladores proporcionais integrais derivativos (PID) e outros, para melhorar o desempenho do sistema em termos de diminuição do sobressinal, tempo de estabilização e erro dos estoques em relação aos níveis desejados;
- a modelagem de outros sistemas de produção reais com configurações de fluxo diferentes, como máquina única, máquinas paralelas, *flow shop* com e sem máquinas paralelas, *job shop* com e sem máquinas paralelas, *batch shop* e *open shop*;
- o detalhamento do modelo proposto mediante a inclusão de outros parâmetros relevantes à produção, como tempo de preparação (*setup*) das máquinas, taxa desejada de utilização, tempos de espera, bloqueio de máquinas etc.;
- a execução do controle dos estoques finais do sistema. No sistema proposto, as saídas de produtos de cada família são livres, ou seja, considera-se que os estoques finais tenham capacidade de armazenamento ilimitada e que o escoamento de material nas saídas do sistema seja livre. Para controlar tais estoques finais, levantou-se duas possibilidades. A primeira delas consiste na criação de estoques com capacidade finita, por meio da analogia com capacitores de carga finita. A segunda, criação de estações de trabalho fictícias nos ramos em que há saída de produtos no sistema. Em tais estações, a frequência de operação de cada máquina fictícia deve ser exatamente a frequência demandada para a respectiva família de produtos correspondente àquela máquina. Ao se determinar um nível desejado para o estoque que antecede a máquina fictícia, estar-se-ia, na prática, definindo um nível de estoque de segurança desejado para cada família de produtos finais;
- a expansão das possibilidades de controle do sistema por meio do ajuste momentâneo das porcentagens de fluxo encaminhado a cada máquina. Esta questão é especialmente relevante quando há máquinas em paralelo com certa porcentagem de capacidade ociosa. Assim, a quebra de uma dada máquina pode ser compensada por meio da

redistribuição automática do fluxo que iria para tal máquina às demais máquinas paralelas. Nesse trabalho, aplicou-se esta estratégia de controle de forma pontual, em apenas uma máquina. Há espaço para aprofundar esta ideia em pontos onde há máquinas em paralelo;

- a mudança do modelo básico de grafos de ligação utilizado para representar a estação de trabalho, de modo que tal estação passe a ter estoques intermediários com capacidade finita. A estação de trabalho, unidade básica do modelo atual, possui um estoque com capacidade ilimitada. Com isso, a variável de esforço da metodologia dos grafos de ligação tende a zero nesse ponto do sistema. A consideração de estoques com capacidade finita implicaria mudanças no modelo de grafos, e faria com que existisse transmissão de potência nesse ponto, com variáveis de fluxo e esforço não nulas. Isso estaria mais alinhado ao princípio básico da metodologia, que é justamente a transmissão de potência entre os elementos. Além disso, permitiria representar uma condição real ocorrente nas plantas de manufatura, que é a restrição de espaço físico para armazenagem;
- a exploração ostensiva das capacidades de resposta do modelo, por meio da criação de cenários distintos de simulação, considerando quebras de máquinas distintas em diversos momentos e considerando o aumento ou diminuição da demanda de determinadas famílias de produtos.

Referências

- ANAND, G.; WARD, P. T. Fit, flexibility and performance in manufacturing: Coping with dynamic environments. **Production & Operations Management**, v. 13, n. 4, p. 369-385, 2004.
- AYTUG, H. et al. Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions. **European Journal of Operational Research**, v. 161, n. 1, p. 86-110, 2005.
- BAGCHI, P. K.; SKJOETT-LARSEN, T. Organizational integration in supply chains: a contingency approach. **Global Journal of Flexible Systems Management**, v.3, n. 1, p. 1-10, 2002.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and simulations: operations management research methodologies using quantitative modelling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, p.241-264, 2002.
- BLACKBURN, J. D. **Time-Based Competition**: the next battleground in American manufacturing. New York: McGraw-Hill/Irwin, 1991.
- BOURGEOIS, L. J. Strategy and environment: a conceptual integration. **Academy of Management Review**, v. 5, n. 1, p. 25-39, 1980.
- BOWERSOX, D.; CLOSS, D.; STANK, T. How to master cross-enterprise collaboration. **Supply Chain Management Review**, v. 7, n. 4, p. 18-27, 2003.
- CAUCHICK MIGUEL, P. A. A adoção do estudo de caso na engenharia de produção. In: CAUCHICK MIGUEL, P. A. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. cap. 6, p. 129-143.
- CHEN, H.; MANDELBAUM, A. Hierarchical Modeling of Stochastic Networks, Part I: Fluid Models. In: YAO, D. D. (Ed.). **Stochastic Modeling and Analysis of Manufacturing Systems**. New York: Springer, 1994, p. 47-105.
- CHO S.; ERKOC, M. Design of predictable production scheduling model using control theoretic approach. **International Journal of Production Research**, v. 47, n.11, p. 2975-2993, 2009.

CHO S.; LAZARO A. Control theoretic model using PID controller for just-in-time production scheduling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 51, n. 5-8, p. 699-709, 2010.

CHO, S; PRABHU, V. V., Distributed adaptive control of production scheduling and machine capacity. **Journal of Manufacturing Systems**. v. 26, p. 65–74, 2007.

CLOSS, D. J.; GOLDSBY, T. J.; CLINTON, S. R. Information technology influences on world class logistics capability. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 27, n. 1, p. 4-17, 1997.

CORREA, H. L.; GIANESI, I.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção**. 5th ed. São Paulo: Atlas, 2007.

DAUGHERTY, P. J.; MYERS, M. B.; AUTRY, C. W. Automatic replenishment programs: an empirical examination. **Journal of Business Logistics**, v. 20, n. 2, p. 63-82, 1999.

DAVIS W. J.; THOMPSON, S. D. Production planning and control hierarchy using a generic controller. **IEE Transactions**, v. 25, p. 26-45, 1993.

DE SNOO, C.; VAN WEZEL, W.; JORNA, R. J. An empirical investigation of scheduling performance criteria. **Journal of Operations Management**, v. 29, n. 3, p. 181-193, 2011.

DEJONCKHEERE, J. et al. Transfer function analysis of forecasting induced bullwhip in supply chains. **International Journal of Production Economics**, v. 78, n. 2, p. 133-144, 2002.

DEJONCKHEERE, J, et al. Measuring and avoiding the bullwhip effect: a control theoretic approach. **European Journal of Operational Research**, v. 147, p. 567-590, 2003.

DESS, G. G.; BEARD, D. W. Dimensions of organizational task environments. **Administrative Science Quarterly**, v. 29, n. 1, p. 52–73, 1984.

DISNEY, S. M.; NAIM, M. M.; TOWILL, D. R. Genetic algorithm optimization of a class of inventory control systems. **International Journal of Production Economics**, v. 68, p. 259-278, 2000.

DONALDSON, L. **The Contingency Theory of Organizations**. Thousand Oaks: Sage Publications, 2001.

DRAZIN, R.; VAN DE VEN, A. H. Alternative forms of fit in contingency theory. **Administrative Science Quarterly**, v. 30, n. 4, p. 514–539, 1985.

DROGE, C.; JAYARAM, J.; VICKERY, S. K. The effects of internal versus external integration practices on time-based performance and overall firm performance. **Journal of Operations Management**, v. 22, p. 557–573, 2004.

DUNCAN, R. B. Characteristics of organizational environments and perceived environmental uncertainty. **Administrative Science Quarterly**, v. 17, p. 313–327, 1972.

EDGHILL, J; TOWILL, D. R. Assessing manufacturing system performance: frequency response revisited. **Engineering Costs and Production Economics**, v. 19, p. 319-326, 1990.

EVANS, G. N.; NAIM, M. M.; TOWILL, D. R. Application of a simulation methodology to the redesign of a logistical control system. **International Journal of Production Economics**, v. 56-57, p. 157-168, 1998.

FERNEY, M. Modelling and controlling product manufacturing systems using bond-graphs and state equations: Continuous systems and discrete systems which can be represented by continuous models. **Production Planning and Control**, v. 11, n.1, p. 7-19, 2000.

FIELD, J. M. et al. Uncertainty reduction approaches, uncertainty coping approaches, and process performance in financial services. **Decision Sciences**, v. 37, n. 2, p. 149-175, 2005.

FLYNN, B. B.; HUO, B.; ZHAO, X. The impact of supply chain integration on performance: a contingency and configuration approach. **Journal of Operations Management**, v. 28, p. 58–71, 2010.

FORSLUND, H.; JONSSON, P. The impact of forecast information quality on supply chain performance. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 27, n. 1, p. 90-107, 2007.

FROHLICH, M. T.; WESTBROOK, R. Arcs of integration: an international study of supply chain strategies. **Journal of Operations Management**, v. 19, p. 185–200, 2001.

FYNES, B.; DEBUİRCA, S.; MARSHALL, D. Environmental uncertainty, supply chain relationship quality and performance. **Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 10, n. 4–5, p. 179–190, 2004.

GERMAIN, R.; CLAYCOMB, C.; DROGE, C. Supply chain variability, organizational structure, and performance: the moderating effect of demand unpredictability. **Journal of Operations Management**, v. 26, p. 557–570, 2008.

GREGORY, A. Moving forward in harmony with S&OP. **Works Management**, v. 52, n.4, p. 34-37, 1999.

GRIMSON, J. A.; PYKE, D. F. Sales and operations planning: an exploratory study and framework. **The International Journal of Logistics Management**, v. 18, n. 3, p. 322-346, 2007.

GRUBBSTRÖM, R. W.; OVRIN, P. Intertemporal generalization of the relationship between material requirements planning and input–output analysis. **International Journal of Production Economics**, 26, 311–318, 1992.

GRUBBSTRÖM, R. W.; MOLINDER, A. Further theoretical consideration on the relationship between MRP, input–output analysis and multi echelon inventory systems. **International Journal of Production Economics**, v. 35, p. 299–311, 1994.

GRUBBSTRÖM, R. W.; MOLINDER, A. Safety production plans in MRP-systems using transform methodology. **International Journal of Production Economics**, v. 46-47, p. 297-309, 1996.

GRUBBSTRÖM, R. W.; TANG, O. An overview of input–output analysis applied to production-inventory systems. **Economic Systems Review**, v. 12, p. 3–25, 2000.

GRUBBSTRÖM, R. W.; WANG, Z. A stochastic model of multi-level/multi-stage capacity-constrained production–inventory systems. **International Journal of Production Economics**, 81–82, 483–494, 2003.

GRUBBSTRÖM, R. W. Algorithms for optimal dynamic lot sizing in discrete and continuous time. **International Journal of Agile Manufacturing**, v. 8, n. 2, p. 85–96, 2005.

GRUBBSTRÖM, R. W.; BOGATAJ, M.; BOGATAJ, L. Optimal lot sizing within MRP Theory. **Annual Reviews in Control**, v. 34, p. 89–100, 2010.

GUSTAVSSON, M. Information quality implications of planning process integration. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 19, n. 8, p. 933-952, 2008.

HAYES, R., PISANO, G., UPTON, D., WHEELWRIGHT, S. **Operations, Strategy and Technology: Pursuing the Competitive Edge**. New York: John Wiley, 2005.

HAYES, R. H., WHEELWRIGHT, S. C., 1984. **Restoring our competitive edge: competing through manufacturing**. New York: John Wiley, 1984.

HO, C. Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. **International Journal of Production Research**, v. 27, p. 1115–1135, 1989.

HOPP, M. L.; SPEARMAN, W. J. **Factory Physics-Foundations of Manufacturing Management**. Chicago: Irwin, 1996.

HYER, N.; WEMMERLÖV, U. **Reorganizing the Factory**. New York: Productivity Press, 2002.

KAHN, K. B.; MCDONOUGH, E. F. Marketing's integration with R&D and manufacturing: a cross-regional analysis. **Journal of International Marketing**, v. 5, n. 1, p. 51–76, 1997.

KAHN, K. B.; MENTZER, J. T. Marketing's Integration with other departments. **Journal of Business Research**, v. 42, p. 53–62, 1998.

KARNOPP, D. C.; MARGOLIS, D. L.; ROSENBERG, R. C. **System Dynamics: A Unified Approach**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1990.

KIM, J. G. et al. Quantifying the bullwhip effect in a supply chain with stochastic lead time. **European Journal of Operational Research**, v. 173, n.2, p. 617-636, 2006.

KOUFTEROS, X. A.; VONDEREMBSE, M.; JAYARAM, J. Internal and external integration for product development: the contingency effects of uncertainty, equivocality, and platform strategy. **Decision Sciences**, v. 36, n. 1, p. 97–133, 2005.

LAPIDE, L. Sales and operations planning Part II: enabling technology. **The Journal of Business Forecasting**, v. 23, n. 3, p. 18-20, 2005a.

LAPIDE, L. Sales and operations planning Part III: a diagnostic model. **The Journal of Business Forecasting**, v. 24, n. 1, p. 13-16, 2005b.

LEE, Y. W. et al. AIMQ: a methodology for information quality assessment. **Information & Management**, v. 40, n. 2, p. 133-146, 2002.

LEMAHIEU, W.; SNOECK, M.; CUMPS, B. Two basic types of business-to-business integration **International Journal of E-business Research**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2005.

LEONTIEF, W. ; DUCHIN, F.; SZYLD, D. B. New approaches in economic analysis. **Science**, v. 228, n.4698, p. 419-422, 1985.

LI, W. et al. A heuristic for adaptive production scheduling and control in flow shop production. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 11, p. 3151-3170, 2011.

LITTLE, J. D. C. A proof for the queuing formula $L=\lambda W$, **Operations Research**, v. 9, p. 383-387, 1961.

MASCARENHAS, B. Planning for flexibility. **Long Range Planning**, v. 14, n. 5, p. 78-82, 1981.

MINOTTI, E. M. **Desenvolvimento de um modelo de programação da produção em uma empresa do setor têxtil de embalagens de rafia**. 2011. 400 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro Universitário de Araraquara – UNIARA, Araraquara, 2011.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: CAUCHICK MIGUEL, P. A. (Org.), **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. São Paulo: Editora Campus, 2010.

MULA, J. et al. Models for production planning under uncertainty: a review. **International Journal of Production Economics**, v. 103, n. 1, 271–285, 2006.

NAHMIAS, S. **Production and Operations Analysis**. 4th ed. McGraw-Hill/Irwin, 2001.

NARASIMHAN, R.; KIM, S. W. Effect of supply chain integration on the relationship between diversification and performance: evidence from Japanese and Korean firms. **Journal of Operations Management**, v. 20, p. 303–323, 2002.

O'LEARY-KELLY, S. W. O.; FLORES, B. E. The integration of manufacturing and marketing/sales decisions: impact on organizational performance. **Journal of Operations Management**, v. 20, p. 221–240, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5th ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OKE, A. A framework for analysing manufacturing flexibility. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 25, n. 10, p. 973 – 996, 2005.

ORTEGA, M.; LIN, L. Control theory applications to the production-inventory problem: a review. **International Journal of Production Research**, v. 42, n.11, p. 2303-2322, 2004.

PAGELL, M. Understanding the factors that enable and inhibit the integration of operations, purchasing and logistics. **Journal of Operations Management**, v. 22, p. 459–487, 2004.

PEREZ, A. B. **Sistema de monitoramento do processo de fabricação em uma impressora de uma indústria do segmento têxtil de embalagens de rafia com a aplicação da simulação de eventos discretos**. 2012. 750 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro Universitário de Araraquara – UNIARA, Araraquara, 2012.

POPPLEWELL, K. E.; BONNEY, M. C. The application of discrete linear control theory to the analysis and simulation of multi-product, multi-level production control systems. **International Journal of Production Research**, v. 25, p. 45-56, 1987.

PORTER, M. E. **Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors**. New York: Free Press, 1980.

PRABHU, V. V.; DUFFIE, N. A. Nonlinear dynamics in distributed arrival time control of heterarchical manufacturing systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 1, n. 6, p. 724–730, 1999.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. **Metodologia de Pesquisa**. São Paulo: MacGrawHill, 2006.

SCHMENNER, R. W.; SWINK, M. L. On theory in operations management. **Journal of Management**, v. 17, p. 97–113, 1998.

SINGH, N.; RAJAMANI, D. **Celular Manufacturing Systems: Design, planning and control**. London: Chapman & Hall, 1996.

SIPPER, D.; BULFIN, R. L. **Production: Planning, Control and Integration**. New York: Mc Graw Hill, 1997.

SLACK, N., LEWIS, M. **Operations strategy**. New York: Prentice Hall, 2001.

SPERANZA NETO, M. S.; SILVA, F. R. **Modelagem e análise de sistemas dinâmicos**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2005.

SOUSA, R.; VOSS, C. A. Contingency research in operations management practices. **Journal of Operations Management**, v. 26, p. 697–713, 2008.

SURI, R. **Quick Response Manufacturing: a Companywide Approach to Reducing Lead Time**. Portland: Productivity Press, 1998.

SWINK, M.; NARASIMHAN, R.; WANG, C. Managing beyond the factory walls: effects of four types of strategic integration on manufacturing plant performance. **Journal of Operations Management**, v. 25, p. 148–164, 2007.

TOWILL, D. R. Dynamic analysis of an inventory and order based production control system. **International Journal of Production Research**, v. 20, p. 671-687, 1982.

UPTON, D. M. Flexibility as process mobility: the management of plant capabilities for quick response manufacturing. **Journal of Operations Management**, v. 12, n. 3-4, p. 205-224, 1995.

VALLADA, E.; RUIZ, R., Cooperative metaheuristics for the permutation flowshop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 193, p. 365–376, 2009.

VICKERY, S.K.; DROGE, C.; MARKLAND, R. E. Dimensions of manufacturing strength in the furniture industry. **Journal of Operations Management**, v. 15, p. 317–330, 1997.

VOKURKA, R. J.; O'LEARY-KELLY, S. W. A review of empirical research on manufacturing flexibility. **Journal of Operations Management**, v. 18, n. 4, p. 485-501, 2000.

VOLLMANN, T. E., et. al. **Manufacturing Planning and Control Systems for Supply Chain Management**. 5nd ed. New York: Irwin/McGraw-Hill, 2005.

WANG, K. -S; HSIA, H. -W.; ZHUANG, Z. -D. Decision Learning about Production Control as Machines Break Down in a Flexible Manufacturing System. **The International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 7, p. 73-92, 1995.

WANG, R. Y.; STRONG, D. M. Beyond accuracy: what data quality means to data consumers. **Journal of Management Information Systems**, v. 12, n. 4, p. 5–34, 1996.

WANG, X; LIU, Z; ZHENG, C.; WU, J. Analysis and Design of a Production and inventory Control System for Ramp Demand. In: WICOM '08. 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, NETWORKING AND MOBILE COMPUTING, 2008, Dalian. **Proceedings...** Dalian: IEEE, 2008. p. 1-5.

WIENDAHL, H. -P. **Load-Orientated Manufacturing Control**. New York: Springer, 1995.

WIENDAHL, H. -P. The throughput diagram, **Annals of the CIRP** 37, v. 1, p. 465-468, 1988.

WIENDAHL, H. -P.; BREITHAUPT, J. -H. Modelling and controlling the dynamics of production systems. **Production Planning and Control**, v. 10, n. 4, p. 389-401, 1999.

WIENDAHL, H. -P.; BREITHAUPT, J. -H. Automatic production control applying control theory. **International Journal of Production Economics**, v. 63, n. 1, p. 33-46, 2000.

WIENDAHL, H. -P.; BREITHAUPT, J. -W. **Production** planning and control on the basis of control theory. In: N. OKINO; H. TAMURA, S. FUJII (EDS.), **Advances in Production Management Systems** - Perspectives and Future Challenges, Chapman & Hall, London, 1997, p. 351-362.

WEISZFLOG, W. (Ed.). **Michaelis: moderno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos, 1998. Disponível online em: <<http://michaelis.uol.com.br/moderno/portugues/index.php>>

WING, L.; PERRY, G. Toward twenty-first-century pharmaceutical sales and operations planning. **Pharmaceutical Technology North America**, v. 25, n. 11, p. 20-26, 2001.

WONG, C. Y.; BOON-ITT, S.; WONG, C. W. Y. The contingency effects of environmental uncertainty on the relationship between supply chain integration and operational performance. **Journal of Operations Management**, v. 29, n. 6, p. 604-615, 2011.

YIN, R. K. **Estudo de caso – planejamento e métodos**. (2Ed.). Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZHOU, L.; DISNEY, S.; TOWILL, D. R. A pragmatic approach to the design of bullwhip controllers. **International Journal of Production Economics**, v. 128, n. 2, p. 556-568, 2010.

ZHOU, L.; GRUBBSTROM, R.W. Analysis of the effect of commonality in multi-level inventory systems applying MRP theory. **International Journal of Production Economics**, v. 90, n. 2, p. 251-263, 2004.

APÊNDICE A - Protocolo de coleta de dados do estudo de caso

O objetivo das entrevistas é analisar: o nível de integração entre as funções/atividades do Planejamento e Controle da Produção (PCP); o nível de incerteza ao qual o PCP está sujeito; a questão da qualidade de informação relacionada às previsões de demanda; os indicadores de desempenho do PCP e da empresa em geral. Para isso, é necessário conhecer um pouco sobre o funcionamento do PCP na empresa e como as várias atividades hierárquicas de planejamento são integradas. Dentre estas atividades inclui-se, por exemplo, o S&OP (ou planejamento agregado), o programa mestre, o *Scheduling*, a análise de capacidade, o controle de estoques, etc.

Além dessa análise, busca-se também saber sobre as mudanças nos planos de produção, ou seja, sobre as reprogramações: com que frequência elas ocorrem e quais são suas causas principais.

As entrevistas são direcionadas a gerentes e/ou supervisores de PCP. Busca-se uma conversa aberta sobre esses assuntos, com algumas questões pré-definidas para direcionamento.

1. Identificação do ramo da empresa, porte (qtos funcionários), tipo de sistema de produção (flowshop, jobshop, batchshop, etc.; MTS, ATO, MTO, ETO) e outras características; identificação da função exercida na empresa pelo respondente.
2. Área de atuação mais específica do respondente; atividades desempenhadas por ele e outras atividades realizadas na empresa, na área de PCP.
3. Como funciona o PCP? (folha auxiliar com as atividades) – Quem faz o quê, de onde vem as previsões, como o planejamento agregado se transforma no plano mestre, etc.
4. De forma geral, qual o problema mais crítico relacionado ao planejamento e controle enfrentado pela empresa? Em outras palavras, qual o problema que está sendo mais negativo para o desempenho da empresa?
5. (Quais outros você citaria, que são menos críticos mas também ocorrem?)
6. *Questões para ajudar no detalhamento dentro das áreas específicas do PCP* – Há processos implementados em cada uma das subáreas abaixo? Há problemas associados a estas áreas?
 - Previsão de demanda?

- Planejamento agregado?
 - Planejamento de capacidade?
 - Programa Mestre de produção?
 - Planejamento de materiais – MRP?
 - *Scheduling* (programação de chão de fábrica)?
 - Estoques?
 - Execução dos planos no chão de fábrica?
 - Incompatibilidade entre essas áreas citadas acima?
 - Comunicação entre essas áreas?
 - Re-planejamentos e re-programações?
 - Flexibilidade para atender a mudanças na demanda?
7. Com que frequência/horizonte de planejamento são feitos os principais planos do PCP?
- Planejamento agregado
 - Programa Mestre
 - MRP
 - Programação do chão de fábrica (*Scheduling*)
8. Há um procedimento formal de S&OP? A área de vendas, de produção, de suprimentos se encontra para fazer o planejamento anual? Com qual frequência são feitas essas reuniões? Quem são os envolvidos? O que se discute?
9. Quão bem você considera que as fases hierárquicas do planejamento são integradas? (Ex. o MRP é integrado com o *Scheduling*? O programa mestre e o controle de estoques são integrados com o MRP?, etc.)
10. (Questões para tentar verificar a dinâmica do ambiente) Em quais dessas áreas do PCP (questão 6) você acha que as mudanças de planos são mais frequentes?
11. Com que frequência são feitas mudanças (formais/informais) de planos no PCP? Com que porcentagem você considera que os planejamentos ou programações são seguidos sem alterações?
12. Por que você julga que essas reprogramações ocorram? É mais uma questão de mudança no ambiente (demanda) ou questões internas? Informações não precisas, outros setores que não cumpriram os planos, por exemplo?
13. Quais são os objetivos de desempenho da produção mais cobrados (qualidade, custo, velocidade, confiabilidade, flexibilidade)?

14. Há indicadores para avaliar a entrega dos pedidos (em relação aos objetivos de desempenho)? (OTIF, entregas no prazo, satisfação do consumidor, etc.? Ver **tabelas de indicadores**).
15. Quais são os indicadores de desempenho/métricas do PCP? (ex. nível de estoque, atraso, etc.)
16. (Por último de tudo) Você sente falta de ou sugeriria alguma ferramenta para:
- A) Solucionar o problema mais crítico (citado na questão 3)?
- B) Melhorar a questão das reprogramações?
- C) Melhorar a questão da integração?
17. Questões sobre integração interna, incerteza e reprogramações:

Integração interna organizacional:

Comunicações e reuniões	Sem contato	Grupos de trabalho reunindo-se para planejamentos de PCP conjuntos
	Não há um procedimento estabelecido para as reuniões	Há procedimentos padronizados (frequência, momento, envolvidos)
Decisões compartilhadas	Planos estabelecidos (por outras áreas/responsáveis) explicados e discutidos	Planos desenvolvidos conjuntamente (comum acordo)
	Procedimento formal de S&OP? Não.	Sim. Uma vez ao ano? Quantas vezes ao ano? Frequência adequada? Áreas Envolvidas?
Troca de ideias e cultura organizacional	Olhar para dentro (cada um com seu grupo)	Troca aberta
Entendimento comum dos objetivos gerais	Objetivos separados	Objetivos separados alinhados com o objetivo geral
	Sem entendimento de outros processos	Alto grau de entendimento dos outros processos

Integração técnica:

Interface	Manual (fax, phone, e-mail, etc.)	Automática (e.g. EDI) ou semi-automática (servidor, portais, intranet)
Compatibilidade dos SI	Incompatíveis	Compatíveis

Incertezas do ambiente:

Clientes mudam frequentemente a ordem	no mês	semanalmente	mais de uma vez por semana	Outro
Essas mudanças são sempre repassadas para os programadores?				

Comportamento do fornecedor	Atrasa muito (mais de 75% das vezes)	Atrasa 50% das vezes	Atrasa 25% das vezes	Praticament e não atrasa
Ação dos competidores	Previsível Quase não afeta	Meio termo Afeta razoavelmente	Imprevisível Afeta muito	
Mudança das tecnologias/ processos de produção	Pouco (anual ou mais)	Razoável (semestral)	Frequente (mensal, bimestral)	

Reprogramações e seus motivos:

Porcentagem dos planos seguidos / cumpridos:

Frequência das reprogramações / replanejamentos - lançamento formal de outros planos:	De 75 a 100% dos planos tem uma 2 versão	50% dos planos	25% dos planos	Nenhum dos planos é alterado formalmente
Frequência das reprogramações – alterações do próprio usuário:	De 75 a 100% dos planos não são cumpridos	50% dos planos são alterados	25% dos planos	O usuário / envolvidos não alteram os planos

Motivos principais das reprogramações ou não cumprimento dos planos (escala: 1 para os motivos mais fortes):

Problemas de suprimento interno (ex. fabricação não conseguiu produzir o necessário para a montagem)	Problemas com fornecedores (suprimento externo)	Mudanças na demanda, que não foram cobertas por estoques	Dificuldade de comunicação entre as áreas do PCP, informações não precisas	Questões organizacionais. Ex.: deixar por último <i>setups</i> mais complicados
--	---	--	--	---

Outros motivos: quais?

Desempenho dos produtos da sua área: pontos fortes e pontos críticos (dificuldades)

QUALIDADE	CUSTO	VELOCIDADE	CONFIABILIDADE (CUMPRIMENTO DAS DATAS DE ENTREGA)	FLEXIBILIDADE
-----------	-------	------------	---	---------------

APÊNDICE B - Detalhamento das funções e rotinas utilizadas na simulação

A Figura B1 a seguir apresenta as operações realizadas pela função utilizada na simulação, correspondente ao bloco "Interpreted MATLAB Fcn" da Figura 6.13, apresentada no capítulo 6.

Entradas:

- frequências de operação das máquinas no regime permanente U_{ip}
- valores de referência para os estoques intermediários q_{jc}
- valores de estoque inicial q_{i0}
- coeficientes da matriz de estado do sistema
- parâmetros da regra de controle escolhida

Saídas:

- taxa de acúmulo de material (dq ou q')
- frequência instantânea de operação das máquinas U_i
- erros relativos e_j

Processamento:

- Passo 1: cálculo dos erros relativos $e_j = (q_j - q_{jc}) / q_{jc}$
- Passo 2: aplicação do controle, i.e., cálculo dos valores das frequências U_i segundo as equações de controle estabelecidas
- Passo 3: cálculo de dq utilizando os coeficientes da matriz de estado e as frequências U_i calculadas no passo 2

Figura B.1 – Detalhamento da função utilizada na simulação.

Apresenta-se a seguir o código em Matlab para a função apresentada na Figura B1.

Nesse caso, a função implementa o controlador proporcional.

```
function [dq]=dq_qP(t,q1,q2,q3,q4,q5,q6,q7,q8,q9,q10,q11)

global U01p U1p U2p U3p U4p U5p U6p U7p U8p U9p U10p U11p k q1c q2c q3c q4c
q5c q6c q7c q8c q9c q10c q11c Coef

%dq --> taxa de acúmulo de estoque
%q --> volume de produção (estoque)

%obs.: ei e ci são variáveis auxiliares locais

%cálculo dos erros relativos de cada estoque
e1 = (q1c-q1)/q1c;
e2 = (q2c-q2)/q2c;
```

```

e3 = (q3c-q3)/q3c;
e4 = (q4c-q4)/q4c;
e5 = (q5c-q5)/q5c;
e6 = (q6c-q6)/q6c;
e7 = (q7c-q7)/q7c;
e8 = (q8c-q8)/q8c;
e9 = (q9c-q9)/q9c;
e10 = (q10c-q10)/q10c;
e11 = (q11c-q11)/q11c;

%cálculo das frequências de operação das máquinas (aplicação do controle)
U1 = U1p*(1+k*e2);
U2 = U2p*(1+k*e3);
U3 = U3p*min([(1+k*e4) (1+k*e5) (1+k*e6)]);
U4 = U4p*min([(1+k/2*e7) (1+k/2*e8) (1+k/2*e9) (1+k/2*e10)]);
U5 = U5p*min([(1+k/2*e7) (1+k/2*e8) (1+k/2*e9) (1+k/2*e10)]);
U6 = U6p;
U7 = U7p*(1+k/4*e11);
U8 = U8p*(1+k/4*e11);
U9 = U9p*(1+k/4*e11);
U10 = U10p*(1+k/4*e11);
U11 = U11p;
U01 = U01p*(1+k*e1);

% bloco que impõe restrições de limite inferior, pois a frequência de
operação das máquinas nunca pode ser menor do que 0, na prática
if U1<0,
    U1 = 0;
end

if U2<0,
    U2 = 0;
end
(e assim sucessivamente para as demais frequências)

% montagem de matrizes com as variáveis abaixo, para poder exibi-las na
área de trabalho
U = [U1;U2;U3;U4;U5;U6;U7;U8;U9;U10;U11;U01];
e = [e1;e2;e3;e4;e5;e6;e7;e8;e9;e10;e11];

% multiplicação das frequências Ui calculadas pelos coeficientes da matriz
de estado, para cálculo dos dq's

matriz_estados(:,1)= Coef(:,1)*U1*min(1,q1);
matriz_estados(:,2)= Coef(:,2)*U2*min(1,q2);
matriz_estados(:,3)= Coef(:,3)*U3*min(1,q3);
matriz_estados(:,4)= Coef(:,4)*U4*min(1,q4);
matriz_estados(:,5)= Coef(:,5)*U5*min(1,q5);
matriz_estados(:,6)= Coef(:,6)*U6*min(1,q6);
matriz_estados(:,7)= Coef(:,7)*U7*min(1,q7);
matriz_estados(:,8)= Coef(:,8)*U8*min(1,q8);
matriz_estados(:,9)= Coef(:,9)*U9*min(1,q9);
matriz_estados(:,10)= Coef(:,10)*U10*min(1,q10);
matriz_estados(:,11)= Coef(:,11)*U11*min(1,q11);
matriz_estados(:,12)= Coef(:,12)*U01;

dq_aux = sum(matriz_estados,2); %com o parâmetro 2 o Matlab soma as linhas
da matriz e gera um vetor coluna, que corresponde ao vetor com os dq's
dq = [dq_aux;U;e];

```


O código da função apresentada é executado no Simulink[®]. A fim de facilitar as simulações, elaborou-se uma rotina principal em Matlab[®] responsável por definir os valores dos parâmetros e condições iniciais da simulação, executar o simulador no Simulink[®] e elaborar gráficos dos resultados. A estrutura dessa rotina é apresentada a seguir.

1. Declaração de variáveis globais (utilizadas na rotina principal e na função "dq_q");
2. Atribuição dos valores desejados aos seguintes parâmetros utilizados na simulação:
 - frequências de operação das máquinas em regime permanente U_{ip} ;
 - ganho k ;
 - níveis de estoque de referência q_{ic} ;
 - níveis de estoque iniciais q_{i0} ;
3. Atribuição dos coeficientes da matriz de estado (mostrados na equação 6.53);
4. Definição do tempo total de simulação t_f ;
5. Execução do simulador desenvolvido no Simulink[®]. Para chamada do simulador utiliza-se a linha de comando `sim('EDO_dq_qP');`
6. Elaboração dos gráficos das variáveis U_i , q_i e e_i usando a função "plot" do Matlab.