

**PROPOSTA DE MODELAGEM ATRAVÉS DE SISTEMAS
DINÂMICOS PARA A FASE DO PROJETO TÉCNICO NO
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MECATRÔNICOS:
ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DESENVOLVEDORA DE
EQUIPAMENTOS MÉDICOS**

PATRÍCIA DE MELO TAVARES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade de Brasília

Faculdade de tecnologia

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSTA DE MODELAGEM ATRAVÉS DE SISTEMAS
DINÂMICOS PARA A FASE DO PROJETO TÉCNICO NO
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS MECATRÔNICOS:
ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DESENVOLVEDORA DE
EQUIPAMENTOS MÉDICOS**

PATRÍCIA DE MELO TAVARES

**ORIENTADOR: SANDERSON CÉSAR MACÊDO BARBALHO, DR.
ENG.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM. DM – 112/16

BRASÍLIA, DF: 15 de dezembro de 2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSTA DE MODELAGEM ATRAVÉS DE SISTEMAS DINÂMICOS
PARA A FASE DO PROJETO TÉCNICO NO DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS MECATRÔNICOS: ESTUDO DE CASO EM EMPRESA
DESENVOLVEDORA DE EQUIPAMENTOS MÉDICOS**

PATRÍCIA DE MELO TAVARES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**SANDERSON CÉSAR MACÊDO BARBALHO, DR. ENG. (UNB/ENM)
(ORIENTADOR)**

**CARLOS HUMBERTO LLANOS QUINTERO, DR. ENG. (UNB/ENM)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MARLY MONTEIRO DE CARVALHO, DR. ENG., (USP/POLI)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 15 de dezembro de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

TAVARES, PATRÍCIA DE MELO

Proposta de modelagem através de sistemas dinâmicos para a fase do projeto técnico no desenvolvimento de produtos mecatrônicos: simulação em empresa desenvolvedora de equipamentos médicos [Distrito Federal] 2016.

xiv, 129 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2016)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Modelo de Referência

2. Produtos Mecatrônicos

3. Sistemas Dinâmicos

I. ENM/FT/UNB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TAVARES, P. M. (2016). Proposta de modelagem através de sistemas dinâmicos para a fase do projeto técnico no desenvolvimento de produtos mecatrônicos, Publicação ENM.DM-112/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xiv, 129 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Patrícia de Melo Tavares

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Proposta de modelagem através de sistemas dinâmicos para a fase do projeto técnico no desenvolvimento de produtos mecatrônicos: estudo de caso em empresa desenvolvedora de equipamentos médicos.

GRAU: Mestre

ANO: 2016

É concedida a Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma cópia para esta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Patrícia de Melo Tavares

Av. Sibi Piruna, Lote 11, Torre B, Apt. 606, Smart Residence, Águas Claras

CEP: 71.928-720 – Brasília/DF – BRASIL

e-mail: patriciamelotavares@yahoo.com.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me iluminar nos momentos em que mais precisei.

Ao meu marido Marcelo, por não me deixar desistir, pela paciência e ensinamentos, mostrando sempre que o caminho do conhecimento é árduo, mas recompensador.

Aos meus pais e irmãos, pelas palavras de apoio e incentivo.

Aos amigos que fiz nesta caminhada, sem os quais não seria possível chegar onde estou.

Ao professor Sanderson pelo acolhimento, ensinamento, paciência e dedicação. Exemplo de professor orientador, que sempre soube o momento de cobrar e de elogiar.

RESUMO

A interação entre as funções básicas do produto e as tecnologias que o compõem, são elementos importantes no projeto de um produto mecatrônico. Há diversos modelos de referência para o processo de desenvolvimento de produtos. Nesse trabalho, utiliza-se o modelo de referência mecatrônico (MRM) como forma de analisar o potencial da modelagem através de sistemas dinâmicos (MSD) para dar suporte ao planejamento e execução de projetos de produtos mecatrônicos. O MRM é detalhado através de fluxos de atividades que descrevem as atividades necessárias à agregação de valor, bem como suas entradas, saídas e decisões. As fases são definidas em função dos resultados que geram e são baseadas na técnica de cadeia de agregação de valor. Este trabalho tem por objetivo propor um modelo de sistemas dinâmicos para dar suporte ao planejamento e execução de projetos de produtos mecatrônicos alinhados ao modelo de referência mecatrônico. O modelo proposto adota complexidade e senioridade como elementos que influenciam a execução dos projetos. O modelo foi testado em casos reais de desenvolvimento de produtos médicos de complexidade distintos na fase do projeto técnico de um produto mecatrônico: Magis II (mínima complexidade), Fotocoagulador Laser (mediana complexidade) e Retinógrafo (máxima complexidade). Os resultados da aplicação do modelo proposto permitiu prever com erro máximo de 15% os prazos de conclusão de um determinado ciclo de desenvolvimento.

Palavras chaves: Modelo de Referência, produtos mecatrônicos, Sistemas Dinâmicos.

ABSTRACT

The interaction between the basic functions of the product and the technologies that compose it are important elements in the design of a mechatronic product. There are several reference models for the product development process. In this work, the mechatronic reference model (MRM) is used as a way of analyzing the potential of modeling through dynamic systems (MSD) to support the planning and execution of mechatronics product designs. MRM is detailed through activity streams that describe the activities required to aggregate value, as well as its inputs, outputs and decisions. The phases are defined based on the results they generate and are based on the value chain technique. This work aims to propose a dynamic systems model to support the planning and execution of mechatronic products projects aligned with the mechatronic reference model. The proposed model adopts complexity and seniority as elements that influence the execution of projects. The model was tested in real cases of development of medical products of different complexity in the technical design phase of a mechatronic product: Magis II (minimum complexity), Laser Photocoagulator (medium complexity) and Retinograph (maximum complexity). The results of the application of the proposed model allowed to predict with maximum error of 15% the completion periods of a given development cycle.

Key words: Reference Model, Mechatronic Products, Dynamic Systems.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivos Gerais.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Metodologia.....	4
1.4 Organização do trabalho.....	5
2. MECATRÔNICA.....	7
2.1 Produtos e Sistemas Mecatrônicos.....	9
2.2 Desenvolvimento de Produtos.....	13
2.2.1 Modelo de Desenvolvimento de Produtos.....	14
2.2.2 Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos.....	20
2.3 Fatores que influenciam no processo de desenvolvimento de produtos.....	21
3. MODELO DE REFERÊNCIA MECATRÔNICO.....	28
3.1 Projeto Técnico.....	31
4. MODELAGEM ATRAVÉS DE SISTEMAS DINÂMICOS.....	38
4.1 Modelagem.....	38
4.2 Simulação.....	41
4.3 Sistemas de Controle.....	43
4.4 Sistemas Dinâmicos (SD).....	47
4.5 Aplicações dos Sistemas Dinâmicos (SD) em problemas organizacionais.....	53
4.5.1 Ford e Sterman (1998).....	53
4.5.2 Bomtempo, Junior e Junior (2007).....	59
4.5.3 Amaral (2008a, 2008 b).....	63
4.5.4 Marujo (2009).....	68
4.5.5 Figueiredo e Loiola (2011a, 2011b, 2012, 2014).....	71
4.5.6 Kasperek e Maurer (2013).....	78
4.5.7 Sagawa (2013); Sagawa e Nagano (2015).....	81
4.5.8 Domingos et al. (2015).....	85
4.6 Análise das aplicações dos sistemas dinâmicos em problemas organizacionais....	88
5. MODELAGEM DA FASE DO PROJETO TÉCNICO.....	90
5.1 Modelo da Fase do Projeto Técnico.....	98

6. VALIDAÇÃO DO MODELO DA ETAPA DA FASE DO PROJETO TÉCNICO.....	102
6.1 Caracterização da Empresa.....	104
6.2 Descrição dos Produtos e Aplicação do Modelo.....	105
6.2.1 Magis II – Mínima Complexidade.....	105
6.2.2 Fotocoagulador a Laser: Mitra Yellow Laser – Média Complexidade.....	108
6.2.3 Retinógrafo Digital: OPTO ADS – Máxima Complexidade.....	111
6.3 Considerações Sobre a Aplicação do Modelo.....	114
7. CONCLUSÕES.....	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação da metodologia empregada.....	6
Figura 2.1. Sistema mecatrônico (Adamowski e Furukawa, 2001).....	7
Figura 2.2. Elementos de um sistema mecatrônico (Barbalho, 2006a).....	11
Figura 2.3. Componentes de um produto mecatrônico (Barbalho, 2006a).....	11
Figura 2.4. Processo mecânico e processamento de informação desenvolvido em um sistema mecatrônico (Isermann, 2008).....	12
Figura 2.5. Exemplos de sistemas mecatrônicos (Isermann, 2008).....	13
Figura 2.6. Etapas do processo de desenvolvimento de produtos (adaptado de Clark e Fujimoto, 1991).....	15
Figura 2.7. Funil de desenvolvimento - Modelo de estratégia de desenvolvimento de produtos (Wheelwright e Clark, 1992).....	16
Figura 2.8. Processo de revisão de fases no desenvolvimento de produtos (Cooper, 2001)...	16
Figura 2.9. Fluxograma do modelo do PDP (Pahl et al., 2005).....	17
Figura 2.10. Macrofases e fases do desenvolvimento de produtos (adaptado de Rozenfeld et al., 2006).....	18
Figura 3.1. Passos para a confecção do MRM (Barbalho, 2006a).....	29
Figura 3.2. Fases do MRM (Barbalho e Rozenfeld, 2013).....	30
Figura 3.3. Fase do Projeto Técnico (Barbalho, 2006a).....	33
Figura 4.1. Etapas da construção de modelos quantitativos (Bertrand & Fransoo, 2002).....	39
Figura 4.2. Processo de modelagem. (adaptado de Morabito e Pureza, 2010).....	40
Figura 4.3. Etapas da Modelagem de Sistemas Dinâmicos (Speranza Neto e Silva, 2005)....	41
Figura 4.4. Modelo Analítico (Estático) e Simulação (Dinâmico) (adaptado de Borshchev e Filippov, 2004).....	42
Figura 4.5. Sistemas num espectro de nível de agregação, abstração e detalhamento (Borshchev e Fillipov, 2004).....	43
Figura 4.6. Os subsistemas em um sistema de controle em malha fechada (Bolton, 1995)..	45
Figura 4.7. Os subsistemas em um sistema de controle em malha aberta (Bolton, 1995)....	46
Figura 4.8. Componentes de um diagrama em blocos (Bolton, 1995).....	47
Figura 4.9. Passos de um SD (Forrester, 1994).....	51
Figura 4.10. Elementos básicos de um modelo genérico de estoque e fluxo (adaptado de Sterman, 2000).....	53

Figura 4.11. Processo de desenvolvimento de um modelo de estoque e fluxo de fase única (Ford e Sterman, 1998).....	54
Figura 4.12. Estrutura do processo de desenvolvimento do projeto de fase única (Ford e Sterman, 1998).....	55
Figura 4.13. Grau de simultaneidade entre etapas e atividades do PDP (adaptado Ford e Sterman, 1998).....	57
Figura 4.14. Processo simultâneo multifase e estrutura de coordenação (Ford e Sterman, 1998).....	59
Figura 4.15. Diagrama de subsistemas do segmento de exploração e produção (Bomtempo, Júnior e Júnior, 2007).....	60
Figura 4.16. Mapa de estoques e fluxos (Bomtempo, Júnior e Júnior, 2007).....	61
Figura 4.17. Modelo simplificado para análise de pontos de inflexão (Amaral, 2008).....	66
Figura 4.18. Condição básica para o ponto de inflexão (Amaral, 2008a).....	68
Figura 4.19. Sequenciamento de n atividades (Marujo, 2009).....	69
Figura 4.20. Diagrama de causalidade dinâmico (Marujo, 2009).....	70
Figura 4.21. Diagrama do projeto (Marujo, 2009).....	71
Figura 4.22. Fase simples de um fluxo com seleção de projetos (Figueiredo e Loiola, 2014).....	72
Figura 4.23. Cadeia de suprimentos (Figueiredo e Loiola, 2011b).....	73
Figura 4.24. Rastreamento da criação de valor em um funil de desenvolvimento de produto em duas fases (Figueiredo e Loiola, 2011a).....	74
Figura 4.25. Efeito do viés intensidade de trabalho no atraso e na saída. (Figueiredo e Loiola, 2011b).....	76
Figura 4.26. (a) Índice máximo de amplificação do atraso sem seleção de projetos e (b) Índice máximo de amplificação do atraso com seleção de projetos (Figueiredo e Loiola, 2011b).....	77
Figura 4.27. Passos da metodologia StCM (Kasperek e Maurer, 2013).....	78
Figura 4.28. Ciclo de retrabalho de fase única (Le et al., 2010).....	79
Figura 4.29. Conceito desenvolvido do modelo de transformação de MDM para um modelo de Dinâmica de Sistemas (Kasperek e Maurer, 2013).....	80

Figura 4.30. Modelo qualitativo de SD do projeto PSSycle para representar o comportamento dinâmico do sistema (Kasperek e Maurer, 2013).....	80
Figura 4.31. Fluxograma simplificado da produção de embalagens de rafia (Sagawa, 2013).....	82
Figura 4.32. Modelo físico do sistema de produção de embalagens de rafia (Sagawa, 2013).....	83
Figura 4.33. Grafos de Ligação do sistema de embalagens de rafia: parte 1 (Sagawa, 2013).....	84
Figura 4.34. Grafos de Ligação do sistema de embalagens de rafia: parte 2 (Sagawa, 2013).....	84
Figura 4.35. Grafos de Ligação do sistema de embalagens de rafia: parte 3 (Sagawa, 2013).....	85
Figura 4.36. Modelo de enlace causal do processo de S&OP (Domingos et al., 2015).....	86
Figura 4.37. Estrutura modelada em Sistemas Dinâmicos para o macroprocesso “Previsão de Vendas” (Domingos et al., 2015).....	87
Figura 5.1. Modelo da Fase do Projeto Técnico.....	90
Figura 5.2. Ciclo de retrabalho de fase única (Kasperek et al. 2014).....	92
Figura 5.3. Etapa (3) - Fase do Projeto Técnico.....	92
Figura 5.4. Ciclos simultâneos dos projetos: Etapa 3 da Fase do Projeto Técnico.....	93
Figura 5.5. Álgebra Booleana: operação lógica AND. (a) Representação por circuitos, (b) representação por tabela verdade e (c) representação por porta.....	94
Figura 5.6. Representação dos ciclos de projeto simultâneos através de portas.....	94
Figura 5.7. (a) Relação qualidade em função do tempo. (b) Relação qualidade em função da senioridade. (c) Relação tempo em função da complexidade. (d) Relação tempo em função da senioridade.....	96
Figura 5.8. Busca por “metas”: estrutura e comportamento (Sterman, 2000).....	97
Figura 5.9. Resposta do sistema de primeira ordem para uma entrada em degrau.....	98
Figura 5.10. (a) Relação entre a Qualidade x Complexidade x Tempo e (b) Qualidade x Senioridade x Tempo.....	99
Figura 5.11. Gráfico da qualidade em função do tempo: relações entre Senioridade e Complexidade.....	100
Figura 6.1 Magis II.....	106

Figura 6.2 Gráfico da qualidade em função do tempo: relações entre Senioridade e Complexidade analisadas no Magis II.....	107
Figura 6.3 Fotocoagulador a Laser: Mitra Yellow Laser.....	109
Figura 6.4 Gráfico da qualidade em função do tempo: relações entre Senioridade e Complexidade analisadas no Fotocoagulador a Laser.....	110
Figura 6.5 Retinógrafo Digital: OPTO ADS.....	112
Figura 6.6. Gráfico da qualidade em função do tempo: relações entre Senioridade e Complexidade analisadas no Retinógrafo Digital.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos.....	20
Tabela 2.2. Definições de Complexidade.....	22
Tabela 4.1. Representação dos elementos básicos no Modelo de Estoque e Fluxos.....	52
Tabela 4.2. Elementos básicos, equações constitutivas e causalidades.....	70
Tabela 4.3. Análise das aplicações de sistemas dinâmicos em problemas organizacionais...	88
Tabela 5.1. Tempo necessário para a execução de projetos.....	100
Tabela 6.1. Normalização da Senioridade.....	103
Tabela 6.2. Componentes do Magis II.....	106
Tabela 6.3. Senioridade dos Desenvolvedores – Magis II.....	107
Tabela 6.4. Resultados qualidade em função do tempo: Magis II.....	107
Tabela 6.5. Componentes do Fotocoagulador a Laser.....	109
Tabela 6.6. Senioridade dos Desenvolvedores – Fotocoagulador a Laser	110
Tabela 6.7 Resultados qualidade em função do tempo: Fotocoagulador a Laser.....	111
Tabela 6.8. Componentes do Retinógrafo Digital.....	112
Tabela 6.9. Senioridade dos Desenvolvedores – Retinógrafo Digital.....	113
Tabela 6.10 Resultados qualidade em função do tempo: Retinógrafo Digital – OPTO ADS.....	114

LISTA DE SÍMBOLOS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DMM	<i>Domain Mapping Matrices</i>
DSM	<i>Design Structure Matrices</i>
EAP	Estrutura Analítica do Projeto
IPMA	<i>International Project Management Association</i>
LDP	Linha de Produtos
MDM	Matriz de vários Domínios (<i>Multiple Domain Matrix</i>)
MRM	Modelo de Referência Mecatrônico
MSD	Modelagem por Sistemas Dinâmicos
NPD	Desenvolvimento de Novos Produtos (<i>New Product Developmente</i>)
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PDF	Função de Distribuição de Probabilidade (<i>Probability Distribution Function</i>)
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
PERT/COM	<i>Program Evalution and Review Technique/Critical Path Method</i>
PM	Gerentes de Projeto (<i>Project Managers</i>)
PMO	<i>Project Management Office</i>
PPM	Gestão de funil de produtos (<i>Product Pipeline Management</i>)
SD	Sistemas Dinâmicos
S&OP	<i>Sales and Operations Planning</i>
StCM	<i>Structural Complexity Management</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>

1. INTRODUÇÃO

Os modelos de referência servem para padronizar, estabelecer diretrizes e normas técnicas necessárias às atividades de desenvolvimento de produtos. Esses modelos são utilizados para desenvolver produtos de grande potencial de modo que consigam competir no mercado de produtos, principalmente os produtos de alta tecnologia (onde predominam a variedade e a personalização).

O processo de desenvolvimento de produtos (PDP) deve levar em consideração as atividades exercidas internamente à empresa e nas cadeias de suprimento. Entende-se como processo de desenvolvimento o esforço repetitivo para projetar muitos produtos periodicamente. O PDP engloba todas as fases do ciclo de vida de um produto de modo que sua documentação define o desenvolvimento dos produtos dentro da empresa. Nas fases iniciais determinam-se os materiais e tecnologias a serem utilizados, os processos de fabricação e a arquitetura final do produto. Além destas atividades, o PDP também envolve o descarte e a retirada do produto do mercado, quando necessário, conforme explicita Rozenfeld et al., 2006.

Buscando satisfazer as necessidades dos consumidores, o tempo gasto na produção desses produtos deve ser fonte de vantagem competitiva. Além disso, a adaptação às necessidades dos consumidores, às instabilidades e incertezas do mercado consumidor, bem como o menor custo possível devem ser levadas em consideração. Processos como o desenvolvimento de produtos, o atendimento ao cliente, a redução de custos e os processos mais vinculados ao fluxo de produção propriamente ditos, demandam esforço, pesquisa e busca por novas tecnologias de planejamento.

Os produtos mecatrônicos tornam a gestão do PDP ainda mais complexa. Este tipo de produto envolve muitas variáveis, pois é composto por muitos componentes, subsistemas, sistemas, e suas inter-relações. Junte-se a esta complexidade a necessidade de integração de equipes de múltiplas disciplinas como engenharia mecânica, eletrônica e tecnologia da informação.

Estes ambientes dinâmicos de produção necessitam ser modelados, e a Modelagem de Sistemas Dinâmicos (MSD) e a Teoria de Controle, muito aplicadas a sistemas eletrônicos e mecânicos, oferecem ferramentas que auxiliam na construção desses modelos. Como

aplicações, podemos citar a utilização da Teoria de Controle em sistemas de produção e estoques. A Modelagem de Sistemas Dinâmicos e as ferramentas de Controle são aplicadas na cadeia de suprimentos, no Planejamento Hierárquico da Produção e na Programação de Operações e Controle da Produção de curto prazo. Nesse trabalho, a MSD será apresentada como forma de auxiliar o processo de desenvolvimento de produtos mecatrônicos.

1.1 Justificativa

Barbalho (2006a) propôs um modelo de referência mecatrônico (MRM) para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos, baseado na técnica da cadeia de agregação de valor. A cadeia de valor é entendida como o levantamento dos processos necessários para entregar produtos e serviços a um beneficiário. A construção desse instrumento permite ao gestor se afastar da perspectiva tipicamente funcional da organização e visualizar, de maneira mais sistêmica e integrada, o funcionamento do conjunto de processos existentes. A compreensão das relações de causas e efeitos, suas interfaces e transversalidades contribuem na identificação do valor e benefícios agregados nos processos, bem como dos resultados e impactos gerados. Neste modelo, as fases do MRM são definidas em função dos resultados que geram.

As fases do MRM são definidas por: estratégia, especificações, planejamento do projeto, concepção, planejamento técnico, projeto técnico, otimização, homologação, validação, lançamento e monitoramento. Dentre as fases do MRM, a fase do projeto técnico merece especial atenção, pois sua função é desenvolver soluções (mecânicas, elétricas, eletrônicas, de software etc.) para as funções primárias do produto mecatrônico. A entrada desta fase são as especificações do projeto e o plano técnico do projeto. Várias atividades são desenvolvidas simultaneamente até que as soluções técnicas possam ser documentadas com base em um protótipo alfa.

De modo geral, a maior parte das atividades centrais para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos está na fase do projeto técnico, onde as decisões têm relação com a viabilidade dos prazos estimados para o projeto e os custos dele decorrentes, assim como, as subcontratações necessárias, informações essas que são consolidadas em uma análise dos riscos do projeto. Nesta fase, as atividades devem ocorrer no âmbito de todos os projetos da linha de produtos, uma vez que nela é estabelecida a estrutura de documentação necessária ao

produto, assim como o detalhamento do cronograma de atividades e da estrutura da divisão do trabalho no projeto.

Também durante o projeto técnico, ocorre o refinamento do plano de projeto que fora preliminarmente confeccionado na fase de planejamento do projeto. Este refinamento objetiva aprofundar o plano de atividades do projeto, pois nesta fase já há uma concepção definida e modelos abstratos, tais como arquitetura do produto e análise de requisitos de software que subsidiam o detalhamento do trabalho a ser realizado.

Uma vez que o produto mecatrônico implica em uma grande diversidade de concepções que podem ser utilizadas e essa diversidade se manifesta no projeto do produto como maior tempo de projeto e custos decorrentes, a modelagem desta fase através de sistemas dinâmicos surge como uma alternativa atrativa para o planejamento dos custos e do tempo relativos ao desenvolvimento de produtos mecatrônicos. Uma vez conhecidas as variações possíveis nesses parâmetros, o gestor pode tomar uma melhor decisão sobre o andamento do projeto. Adicionalmente, é possível identificar o grau de variações possíveis no projeto do produto em função das alternativas identificadas para cada elemento técnico do projeto e como isso implicaria nos tempos de desenvolvimento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste estudo consiste em desenvolver um modelo de sistema dinâmico aplicado à fase do projeto técnico no desenvolvimento de um produto mecatrônico, visando à simulação do projeto do produto mecatrônico em função do seu tempo de execução, assim como aplicar o modelo desenvolvido em produtos mecatrônicos produzidos por uma empresa desenvolvedora de equipamentos médicos a fim de comparar o modelo teórico com os resultados reais. Com essa modelagem será possível alinhar os indicadores de desempenho, promovendo a melhoria da qualidade das informações disponíveis ao planejamento e as incertezas que afetam o fluxo de produção, obtendo-se assim diretrizes gerenciais para tomadas de decisões.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para se atingir os objetivos gerais, os seguintes passos serão desenvolvidos:

- (a) Reescrever o fluxograma da fase do projeto técnico do MRM proposto por Barbalho e Rozenfeld (2013);
- (b) Descrever as equações que reflitam o comportamento dos projetos componentes da fase do projeto técnico;
- (c) Refinar a modelagem através das definições e interações de complexidade e senioridade;
- (d) Modelar a etapa de otimização da fase do projeto técnico;
- (e) Aplicar o modelo proposto em produtos mecatrônicos desenvolvidos em uma empresa desenvolvedora de equipamentos médicos;
- (f) Validar a modelagem desenvolvida através da comparação dos resultados teóricos obtidos com os valores reais.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho inicia-se com uma fundamentação teórica realizada a partir da revisão bibliográfica dos principais conceitos envolvidos na definição do problema apresentado no início do capítulo, bem como na fundamentação da solução proposta nos objetivos (seção 1.2).

Composição da revisão bibliográfica:

- Mecatrônica: buscou-se apresentar a definição de produtos e sistemas mecatrônicos, que é o ponto de partida deste trabalho.
- Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP): buscou-se uma revisão dos modelos de referência para o PDP que mais se adequassem aos produtos mecatrônicos.
- Modelo de Referência Mecatrônico (MRM): buscou-se conceituar o modelo que serve de base para o desenvolvimento deste trabalho.
- Sistemas Dinâmicos (SD): buscou-se definir e revisar os principais conceitos e trabalhos desenvolvidos através da modelagem de SD que devem embasar as decisões tomadas no projeto proposto.

A partir da revisão do MRM e de SD, é proposto um modelo para uma das etapas da fase do projeto técnico no processo de desenvolvimento de produtos mecatrônicos. A Figura 1.1 representa a metodologia empregada: a partir da Etapa (3) da Fase do Projeto Técnico do MRM, foi construído um modelo empregando a metodologia de SD.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em sete capítulos, incluindo a Introdução (Capítulo 1), em que se apresentam a justificativa, os objetivos e a metodologia. No Capítulo 2, apresentam-se as diversas definições relativas a Mecatrônica, focando nos tópicos produtos e sistemas mecatrônicos, desenvolvimento de produtos, modelo de desenvolvimento de produtos, desenvolvimento de produtos mecatrônicos e os fatores que influenciam no processo de desenvolvimento de produtos. No Capítulo 3, é apresentado o modelo de referência mecatrônico. Em especial, a fase do Projeto Técnico. No Capítulo 4, discute-se a modelagem através de Sistemas Dinâmicos. Para isso, são apresentados os conceitos de modelagem, simulação e sistemas de controle. Uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de Sistemas Dinâmicos em problemas organizacionais é analisada com maior detalhamento. No Capítulo 5, é apresentado um modelo de Sistemas Dinâmicos para uma das etapas da Fase do Projeto Técnico. No Capítulo 6 é realizada a validação do modelo da Etapa da Fase do Projeto Técnico. Realizou-se uma descrição da empresa e dos produtos estudados. Considerações sobre a aplicação do modelo foram desenvolvidas. No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

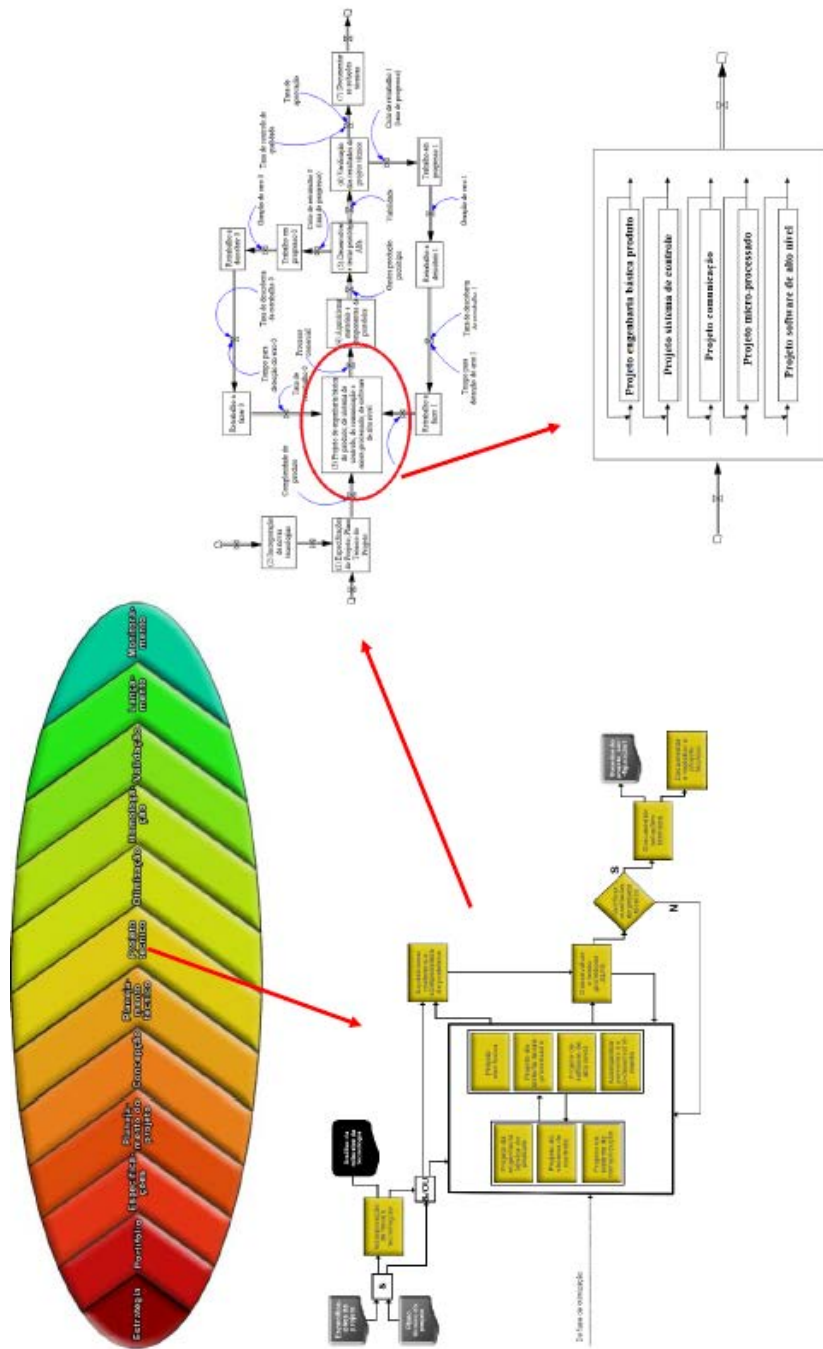


Figura 1.1. Representação da metodologia empregada.

2. MECATRÔNICA

Em muitos casos os departamentos de projetos Mecânicos e Eletrônicos de uma empresa desenvolvedora dos produtos, localizam-se em diferentes cidades ou até mesmo em países diferentes. Outras vezes, esses departamentos se encontram no mesmo prédio, mas não se comunicam. A combinação convencional dos projetos se mostra inadequada diante da sofisticação dos produtos e da velocidade de resposta exigidas pelo mercado. Normalmente os engenheiros mecânicos projetam uma máquina. Quando terminam, encaminham para os engenheiros elétrico/eletrônicos para projetarem e ajustarem o sistema de controle. Estes por sua vez, ao terminarem, encaminham o equipamento para os engenheiros de *software* para escreverem os programas de controle. Não há, dessa forma, um trabalho simultâneo, que organize de forma integrada, e ao mesmo tempo, o projeto. A Mecatrônica aparece neste cenário como uma abordagem transdisciplinar, baseada em um sistema de comunicação aberta para melhor projetar produtos “engenheirados” (ACAR e PARKIN, 1996).

No final da década de 70, no Japão, a combinação bem sucedida de Mecânica, Eletrônica e Processamento Digital em produtos de consumo recebeu o codinome Mecatrônica. A Figura 2.1 (Adamowski e Furukawa, 2001) representa de forma genérica um sistema mecatrônico. Os sensores captam as informações do mundo físico que são processadas digitalmente, resultando em ações de controle. O sistema de controle age sobre o sistema físico através de atuadores. Disto resulta um sistema realimentado, que pode representar sistemas com níveis variados de complexidade.

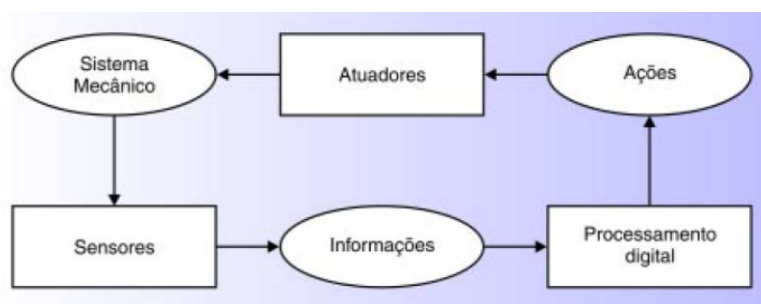


Figura 2.1. Sistema mecatrônico (Adamowski e Furukawa, 2001).

Essa combinação pode gerar uma gama muito ampla de aplicações, de tal forma que o termo Mecatrônica pode ser interpretado de variadas formas, dependendo da aplicação em questão. Entendimento comum seria descrever a mecatrônica como uma disciplina

integradora que utiliza as tecnologias de mecânica, eletrônica e tecnologia da informação para fornecer melhores produtos, processos e sistemas. A Mecatrônica integra os campos clássicos de engenharia mecânica, engenharia eletrônica e tecnologia da informação na fase de concepção de um produto ou de um sistema. Mecatrônica não é, portanto, um novo ramo da engenharia, mas um conceito que associa a necessidade de integração e interação intensa entre os diferentes ramos da engenharia.

Muitos produtos têm partes móveis que exigem precisão do controle e manipulação de suas construções dinâmicas, envolvendo o uso de tecnologias de base, tais como: sensores, atuadores, *software*, comunicações, óptica, eletrônica, mecânica estrutural e engenharia de controle. Um fator chave na Mecatrônica é a integração de microeletrônica e de tecnologia da informação em sistemas mecânicos, de modo a obter a melhor solução possível. Por isso, o projeto de tais produtos e processos deve ser o resultado de uma atividade multi ou trans disciplinar.

Para Rietdijk (1989), Mecatrônica é a combinação da Engenharia Mecânica de precisão, do controle eletrônico e dos sistemas de pensamento no projeto de produtos e processos. Na definição de Rietdijk, observa-se claramente que a Mecatrônica está focada em aplicações e *design*. Para Schweitzer (1996), Mecatrônica é uma área interdisciplinar que combina a Engenharia Mecânica, a Engenharia Eletrônica e a Ciência da Computação.

Brussel (1996) complementa a definição dada por Schweitzer (1996), considerando a Mecatrônica como a combinação de Engenharia Mecânica, Engenharia de Controle, Microeletrônica e Ciência da Computação, numa abordagem de engenharia concorrente, isto é, deve-se ter uma visão simultânea das possibilidades nas diferentes disciplinas envolvidas, em contraste com as abordagens tradicionais que geralmente tratam os problemas separadamente.

Salminen (1996) define Mecatrônica como sendo a combinação de Mecânica e Eletrônica para melhorar a operação em vários aspectos, aumentar a segurança e reduzir custos de máquinas e equipamentos.

Acar e Parkin (1996) consideram a Mecatrônica como uma filosofia de projeto, que integra a Microeletrônica, a Computação e o controle em Sistemas Mecânicos, com a finalidade de obter a melhor solução para projetos e produtos com certo grau de "inteligência" e "flexibilidade".

Uma diferenciação entre engenharia mecatrônica e tecnologia mecatrônica é apresentada por Buur (1989). O autor foi o primeiro a desenvolver uma perspectiva funcional na definição da mecatrônica. Segundo ele:

“Mecatrônica é uma tecnologia que combina mecânica com eletrônica e tecnologia da informação para compor tanto uma interação funcional como uma integração espacial de componentes, módulos, produtos e sistemas”.
(BUUR, 1989)

Existem muitas outras definições para a Mecatrônica, mas o ponto comum à maioria das abordagens é a integração entre as áreas e as diferentes tecnologias. É a correta integração/cominação entre os materiais, mecanismos, sensores, atuadores, eletrônica e processamento digital possibilitando uma simplificação do sistema, redução de custos, automonitoramento, elevado grau de precisão e confiabilidade.

2.1 Produtos e Sistemas Mecatrônicos

Ulrich e Eppinger (2000) definem um produto como “algo vendido por uma empresa aos seus clientes”. Machado (2007) usa o termo *design* do produto para se referir ao arranjo conceitual dos elementos ou detalhes de um produto, que é resultado da interação entre os objetivos de um produto e suas respectivas soluções. Com relação à definição de *design*, distintas visões são observadas na literatura. *Design* pode ser visto por meio de diferentes perspectivas ou pelas distintas áreas (Machado, 2007). Ulrich e Eppinger (2000) entendem *design*, como a definição da forma física do produto que melhor atende a necessidade dos clientes. Pahl *et al.* (2005) referem-se ao *design* como uma atividade de engenharia que: afeta a quase totalidade das áreas relacionadas com a vida humana; utiliza-se de leis da ciência; constrói-se sobre experiências especiais; e provê os pré-requisitos para a realização física do que se projetou no campo das ideias. Machado (2007) usa o termo *design* do produto para se referir ao arranjo conceitual dos elementos ou detalhes de um produto, que é resultado da interação entre os objetivos de um produto e suas respectivas soluções. O termo “*design* do produto”, então, distinguir-se-á de “projeto do processo”, pois o projeto do processo é usado para definir como se realizará fisicamente o que foi definido no *design* do produto.

Um sistema mecatrônico típico capta sinais, processa-os e gera forças e movimentos como saídas. Os sistemas mecânicos são ampliados e integrados com sensores, microprocessadores e controladores. O fato de um sistema detectar mudanças ambientais ou

paramétricas por sensores, processar adequadamente estas informações e reagir a elas o torna bastante diferente das máquinas convencionais e sistemas mecânicos. Como exemplos de produtos mecatrônicos típicos podemos mencionar os robôs controlados digitalmente, veículos teleguiados, câmeras eletrônicas e fotocopiadoras.

De acordo com Buur (1989), as características dos produtos e sistemas mecatrônicos são: interação funcional entre tecnologias da informação, mecânicas e eletrônicas; integração espacial dos subsistemas em uma unidade física; inteligência relacionada com as funções de controle do sistema mecatrônico; flexibilidade, facilidade com que os produtos mecatrônicos podem ser modificados para atender novas exigências e situações; multifuncionalidade atribuída às funções de software definidas pelo microprocessador; funções invisíveis, realizadas por microeletrônica e de difícil visão e compreensão por parte dos clientes; e dependência tecnológica, em estreita ligação com as tecnologias industriais disponíveis.

Barbalho, Sillos e Rozenfeld (2011) elencam os critérios que um produto mecatrônico deve obedecer: integração de tecnologias mecânica, eletrônica e de software; as funções básicas do produto devem ser providas da interação entre as tecnologias que o compõem; o produto deve ser entendido como um sistema de controle de malha aberta ou fechada.

Bradley et al. (1991) especifica os principais componentes deste tipo de produto: sensores e instrumentação, software de processamento/controle, atuadores e *drivers*, projeto de engenharia e sistema de comunicação. A Figura 2.2 representa um produto mecatrônico com os componentes especificados. As setas na horizontal representam o fluxo principal (fluxo de informações). Entre o atuador e o projeto de engenharia, e entre este e a aplicação, o fluxo principal pode ser composto por informações, energia ou materiais. As setas tracejadas na vertical mostram os possíveis fluxos de informações realizados através dos sistemas de comunicação. Ainda na Figura 2.2, observamos as aplicações dos módulos mecatrônicos na indústria de processos, de produtos de massa e de defesa.

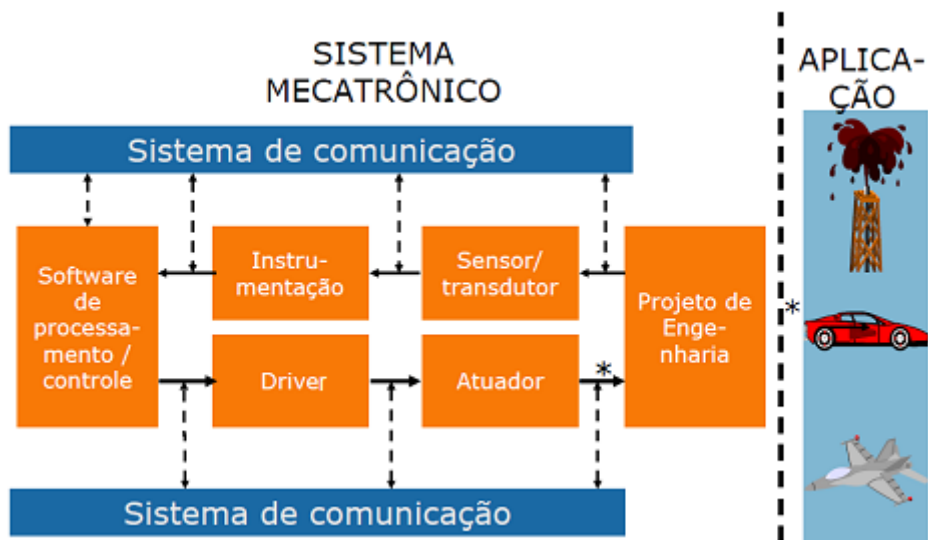


Figura 2.2. Elementos de um sistema mecatrônico (Barbalho, 2006a).

Tomatis (2001) apresenta uma definição para os produtos mecatrônicos baseados no conceito de camadas. A Figura 2.3 representa os componentes de um produto mecatrônico. Um produto mecatrônico é composto de camadas que se iniciam com a mecânica do sistema, passam pela eletrônica e pelo hardware computacional, e através do seu sistema operacional mediante o uso de aplicativos se comunica com o usuário através da interface homem-máquina. As camadas só são atingidas quando a camada inferior está funcionando corretamente. Desta forma é explicada a alta complexidade de um produto mecatrônico, pois são necessárias muitas interfaces entre uma camada e outra.

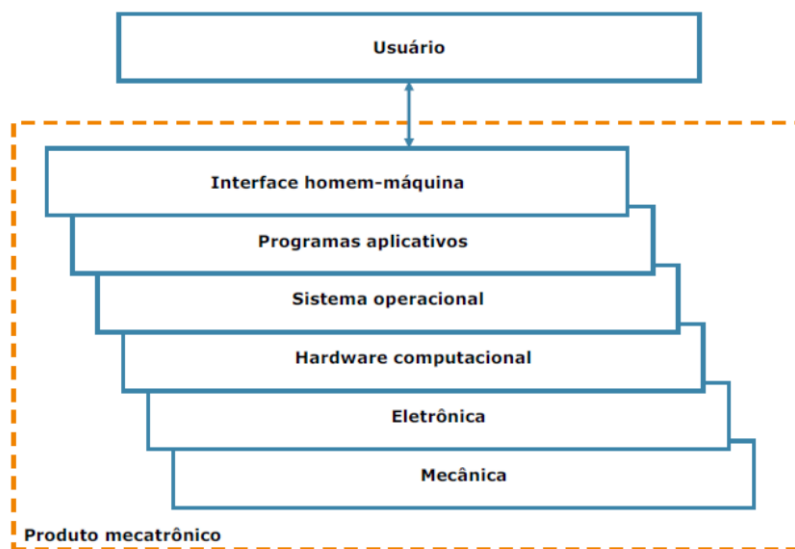


Figura 2.3. Componentes de um produto mecatrônico (Barbalho, 2006a).

A Figura 2.4 mostra o fluxo de energia orientado “para frente” de um sistema de conversão de energia mecânica (por exemplo, um motor), e um fluxo de informação orientado “para trás”, típico em muitos sistemas mecatrônicos. Desta forma, o sistema eletrônico digital atua sobre o processo com base em medições ou variáveis de comando externo. Se os sistemas eletrônicos e mecânicos são mesclados em um sistema autônomo geral, obtém-se um sistema mecânico-eletrônico integrado, chamado de sistema mecatrônico.

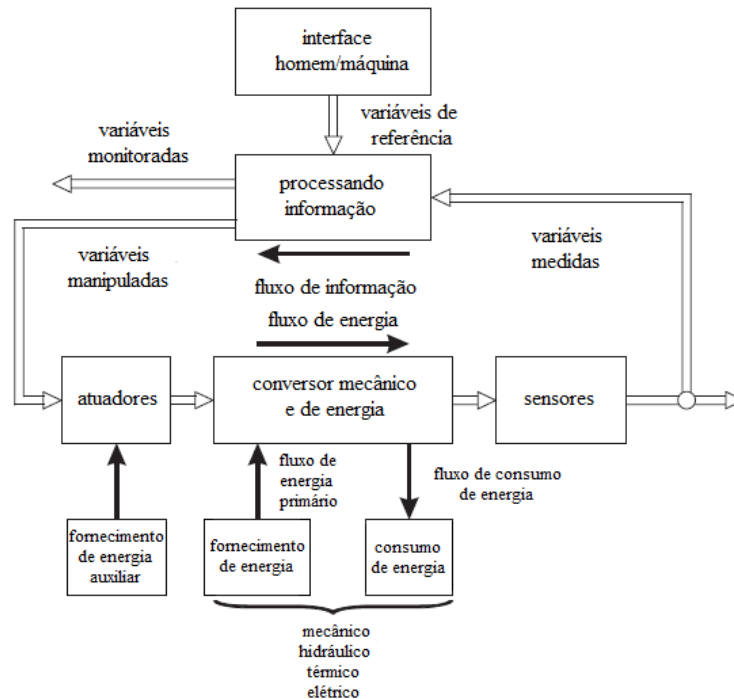


Figura 2.4. Processo mecânico e processamento de informação desenvolvido em um sistema mecatrônico (Isermann, 2008).

As aplicações dos conceitos de mecatrônica no projeto do produto fornecem ganhos como uma maior flexibilidade, versatilidade, alto nível de inteligência dos produtos, segurança, confiabilidade bem como menor consumo de energia e custo. Estas vantagens traduzem-se em um produto com mais apelo ao cliente, com produção rápida, a um custo reduzido e servindo mercados cada vez maiores. A Figura 2.5 Apresenta alguns exemplos de sistemas mecatrônicos.

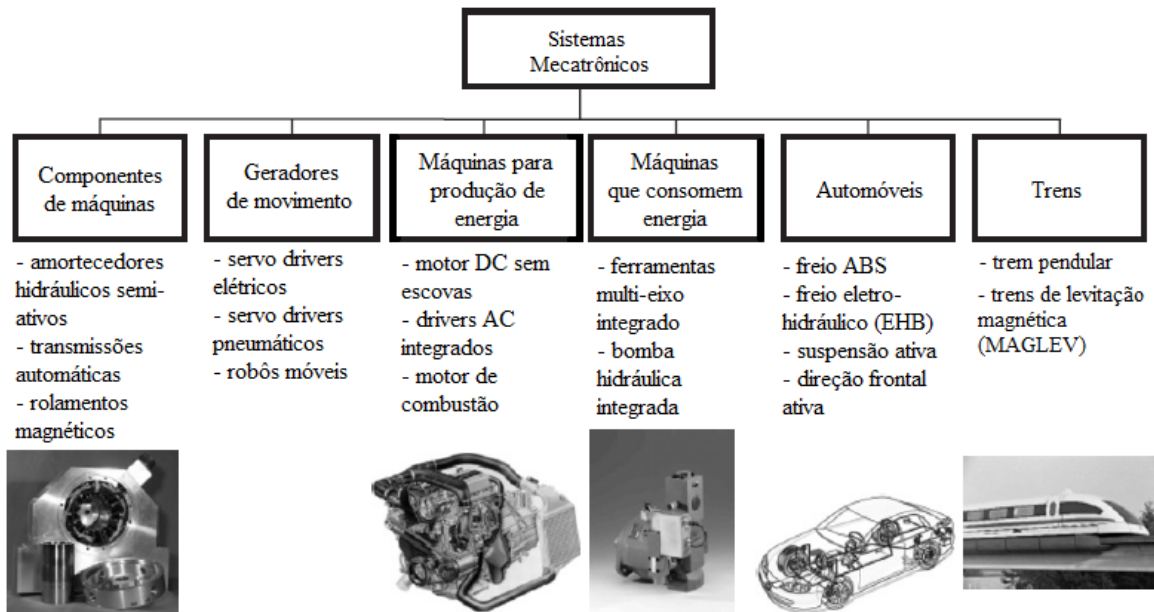


Figura 2.5. Exemplos de sistemas mecatrônicos (Isermann, 2008).

2.2 Desenvolvimento de Produtos

Ulrich e Eppinger (2000) definem o desenvolvimento de produto como um processo em que o produto é concebido, projetado e lançado no mercado, incluindo a sua realimentação com informações tanto da produção como do uso do produto. É o processo no qual ocorre a transformação de uma oportunidade de mercado em um produto disponível para venda (Krishnan e Ulrich, 2001), através de um conjunto de atividades (Rozenfeld et al., 2006) executadas de maneira lógica, de forma sequencial ou em paralelo (Denker et al., 2001). Segundo Rozenfeld et al. (2006), esse processo é composto por “atividades, recursos, informações, fases, responsabilidades e outras possíveis dimensões” e nele são definidas especificações técnicas do produto, do processo de fabricação e da sua aplicação.

Ao projetar um produto, a empresa define em qual mercado irá competir, qual o público-alvo e conseqüentemente seus concorrentes; a qualidade e o preço desse produto; e o seu grau de inovação. Durante o desenvolvimento do produto são tomadas decisões em relação à tecnologia empregada, materiais e respostas esperadas que afetarão todo o ciclo de vida do produto.

O processo de desenvolvimento de produtos apresenta diversas características que o diferenciam de outros processos, tais como: elevado grau de incerteza e riscos das atividades; dificuldade de mudar as decisões iniciais; as atividades básicas seguem um ciclo iterativo;

manipulação e geração de alto volume de informações; multiplicidade de requisitos a serem atendidos pelo processo (Rozenfeld et al., 2006). É um processo complexo e apresenta inúmeras atividades inter-relacionadas e interfaces técnicas, deve vincular seus processos e atividades aos diversos requisitos de mercado, aos requisitos internos da empresa e das demais partes da cadeia produtiva.

Segundo Klein (1995), o desenvolvimento de produtos é um empreendimento colaborativo com interdependências altamente complexas. Por essas razões, representa um dos empreendimentos mais arriscados das corporações modernas (Cooper, 2001) e sua gestão é uma tarefa difícil. Desta forma, a busca por padrões eficazes de organização deve incluir uma análise detalhada de como o desenvolvimento realmente ocorre.

2.2.1 Modelo de Desenvolvimento de Produtos

Vários modelos foram criados nas últimas décadas contendo normas, diretrizes e procedimentos para a gestão do desenvolvimento de produtos (Engwall et al., 2005). Os modelos inicialmente descreviam o processo como um sistema linear, com fases independentes e sequenciais; estudos mais recentes, consideram que o processo de desenvolvimento evolui através de fases com *loops* de sobreposição e de *feedback* (MCCARTHY et al., 2006).

Davila (2000) explica que o objetivo do desenvolvimento do produto é traduzir uma ideia em um ativo físico tangível. O processo é estruturado em torno de fases bem definidas; cada fase termina com uma reunião de tomada de decisão em que a gestão decide sobre o futuro do projeto. Segundo o autor, um projeto típico de desenvolvimento de produto começa com uma fase de planejamento para estabelecer os requisitos do projeto. Durante esta fase, a organização define o mercado alvo e as características do produto. Estas características incluem a funcionalidade, preço, desempenho e tempo de lançamento previsto. A fase inicial traz uma ampla descrição dessas características. A segunda fase - conceito de *design* - entra em mais detalhes sobre as especificações do produto e os requisitos do projeto de desenvolvimento: custos teóricos, desempenho tecnológico, interfaces de clientes, datas de lançamento de mercado, e recursos organizacionais. A terceira fase - *design* do produto - é o desenvolvimento real do produto físico. É nesta fase que são feitas as trocas e as informações são transformadas em um produto tangível. As últimas duas fases de testes – testes e início da produção - confirmam que o produto cumpre os seus objetivos e preparam-no para a liberação. O processo, embora descrito como linear, é um processo iterativo: as

especificações do produto ou até mesmo o conceito de produto podem ser reavaliados à luz de novas informações geradas durante o processo.

O desenvolvimento de produtos pode ser classificado através de uma perspectiva acadêmica (perspectivas como Marketing, Engenharia de Produção e *Design*) que inclui (Cheng, 2000): marketing, organização, planejamento e gestão de operações. Pode ser entendido também sob o ponto de vista das suas áreas funcionais. Segundo Engwall et al. (2005), nas últimas décadas, foram criados modelos que incluem regras, diretrizes e procedimentos para gerenciar o desenvolvimento de projetos com o objetivo de determinar a execução do projeto. Estes modelos são uma representação dos principais fluxos do processo do produto de desenvolvimento. Outros modelos foram descritos baseados em fases do seu processo de desenvolvimento. Segundo Rozenfeld et al. (2006), as fases são determinadas pela entrega de um conjunto de resultados, sendo que estes irão compor os elementos do projeto.

Segundo os estudos de Clark e Fujimoto (1991), o processo de desenvolvimento de produtos pode ser caracterizado por um ciclo composto de algumas etapas que vão desde a identificação das necessidades do mercado até a aprovação da produção-piloto. A Figura 2.6 ilustra um processo típico de desenvolvimento com etapas bem definidas.

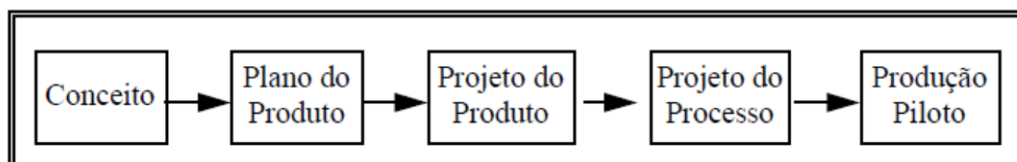


Figura 2.6. Etapas do processo de desenvolvimento de produtos (adaptado de Clark e Fujimoto, 1991).

O PDP pode ser definido através do conceito de funil de desenvolvimento (Figura 2.7), apresentado por Wheelwright e Clark (1992) como um modelo de estratégia de desenvolvimento de produto. As principais atividades apresentadas por este conceito são: criar, definir e selecionar os projetos que poderão gerar produtos ou processos superiores; integrar e coordenar tarefas funcionais e técnicas, bem como as unidades envolvidas; gerenciar os esforços do desenvolvimento coerentemente com as metas do negócio; criar e melhorar as capacidades necessárias para tornar o PDP uma fonte de vantagem competitiva.

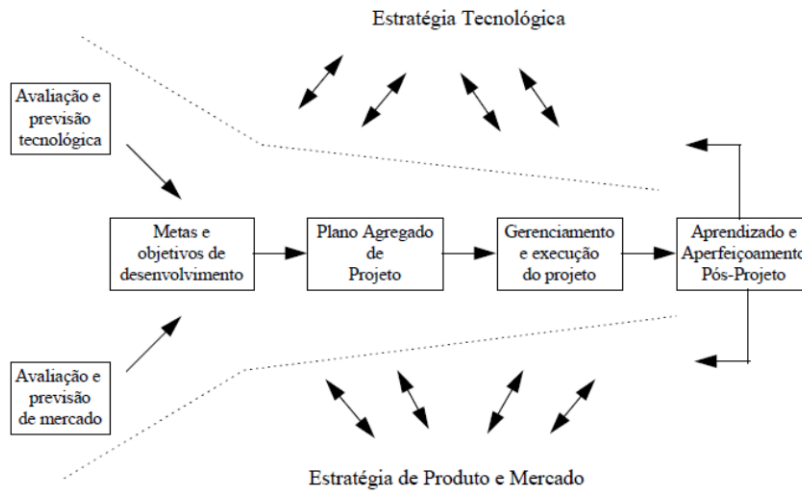


Figura 2.7. Funil de desenvolvimento - Modelo de estratégia de desenvolvimento de produtos (Wheelwright e Clark, 1992).

Cooper (2001) apresenta o processo de desenvolvimento de produtos dividido em fases (Figura 2.8). Este modelo, denominado *stage-gates*, consiste basicamente no sequenciamento das diversas etapas que compõem o processo de desenvolvimento de novos produtos e serviços e na atribuição de um “portão” de decisão anterior a cada etapa. Desta forma existe a necessidade de um processo decisório que pode ser o de prosseguir, modificar ou abortar o desenvolvimento antes que se prossiga para a próxima etapa.

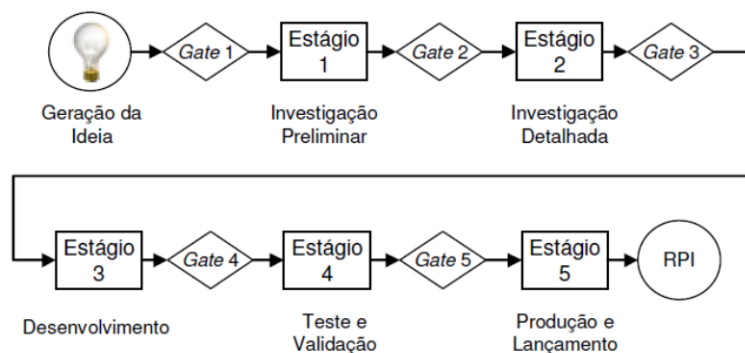


Figura 2.8. Processo de revisão de fases no desenvolvimento de produtos (Cooper, 2001).

No método proposto por Pahl et al. (2005), as etapas do PDP são constituídas por uma lista de atividades e objetivos que deverão ser atingidos. O desenvolvimento e projeto de um produto demandam o planejamento de três aspectos do produto: planejamento do teor do processo de desenvolvimento e de projeto; estabelecimento de um cronograma das etapas de trabalho do processo de desenvolvimento e de projeto; e planejamento dos custos do produto, visando não ultrapassar um limite prefixado. O processo será finalizado com a

documentação do produto e a sua solução. O detalhamento (lista de verificação) destas ações é importante, pois permite um acompanhamento mais adequado no andamento do projeto.

É importante salientar que o fluxograma (Figura 2.9) deste processo apresenta idas e vindas, com uma realimentação constante entre as ações. É um processo dinâmico e em constante construção. Porém este método não leva em consideração aspectos que envolvem mercado, venda do produto e comerciais.

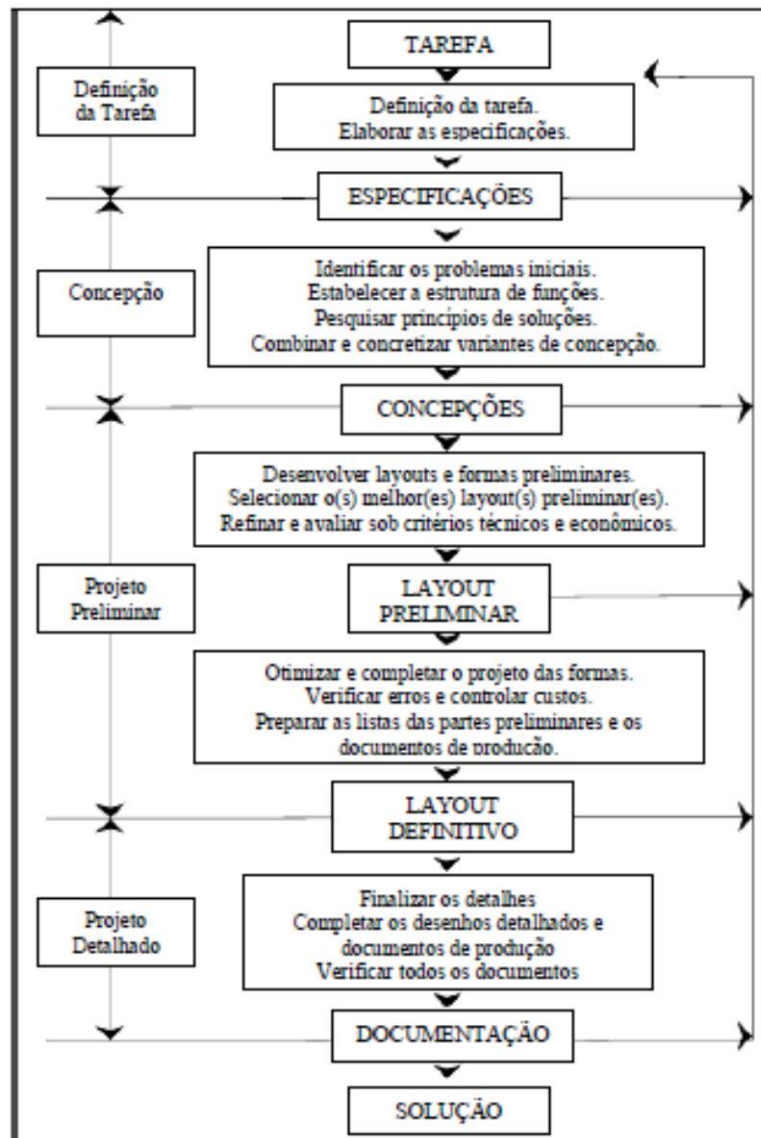


Figura 2.9. Fluxograma do modelo do PDP (Pahl et al., 2005).

Rozenfeld et al. (2006) propõem um modelo (mais completo) dividido em três macrofases (pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento) sendo cada macrofase dividida em fases. A Figura 2.10 apresenta as macrofases e as fases do PDP.

MACROFASES	PRÉ-DESENVOLVIMENTO	DESENVOLVIMENTO	PÓS-DESENVOLVIMENTO
FASES	Planejamento Estratégico de Produtos	Projeto Informacional	Acompanhar Produto e Processo
	Planejamento do Projeto	Projeto Conceitual	Descontinuar Produto no Mercado
		Projeto Detalhado	
		Preparação da Produção do Produto	
		Lançamento do Produto	

Figura 2.10. Macrofases e fases do desenvolvimento de produtos (adaptado de Rozenfeld et al., 2006).

A macrofase de desenvolvimento enfatiza os aspectos tecnológicos correspondentes à definição do produto em si, suas características e forma de produção e domínio de conhecimento da engenharia. Segue uma sucinta descrição das fases desta macrofase (ROZENFELD et al., 2006):

1. *Projeto Informacional*: o objetivo é a partir das informações levantadas no planejamento e em outras fontes, desenvolver um conjunto de informações, o mais completo possível, chamado de especificações-meta do produto. Essas especificações, além de orientar a geração de soluções, fornecem a base sobre a qual serão montados os critérios de avaliação e de tomada de decisão utilizados nas etapas posteriores do processo de desenvolvimento.

2. *Projeto Conceitual*: as atividades da equipe de projeto relacionam-se com a busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema de projeto. A busca por soluções já existentes pode ser feita pela observação de produtos concorrentes ou similares. O processo de criação de soluções é livre de restrições, porém direcionado pelas necessidades, requisitos e especificações de projeto do produto, e auxiliado por métodos de criatividade. A seleção de soluções é feita com base em métodos apropriados que se apóiam nas necessidades ou requisitos previamente definidos.

3. *Projeto Detalhado*: a concepção de produto será detalhada e transformada nas especificações finais, que pode abranger uma ampla gama de documentos, detalhando cada item que o compõe e os respectivos processos de fabricação.

4. *Preparação da Produção do Produto*: engloba a produção do lote piloto, a definição dos processos de produção e manutenção. Ou seja, trata de todas as atividades da cadeia de suprimentos do ponto de vista interno, objetivando a obtenção do produto, culminando com sua liberação.

5. *Lançamento do Produto*: o objetivo é colocar o produto no mercado, juntamente com o resultado da fase anterior, de preparação da produção, visando garantir sua aceitação pelos clientes em potencial, que constituíam em premissas do estudo de viabilidade econômico-financeira deste produto, desenvolvido e monitorado durante todo o processo de desenvolvimento de produto.

Barbalho (2006a) resume o PDP como um processo definido pelas seguintes características:

- É um processo cujo *cerne* é definido pela identificação, projeto e atendimento das necessidades do mercado;
- É um processo que *transforma informações* de mercado e tecnologia em produtos que atendam às demandas dos consumidores;
- É um processo cujo *resultado* é constituído por informações importantes para a produção comercial do produto;
- É um processo no qual há *fases interligadas por decisões* que direcionam o fluxo de atividades a serem realizadas em cada projeto;
- É um processo cujo *escopo temporal* é delimitado pelo ciclo de vida de um produto;
- É um processo no qual um *grande conjunto de atores organizacionais* interagem para a realização das atividades que o caracterizam;
- É um processo operacionalizado através de *projetos*;
- É um processo que comporta um conjunto de *atividades centrais* sem as quais não é possível projetar um novo produto;
- É um processo no qual ocorrem *ciclos de interação* entre atividades de fluxos distintos.

Back et al. (2008) propõem um modelo integrado para o desenvolvimento de produto composto de três macrofases. O planejamento do projeto, que envolve a elaboração do plano do projeto; a elaboração do projeto do produto (projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado) que tem como resultados as especificações de projeto, a concepção do produto, a viabilidade técnica e econômica e a documentação do produto; a

implementação do lote piloto (preparação da produção, lançamento e validação do produto) que tem como resultados a liberação do produto, a liberação do lote piloto e a validação do produto.

2.2.2 Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos

No trabalho apresentado por Barbalho (2006a), há uma extensa análise bibliográfica referente ao desenvolvimento de produtos mecatrônicos e sobre o projeto do processo de produção desses produtos. A Tabela 2.1 sintetiza os trabalhos mais relevantes na área de desenvolvimento de produtos mecatrônicos. Para um estudo mais aprofundado, ver Barbalho (2006a).

Tabela 2.1 – Desenvolvimento de Produtos Mecatrônicos

Autor	Desenvolvimento de produtos mecatrônicos
Buur (1989)	Diferencia os projetos mecânico, eletrônico e de software em relação as suas funções principais, ao projeto conceitual e ao projeto detalhado. Usa diagramas funcionais em conjunto com diagramas de transição de estado para descrever o funcionamento do sistema/produto mecatrônico.
Bradley et al. (1991)	Explicam que alguns produtos mecatrônicos possuem na interface homem-máquina (IHM) o principal fator de satisfação do cliente. A partir do usuário conforme identificados os aspectos de IHM, são realizadas: análise do problema, especificação de requisitos, projeto da arquitetura, projeto físico, implementação, teste e <i>debug</i> e manutenção.
Horikawa (2000)	Sua metodologia de projeto de um sistema mecatrônico parte da ideia de que é possível realizar paralelamente o projeto mecânico e do sistema de controle.
Walters et al. (2000)	Explica que ao se definir o conceito do produto, o sistema deve ser dividido em domínios tecnológicos. A atividade principal do projeto eletrônico deve ser a escolha de estratégias de solução para o problema de projeto. As diferentes estratégias podem afetar as soluções encontradas em outros domínios. Cada escolha determinará um conjunto de ferramentas de projeto e simulação específica que será necessário para a realização de testes eletrônicos e de integração.
Höne (2001)	Sugere que seja estabelecida uma classificação sistemática dos elementos funcionais mecânicos no sistema.
Dorf e Bishop (2001)	Descrevem um método de projeto para a engenharia de sistemas de controle. Inicialmente as metas de controle são estabelecidas, as variáveis a controlar são identificadas e suas especificações escritas. Em seguida é estabelecida a configuração do sistema e a identificação do atuador. A

	partir dessas etapas obtém-se o modelo do processo, do atuador e do sensor. O controlador pode ser então descrito e seus parâmetros ajustados. Se o desempenho atender às especificações, o projeto pode ser finalizado.
Bernardi et al. (2002)	Especificam etapas para o projeto mecânico, de engenharia de software e eletrônico. O projeto mecânico é baseado em um sólido procedimento de cálculo estrutural e de mecanismos e utiliza simulações por elementos finitos para definir margens de segurança para o produto. Nos projetos de <i>software</i> e eletrônica, procedimentos de testes com protótipos físicos são normalmente necessários uma vez que há problemas relacionados com o nível de ruído ou carregamento térmico dos circuitos eletrônicos que dificilmente são detectados por simulação. Apresentam também os chamados “procedimentos tradicionais de projeto mecatrônico”. Esses procedimentos tradicionais são contrapostos por uma nova abordagem para o projeto desses produtos baseada no uso de ambientes virtuais para a simulação de todo o sistema.

Além dos métodos usados para se desenvolver os produtos mecatrônicos, que levam em consideração seu projeto mecânico, eletrônico e de *software*, outro fator não menos importante que deve ser levado em consideração no desenvolvimento dos produtos são as normas que os regulam e suas certificações. Cada produto possui uma norma que deve ser obedecida. Um produto que não se encontra em concordância com as normas pode gerar multas e restrições de funcionamento à empresa que o produz. Melhorias no processo de desenvolvimento de produtos podem ser observadas quando se aplica o MRM (este modelo será melhor explicitado no Capítulo 3). Barbalho (2006a) apresenta em seu trabalho aplicações do MRM relacionadas com a documentação e registro das atividades do PDP visando adequação as normas da ISO 9001.

2.3 Fatores que influenciam no processo de desenvolvimento de produtos

Ampla literatura analisa os produtos mecatrônicos sob a denominação “produtos complexos” enfatizando o aspecto da alta complexidade característica desses produtos. A Tabela 2.2 (adaptada de Kim e Wilemon, 2003) traz algumas definições para a complexidade de produtos no desenvolvimento de projetos. Nota-se que alguns autores mencionam complexidade do projeto outros, complexidade do produto. No estudo de caso apresentado por Müller et al. (2013), os projetos são classificados em relação ao seu escopo e sua complexidade (notação aplicada neste estudo).

Tabela 2.2 – Definições de Complexidade

Autor	Constructo	Definição de Complexidade
Larson e Gobeli (1989)	Complexidade do projeto	Refere-se ao número de diferentes disciplinas ou departamentos envolvidos no projeto.
Murmann (1994)	Complexidade do produto	Número de partes no produto.
Meyer e Utterback (1995)	Complexidade da integração	Número de tecnologias envolvidas na criação de novos produtos.
Griffin (1997)	Complexidade do produto	Número de funções incorporadas aos produtos.
Clift e Vandenbosch (1999)	Complexidade do projeto	Projetos com muitas modificações e que levam a novos produtos.
Tatikonda e Rosenthal (2000)	Complexidade do projeto	Natureza, quantidade e magnitude organizacional das sub-tarefas e suas interações. Três características devem ser consideradas: o grau de interdependência entre o produto e o processo tecnológico a ser desenvolvidos, a inovação do projeto e seu desenvolvimento organizacional e a dificuldade de desenvolver os objetivos do projeto.
Sbragia (2000)	Complexidade do projeto	O número de áreas funcionais envolvidas no projeto; intensidade de interação entre os elementos de diferentes áreas funcionais do projeto; e dificuldade de cooperação entre as áreas funcionais envolvidas no projeto.
Novak e Epinger (2001)	Complexidade do produto	Três elementos principais: número de componentes do produto para especificar e produzir, extensão da interação para administrar estes componentes (partes de acoplamento) e grau de inovação do produto.
Kim e Wilemon (2003)	Complexidade do produto	Consistem na dificuldade e na incerteza gerada pelo número de tecnologias, componentes e funções em um processo de desenvolvimento de produtos, analisados sob a perspectiva gerencial.

Fonte: Adaptado de Kim e Wilemon (2003).

As fontes que determinam o nível da complexidade nos projetos são várias: tecnológica (integração entre as partes, nível de maturidade), mercado (necessidade dos usuários, concorrência, estrutura regulatória), marketing (processo de educação dos usuários, canais de distribuição, preços), desenvolvimento, organizacional e intra-organizacional. Considerando o aspecto da complexidade, o interesse particular deste estudo é a identificação de parâmetros que se relacionem com a complexidade do produto em si. Tal elemento está na origem das abordagens sistemáticas de desenvolvimento de produtos já que autores como Pugh (1990) consideram o número de componentes do produto como sendo representativo da complexidade do seu desenvolvimento.

Existe uma proporcionalidade direta entre um padrão de qualidade dado e o tempo em que tal padrão é atingido em um projeto em função da complexidade. Existe ainda, uma proporcionalidade inversa entre um padrão de qualidade dado e o tempo em que tal padrão é atingido em um projeto em função da senioridade da equipe. Assim, pode-se dizer que o outro fator que influencia o desenvolvimento dos projetos é a senioridade. Antes de defini-lo, é necessário entender alguns aspectos sobre a qualificação (habilidades, competência, experiência, etc) dos desenvolvedores responsáveis pelo desenvolvimento dos projetos.

Tigre (2006), em seu livro *Gestão da Inovação*, explica que no paradigma da manufatura, também chamado *toyotista*, os trabalhadores são treinados para executar múltiplas funções, o que proporciona maior flexibilização no cumprimento de tarefas diferenciadas e atende às crescentes exigências de tecnologias e processos integrados. Como a tecnologia e os processos estão frequentemente em transformação, as qualificações exigidas dos trabalhadores estão também em constante mutação.

Maximiano (2012) descreve as responsabilidades do gerente de projetos como sendo suas obrigações em relação aos resultados, atividades, recursos ou padrões de conduta. O gerente de projetos deve possibilitar que o projeto seja executado dentro dos padrões de desempenho, relacionados às metas, prazos e custos com integração entre fatores como comunicação entre funcionários, gestão de recursos, contratos, materiais e riscos.

Prahalad e Hamel (1990) descrevem competências como sendo a dimensão individual, referindo-se à capacidade do indivíduo para resolver problemas e gerar resultados. Parry (1996) define competência como um agrupamento de conhecimentos, habilidades e atitudes relacionados, que afetam a maior parte de uma tarefa (papel ou responsabilidade), correlacionado à performance, que possa ser medido contra parâmetros bem-aceitos, e que

pode ser melhorada através de treinamento e desenvolvimento. Para Resende (2000), a competência é resultado da união de conhecimentos (formação, treinamento, experiência e auto-desenvolvimento) com comportamentos (habilidades, interesse e vontade).

Maximiano (2008) considera os estudos da IPMA (*International Project Management Association*) como um dos mais importantes, que divide as competências em três grupos: Competências Técnicas (são as competências necessárias para iniciar, conduzir e encerrar o projeto, que estão relacionadas com as áreas de conhecimento escopo, tempo, custo, risco e oportunidade e estrutura organizacional), Competências Comportamentais (liderança, comprometimento e motivação, autocontrole, criatividade etc.) e Competências Contextuais (domínio dos conceitos de portfólio e programa, negócios, saúde, segurança e ambiente, aspectos legais, etc.).

A implementação dos projetos nas organizações pode ser melhorada através da gestão de projetos. O *Project Management Office* (PMO) apresenta uma estrutura que se alinha as necessidades específicas de cada organização implementando uma cultura de boas práticas em gestão de projetos.

Müller et al (2013) apresentam um estudo de casos múltiplos em PMO onde é apresentada uma construção de *framework* de análise (*role triangle*) que estabelece três papéis para os PMO's: controle (*superordinate*), serviço (*subordinate*) e parceria (*coequal*). Enquanto os serviços (*subordinate role profile*) e controles (*superordinate role profile*) auxiliam a eficácia organizacional e exploração do conhecimento, a parceria (*coequal role profile*) preenche a lacuna necessária para a exploração potencial de novos conhecimentos. Segundo os autores, este modelo triangular reduz a alta complexidade das relações PMO em um *framework* tipologicamente simples, o que faz com que se torne uma ferramenta para os gestores no desenvolvimento organizacional. Diante do estudo de caso apresentado pelos autores e embasados na literatura sobre aprendizagem organizacional e inovação, o artigo sugere que, para o gerenciamento de projetos ser capaz de habilitar a capacidade de absorção dos gestores e alcançar a inovação sustentável, os PMO's devem envolver e intensificar a dimensão de parceria em seus perfis de papel global.

Singh et al. (2009) apresentam um estudo utilizando Delphi no qual identificam os principais desafios na implementação do PMO: (1) cultura corporativa rígida e incapaz de gerir a resistência organizacional em mudar, (2) falta de gerentes de projeto (*project managers* – PM's) experientes e de liderança PMO, e (3) falta de estratégia de gestão de

mudança adequada. Para superar estes desafios, os autores sugerem ter um forte PMO *champion*, começar ao poucos e mostrar o valor do PMO, obter suporte de formadores de opinião, contratar um gerente de programas experiente que entenda a organização, colocar os mais talentosos gerentes de projeto na implantação do PMO, adotar uma estratégia de gestão de mudança flexível e padronizar processos de PM antes de implementar o PMO.

O perfil do gerente de projetos, segundo Pheng e Chuan (2006), envolve competências na resolução de problemas, na tomada de decisões, no reconhecimento de oportunidades e na solução de conflitos entre os envolvidos. A experiência do gerente é destacada por Ogunlana et al. (2002) e Pheng e Chuan (2006), que apontam este fator como um facilitador, que pode ajudar a evitar problemas semelhantes ocorridos em projetos anteriores, bem como a resolver conflitos e tomar decisões assertivas.

Pelas definições apresentadas, é possível definir senioridade. Senioridade, neste trabalho, são as diversas competências desenvolvidas pelo gestor, suas capacidades, conhecimentos e experiências que tornam possível distinguir um profissional de alto desempenho daqueles de desempenho regular ou ruim em determinada função e que são de suma relevância para que o projeto seja adequadamente conduzido a um bom nível de desempenho.

As atividades de um projeto são usualmente complexas, não repetitivas, tecnicamente ou logicamente interdependentes e devem seguir uma sequência específica pré-determinada, visando atingir o objetivo para o qual o projeto foi criado respeitando suas especificações (Wisocki e Mcgary, 2003). O guia de melhores práticas em gerenciamento de projetos, Guia PMBOK, prescreve um conjunto de disciplinas (processos, ferramentas e técnicas) que orientam o gerenciamento de projetos.

O gerenciamento dos projetos é organizado em dez áreas de conhecimentos: gerenciamento da integração, do escopo, do tempo, dos custos, da qualidade, dos recursos humanos, das comunicações, dos riscos, das aquisições e das partes interessadas (*stakeholders*) do projeto. O Guia PMBOK (2013) explica que a relação entre esses fatores ocorre de tal forma que se algum deles mudar, é provável que algum outro fator seja alterado. As áreas mais críticas do processo são o escopo, o tempo e o custo, que fazem parte da chamada restrição tripla.

Segue uma breve descrição das áreas do conhecimento. Para mais detalhes, ver o Guia PMBOK (2013).

1. *Gerenciamento da Integração*: Definem os processos e as atividades para identificar, definir, combinar, unificar, e coordenar os vários processos e atividades dentro dos grupos de processos de gerenciamento do projeto. Isso inclui: desenvolver o termo de abertura do projeto; desenvolver o plano de gerenciamento do projeto; orientar e gerenciar a execução do projeto; monitorar e controlar o trabalho desenvolvido pelo projeto; realizar o controle integrado de mudanças; encerrar o projeto ou uma fase do projeto.

2. *Gerenciamento do Escopo*: Definem os processos necessários para assegurar que o projeto inclua todo o trabalho necessário (e apenas o trabalho necessário) para que o projeto seja concluído com sucesso. Isso inclui: planejar o gerenciamento do escopo; coletar requisitos; definir o escopo; criar a estrutura analítica do projeto (EAP); validar o escopo; controlar o escopo.

3. *Gerenciamento do Tempo*: Definem os processos necessários para gerenciar o término pontual do projeto. Isso inclui: planejar o gerenciamento do cronograma; definir as atividades; sequenciar as atividades; estimar os recursos das atividades; estimar as durações das atividades; desenvolver o cronograma; controlar o cronograma.

4. *Gerenciamento de Custos*: Definem os processos envolvidos em planejamento, estimativas, orçamentos, financiamentos, gerenciamento e controle dos custos, de modo que o projeto possa ser terminado dentro do orçamento aprovado. Isso inclui: planejar o gerenciamento dos custos; estimar os custos; determinar o orçamento; controlar os custos.

5. *Gerenciamento da Qualidade*: Descrevem os processos e as atividades da organização executora que determinam as políticas de qualidade, os objetivos e as responsabilidades, de modo que o projeto satisfaça às necessidades para as quais foi empreendido. Isso inclui: planejar o gerenciamento da qualidade; realizar a garantia da qualidade; realizar o controle da qualidade.

6. *Gerenciamento dos Recursos Humanos*: Descrevem os processos que organizam, gerenciam, e guiam a equipe do projeto. Isso inclui: desenvolver o plano de recursos humanos; mobilizar a equipe do projeto; desenvolver a equipe do projeto; gerenciar a equipe do projeto.

7. *Gerenciamento das Comunicações*: Descrevem os processos necessários para assegurar que as informações do projeto sejam planejadas, coletadas, criadas, distribuídas, armazenadas, recuperadas, gerenciadas, controladas, monitoradas, e finalmente dispostas de maneira oportuna e apropriada. Isso inclui: planejar o gerenciamento das comunicações; gerenciar as comunicações; controlar as comunicações.

8. *Gerenciamento dos Riscos*: Descrevem os processos de planejamento, identificação, análise, planejamento de respostas e controle dos riscos do projeto. Isso inclui: planejar o gerenciamento dos riscos; identificar riscos; realizar a análise qualitativa dos riscos; realizar a análise quantitativa dos riscos; planejar as respostas aos riscos; controlar os riscos.

9. *Gerenciamento de Aquisições*: Descrevem os processos necessários para comprar ou adquirir produtos, serviços ou resultados externos à equipe do projeto. Isso inclui: planejar o gerenciamento das aquisições; conduzir as aquisições; controlar as aquisições; encerrar as aquisições.

10. *Gerenciamento de Stakeholders*: Definem os processos exigidos para identificar todas as pessoas, grupos ou organizações que podem impactar ou serem impactados pelo projeto, analisar as expectativas das partes interessadas e seu impacto no projeto, e desenvolver estratégias de gerenciamento apropriadas para o engajamento eficaz das partes interessadas nas decisões e execução do projeto. Isso inclui: identificar as partes interessadas; planejar o gerenciamento das partes interessadas; gerenciar o engajamento das partes interessadas; controlar o engajamento das partes interessadas.

Um projeto é um empreendimento temporário, desenvolvido para se criar um produto. Por ser temporário, estabelece um início e um fim definidos. Seu fim é alcançado quando seus objetivos são atingidos. O gerenciamento de projetos é então a aplicação de conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto a fim de atender aos seus requisitos de modo que os fatores que influenciam no desenvolvimento do projeto – senioridade e complexidade – sejam gerenciados da melhor forma.

3. MODELO DE REFERÊNCIA MECATRÔNICO

Davila (2000) define o desenvolvimento de produtos como um processo incerto. Sendo assim, este precisa ser estruturado através de fases bem definidas, culminando com uma tomada de decisão sobre o futuro do projeto do novo produto. Paula e Mello (2013) explicam que essas fases representam o processo de negócio como um fluxo contínuo de atividades, com entradas e saídas bem distintas que determinam o sucesso ou insucesso da empresa no lançamento de um produto no mercado.

Amaral (2008) agrupa as fases do processo de desenvolvimento em dois tipos de modelos: os modelos de referência (aqueles elaborados a partir das melhores práticas do PDP e representam uma aplicação mais ampla e geral que pode ser utilizada como referência para o desenvolvimento de modelos específicos) e os modelos específicos (aqueles que representam e/ou são utilizados por uma organização através de um processo de adaptação).

O papel do desenvolvimento de produtos deve ser o de contribuir para a competitividade da empresa. Para desempenhar este papel, Rozenfeld et al. (2006) advoga pela necessidade da implementação de um modelo de referência. Este modelo deve demonstrar a capacidade de aperfeiçoamento e de controle do processo de desenvolvimento dos produtos (PDP) bem como a interação entre as fontes de inovação tecnológicas e o mercado.

O modelo de referência contribui para que as empresas passem a executar um processo de desenvolvimento de produtos mais formal e sistemático, integrado aos demais processos empresariais, com os participantes da cadeia de fornecimento e com os clientes finais. Fornecem, ainda, os meios para que as empresas inovem e desenvolvam, dentro de suas fábricas, novos produtos (BACK et al., 2008).

A Figura 3.1 apresenta um método de modelagem utilizado para confeccionar um modelo de referência mecatrônico desenvolvido por Barbalho (2006a). A parte central apresenta os “passos” da modelagem. As caixas tracejadas na coluna “passos” apresentam os diferentes modelos confeccionados para representar o PDP mecatrônico. À esquerda são apresentados os “tipos de conteúdo” desenvolvidos em cada passo do processo de modelagem. À direita estão representadas as “técnicas” de modelagem utilizadas para representar cada modelo e os “objetivos” de cada um deles.

O modelo lógico confeccionado consiste em um modelo entidade-relacionamento onde existe uma inter-relação entre os conteúdos necessários ao modelo mecatrônico. O modelo entidade-relacionamento é um modelo conceitual muito utilizado na Engenharia de Software para descrever os objetos (entidades) envolvidos em um domínio de negócios, com suas características (atributos) e como elas se relacionam entre si (relacionamentos).

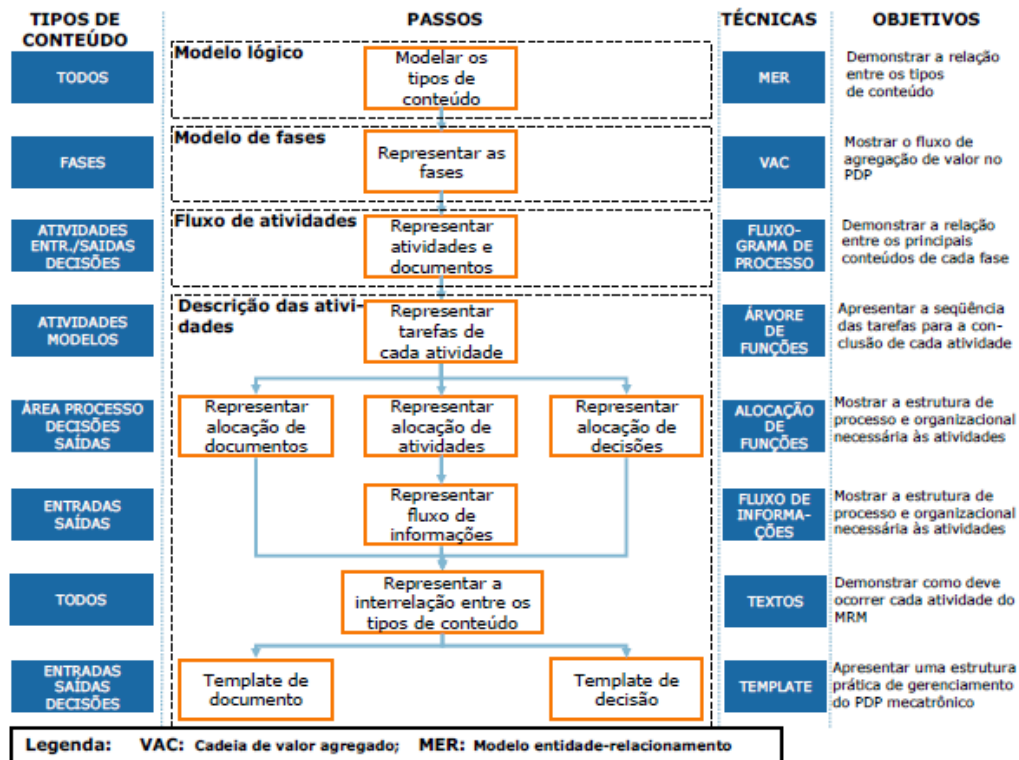


Figura 3.1. Passos para a confecção do MRM (Barbalho, 2006a).

Barbalho e Rozenfeld (2013) desenvolveram o MRM baseado em fases. Cada fase é detalhada através de fluxos de atividades que descreve a agregação de valor, suas entradas, saídas e decisões. As fases são definidas em função dos resultados que geram e possuem muitas atividades, que ocasionam um grande número de tarefas.

A cadeia de valor descreve uma variedade de atividades que devem descrever o produto ou serviço desde sua concepção, através de diferentes fases de produção (implicação de uma combinação de transformação física e a entrada de vários produtos e serviços), entrega aos consumidores finais e disposição final pós-uso. A cadeia de valor agregado é um modelo que representa a Visão Sistêmica dos Processos Organizacionais, para que se tenha uma Macro-Visão da interligação e/ou encadeamento dos macroprocessos, processos, subprocessos, e tarefas, seguindo a sequência de execução dos mesmos.

A Figura 3.2 mostra a sequência das fases do MRM. O formato elíptico da Figura sugere que as fases intermediárias necessitam de mais esforço e tempo para sua elaboração. Abaixo seguem as doze fases definidas por Barbalho e Rozenfeld (2013) seguidas de uma sucinta definição (para mais detalhes, ver Barbalho (2006a) e Barbalho e Rozenfeld (2013)):

- Estratégia: definição dos objetivos estratégicos a serem perseguidos em cada linha de produtos (LDP);
- Portfólio: definição do portfólio de cada LDP;
- Especificações: definição das especificações de cada produto;
- Planejamento do projeto: definição do plano de projeto;
- Concepção: definição dos principais componentes e princípios de solução para as funções principais do produto mecatrônico;
- Planejamento Técnico: detalhamento do plano de projeto com base na concepção definida;
- Projeto Técnico: soluções técnicas para as funções principais do produto;
- Otimização: detalhamento e teste de soluções para funções secundárias do produto e realização de análises necessárias ao aumento da robustez e confiabilidade do produto;
- Homologação: homologação do processo de fabricação e montagem do produto;
- Validação: validação e certificação do produto;
- Lançamento: lançamento do produto no mercado;
- Monitoramento: acompanhamento dos resultados conseguidos com o produto e gerenciamento das modificações realizadas na configuração inicial de produção.

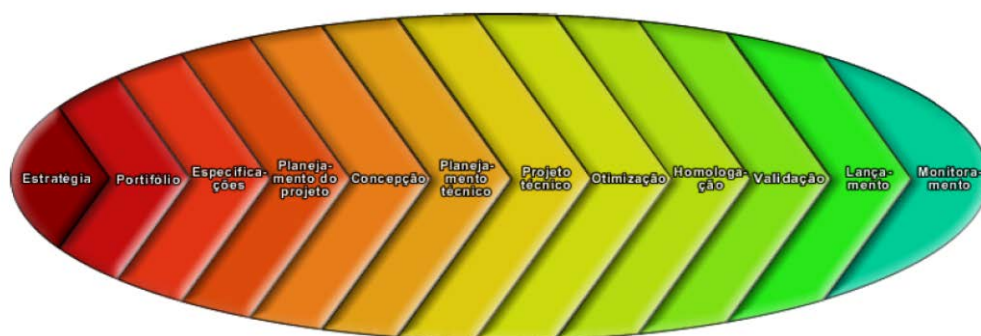


Figura 3.2. Fases do MRM (Barbalho e Rozenfeld, 2013).

As principais diferenças do MRM propostas por Barbalho e Rozenfeld (2013) para um modelo de desenvolvimento de produtos genérico estão vinculadas à incorporação de detalhes de projeto mecânico, eletrônico e de software, assim como suas interdependências. Esse diferencial pode ser encontrado nas doze fases do MRM, porém são mais contundentes na fase de projeto técnico (foco deste estudo) pelo fato de ser nesse momento que as soluções mecatrônicas ganham concretude, são testadas por meio de protótipos e verificadas contra os requisitos do produto.

Uma vez que é um processo, a aplicação do MRM demanda a verificação de quais atividades devem ser utilizadas em cada fase de um dado projeto de produto. Ou seja, o processo se concretiza por meio de projetos e os projetos são planejados utilizando-se métodos tradicionais de programação de atividades, como gráficos de Gantt, redes PERT/CPM (Program Evaluation and Review Technique/Critical Path Method) ou programação por corrente crítica (PMI, 2013).

Modelos de gestão de projetos tradicionais baseados no método PERT/CPM descrevem processos, recursos, metas e escopo de uma forma estática com estimativa de duração e relações de precedência que descrevem a rede de atividades de desenvolvimento. Este método é limitado, pois usa uma medida de ação indireta (tempo) e ao interagir as características e as relações entre escopo, recursos e processos em cada atividade, o usam em uma única estimativa de duração. A iteração tende a ser ignorada ou exige-se que a iteração seja incorporada implicitamente em estimativas de duração e relações de precedência.

Para ser completo, um modelo de projeto deve modelar a rede de fases do projeto. A MSD (modelagem por sistemas dinâmicos) pode ser uma alternativa viável para projetos complexos como os mecatrônicos, em que várias disciplinas estão envolvidas nos projetos e suas complexidades se somam no cotidiano dos projetos. Entretanto, sua aplicação nesse contexto ainda é limitada e ainda não utilizada sob o ponto de vista preditivo, conforme visto no próximo capítulo.

3.1 Projeto Técnico

Barbalho (2006a) explica que o projeto técnico tem como finalidade desenvolver soluções mecânica, eletrônica, de software etc. para as funções primárias do produto mecatrônico. As funções primárias do produto no MRM são aquelas que o equipamento deve

atender para que possa cumprir seu objetivo básico. Para entender melhor estas funções e objetivos, consideremos um veículo híbrido. O objetivo básico deste veículo é o deslocamento. Sua função principal é transmitir força para as rodas. Para executar a função principal, é necessário executar as funções primárias armazenar energia (combustível e elétrica), converter energia (mecânica), controlar energia elétrica, acionar motor elétrico, gerenciar sinal, transmitir torque elétrico, mecânico e força. No MRM as atividades das diferentes áreas técnicas envolvidas com o projeto mecatrônico são inter-relacionadas de maneira a demonstrar o fluxo de ações necessário ao desenvolvimento das soluções nas diversas especialidades envolvidas.

A Figura 3.3 apresenta as atividades da fase do projeto técnico, seu inter-relacionamento, as entradas da fase e os documentos dela resultantes. Abaixo seguem as especificações das etapas desta fase (BARBALHO, 2006b):

a) **Entradas:**

i) Especificações de projeto: contém as especificações do produto com suas diretrizes e métricas com a finalidade de orientar o processo de desenvolvimento do produto. Devem conter essencialmente as necessidades do cliente, as métricas e o seu respectivo valor meta de qualidade do produto, os requisitos normativos e o conceito do produto.

ii) Plano técnico do projeto: reúne as informações do planejamento técnico, ou seja, a arquitetura do produto, a especificação de interface e controle, o plano de gestão de parâmetros críticos do processo, um sumário da análise de requisitos de *software* e a árvore de produtos.

b) **Incorporação de novas tecnologias:** quando a tecnologia for considerada madura, deve haver a sua incorporação no desenvolvimento de um novo produto; mas em outros casos, é necessário o desenvolvimento de uma nova tecnologia para integração no projeto do produto novo. O MRM não é um modelo que desenvolve novas tecnologias, porém comporta um conjunto de tarefas que permitem que sejam projetadas novas tecnologias. O desenvolvimento de novas tecnologias passa pela invenção, escolha do *hardware* que aperfeiçoe a robustez do sistema, utilização de modelos matemáticos que otimizem o sistema e identifique valores críticos para o ruído e realização de testes de otimização da robustez da tecnologia.

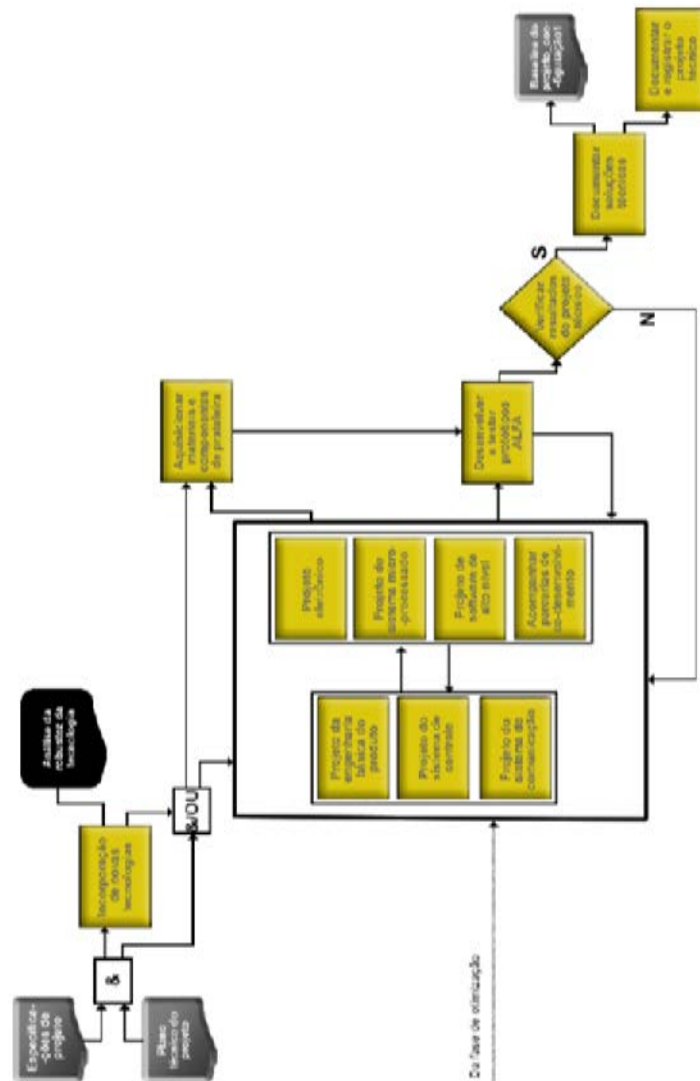


Figura 3.3. Fase do Projeto Técnico (Barbalho, 2006a).

c) **Análise da robustez da tecnologia:** documento que compila os resultados da nova tecnologia desenvolvida especificamente para ser aplicada no produto considerado. Este documento especifica a descrição da nova tecnologia desenvolvida, identifica as partes e componentes que compõem a nova tecnologia, descreve os testes realizados com a nova tecnologia e os parâmetros críticos observados, identifica as aplicações da nova tecnologia para o produto a ser desenvolvido e potencial aplicações.

d) **Aquisicionar materiais e componentes de prateleira:** consiste na aquisição de materiais e componentes de prateleira que são básicos para que sejam realizados os testes com o protótipo ALFA do produto. Surge da necessidade das demandas das áreas técnicas e do esboço de aplicação na nova tecnologia e culmina com o registro de entrada de materiais e

componentes. Para efetuar estas aquisições, devem-se identificar os requisitos de qualidade para os materiais e componentes e os fornecedores, realizar cotações, analisar as condições de fornecimento para prototipagem e finalmente, comprar e receber os itens de prateleira.

As entradas dos itens (e) a (k) consistem no plano técnico do projeto, nas especificações do produto e eventualmente, no esboço da aplicação das novas tecnologias desenvolvidas.

e) **Projeto da engenharia básica do produto:** é o detalhamento da concepção do produto para sua função principal. Tem como funções: analisar a forma e dimensões do produto, projetar mecanismos, realizar cálculos necessários ao produto, especificar componentes e materiais, simular o funcionamento do produto, projetar a mecânica de suporte funcional do produto, identificar os possíveis processos de fabricação dos componentes e montagem do produto e especificar tolerâncias dimensionais e geométricas. Tem como saídas os desenhos de fabricação, a especificação de materiais e componentes, relatórios de simulação do produto e o projeto CAD (*computer aided design*).

f) **Projeto do sistema de controle:** Consiste na identificação dos parâmetros a serem controlados no sistema, na identificação de métodos de controle aplicáveis ao problema, na escolha de sensores e atuadores, no projeto do controlador e em simulações ou testes realizados com o sistema em operação. Para desenvolver o projeto do sistema de controle é necessário: estabelecer variáveis e metas de controle, estabelecer a arquitetura e determinar o atuador, pesquisar e escolher o sensor/transdutor, obter o modelo do processo, do atuador e do sensor, descrever o controlador e selecionar os parâmetros a serem controlados e otimizar os parâmetros e analisar o desempenho. Tem como saídas as especificações para o funcionamento dos sensores e atuadores, o diagrama de blocos do sistema de controle e um relatório de simulação do controlador no qual estejam descritos os parâmetros de ajuste do sistema de controle.

g) **Projeto do sistema de comunicação:** consiste no projeto do sistema de comunicação necessário à operação do produto. Neste projeto é possível definir a estrutura e o protocolo de comunicação, definir os sinais de telemetria e telecomando para sensoriamento remoto, projetar o sistema de antenas, o transmissor e o receptor. Tem como saídas a especificação da antena, do transmissor, do receptor, de topologia e protocolo de comunicação.

h) **Projeto eletrônico:** projeto dos componentes, circuitos e dispositivos eletrônicos usados no equipamento. A eletrônica desenvolvida nessa fase do projeto é apenas a que implementa as funcionalidades principais do equipamento. O objetivo é que o protótipo ALFA funcione a contento. Nesta etapa devem-se desenvolver diagramas de blocos do projeto eletrônico, desenvolver detalhes das interfaces entre os módulos eletrônicos, escolher os componentes principais de cada módulo, conectores e cablagem, detalhar e simular esquemáticos de cada módulo, adquirir componentes principais por módulo, detalhar o *lay-out* de placas de circuito impresso e desenvolver documentação preliminar de fabricação, montagem e testes de eletrônica. Tem como saídas as especificações dos componentes utilizados, os esquemáticos dos circuitos, desenhos de fabricação para as placas eletrônicas, mapas e listas de montagem e procedimentos de testes das placas.

i) **Projeto do sistema micro-processado:** consiste no projeto do *software assembly* que implementa as funções principais e do sistema de controle do equipamento. Sua função é: identificar sinais de controle e interrupções e funções a serem implementadas, especificar memória, desempenho da CPU e unidades de entrada e saída necessários, escolher e adquirir componentes microprocessados, implementar sistema em *assembly*, elaborar procedimento de teste e prototipar circuito impresso, carregar *software* e testar o sistema. Tem como saídas os códigos-fonte acompanhados de fluxogramas lógicos de operação do *software* e os registros dos testes realizados com o *software assembly* projetado.

j) **Projeto de *software* de alto nível:** definido pelo desenvolvimento de programas em linguagem de alto nível projetados para implementar as características funcionais e de controle do equipamento. Esta etapa tem como funções: definir a linguagem de programação, definir o sistema operacional a ser utilizado, definir módulos de interface com a eletrônica, definir o banco de dados/modo de acesso a ser utilizado, detalhar o desenho do *software*, implementar o *software* e a base de dados e realizar testes com o *software* desenvolvido. Tem como saídas os códigos-fonte acompanhados de fluxogramas lógicos de operação do *software* e os registros dos testes de unidade realizados.

k) **Acompanhar parcerias de co-desenvolvimento:** é a integração e acompanhamento do projeto e fornecimento de partes subcontratadas que implementam funções principais do produto. Desenvolve *checklists* de controle da qualidade das aquisições, desenvolve integração do parceiro ao projeto, realiza auditoria em fornecedores e subcontratados e avalia o lote de protótipo ALFA. Tem como saídas a documentação técnica detalhada do item

subcontratado e um plano de controle de item subcontratado a ser usado nas etapas seguintes de fornecimento do produto.

As atividades descritas nos itens (e) a (k) podem ser retomadas caso o protótipo ALFA não cumpra as métricas estabelecidas na matriz de verificação do produto ou caso a análise realizada no *gate* da fase considere os resultados insatisfatórios.

l) **Desenvolver e testar protótipos ALFA:** Trata-se de desenvolver e testar protótipos cuja função é provar que as soluções desenvolvidas para as funções primárias do produto ou subsistema cumprem as métricas de qualidade e/ou atendem às necessidades do cliente. Objetiva comprovar que as soluções de projeto dos componentes mecatrônicos básicos do sistema conseguem produzir as especificações do produto. Nesta etapa deve-se: planejar os protótipos e testes, receber e integrar subsistemas subcontratados, montar e integrar subsistemas, construir e testar protótipo funcional ALFA, produzir documentação de manufatura e elaborar relatório de testes do protótipo ALFA. As entradas para a atividade de confecção e teste de protótipos ALFA são as saídas das atividades técnicas e de acompanhamento de fornecedores realizadas ao longo da fase de projeto técnico. Ou seja, todos os relatórios de simulação e de testes com protótipos parciais de bancada são utilizados, juntamente com a MATRIZ DE VERIFICAÇÃO do projeto, para elaborar procedimentos de teste detalhados aos quais os protótipos ALFA serão submetidos. Um relatório de testes é gerado para cada protótipo ALFA testado. Caso os testes resultem no atendimento dos requisitos, esse relatório é acrescido dos procedimentos de testes, fabricação e montagem utilizados no protótipo aprovado e é gerado um relatório de aprovação. Caso negativo, são geradas necessidades de revisão do projeto a serem utilizadas para refazer atividades técnicas.

m) **Verificar resultados do projeto técnico:** esse *gate* trata de uma atualização do plano de projetos com revisão nas metas de prazo e custo baseada nas soluções desenvolvidas e nos resultados do protótipo ALFA. Neste *gate* devem-se atualizar orçamentos e metas financeiras do produto e do projeto, analisar o cumprimento do *checklist* de *gate* e de critérios de qualidade do projeto técnico, verificar o andamento do projeto e negócio e as necessidades de mudanças nas especificações do produto e do processo e atualizar o planejamento do projeto. A entrada básica desta atividade é o documento “relatório de aprovação de protótipo”. Algumas vezes o projeto técnico precisa ser refeito para a adequação às especificações de produto ou de processo. Nestes casos, um documento com os registros das

necessidades de revisão é gerado. Esse documento é utilizado como realimentação para a revisão de atividades já realizadas nessa fase. Estando os resultados do projeto técnico adequados aos critérios da alta direção, é gerado um registro de “concepção OK” e são definidas novas responsabilidades para os recursos disponíveis ao projeto.

n) **Documentar soluções técnicas:** Uma vez aprovado o protótipo ALFA, as soluções desenvolvidas são consolidadas em uma base de documentação que tem como alicerce a árvore de produtos desenvolvida na fase anterior do MRM. Neste *gate* é elaborado um dossiê técnico por área do projeto, revisada a árvore de produtos do equipamento e estabelecida a configuração de projeto. A entrada dessa atividade é um OK da qualidade do projeto técnico. A saída é o *baseline* do projeto na configuração1, que está relacionado com o protótipo ALFA aprovado.

o) **Baseline do Projeto_Configuração 1:** É o pacote de dados de projeto que caracteriza o protótipo ALFA aprovado.

p) **Documentar e registrar o projeto técnico:** consiste na elaboração e manutenção de documentos e registros relacionados com o projeto técnico do produto. A entrada básica para esta atividade é a aprovação do projeto técnico do produto no *gate* da fase e os desdobramentos relacionados com o planejamento do projeto. As saídas são os registros acerca dessa fase, sejam relacionados com seu andamento, sejam relacionados com seus resultados.

Devido à relevância da fase do projeto técnico, seria de suma importância a modelagem e simulação desta etapa de maneira a construir um entendimento mais detalhado e que pudesse servir de subsídio para o planejamento de projetos reais. Deste modo, empresas que desejassem utilizar um *framework* estruturado como o MRM para desenvolver seus produtos, teriam como antever possíveis problemas na fase do projeto técnico e buscar soluções viáveis e econômicas.

4. MODELAGEM ATRAVÉS DE SISTEMAS DINÂMICOS

A Modelagem de Sistemas Dinâmicos fornece uma variedade de metodologias e ferramentas adequadas à análise e controle de sistemas dinâmicos, os quais podem ser aplicados, por exemplo, no âmbito do Planejamento e Controle da Produção (Sagawa e Nagano, 2015). Essa metodologia tem fornecido respostas bastante satisfatórias uma vez que se adéqua às condições do ambiente produtivo.

4.1 Modelagem

Um modelo é uma representação externa e explícita de parte da realidade vista pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade. O objetivo de um modelo é tornar explícito ou concreto qualquer aspecto da realidade que esteja sendo investigado e explorar o que poderia acontecer se uma decisão em particular fosse tomada. É o objetivo do modelo que diz os elementos necessários a sua composição (PIDD, 1998).

Os modelos são também chamados de mundos virtuais (Schön, 1983) e de micromundos (Papert, 1980). Os mundos virtuais permitem simular a realidade e antecipar as consequências das decisões. Segundo Kotonya e Sommerville (1996), o modelo só será completo se o ambiente onde o sistema interage também for modelado, caso contrário, os requisitos modelados não refletirão a atual necessidade.

Bubenko et al. (1998), explica que o modelo não mostrará uma exata reflexão do mundo real. Ele é apenas uma coleção de percepções do mundo real, refletindo as estruturas de referências e experiências daqueles que contribuiram com sua construção. Um modelo de boa qualidade é baseado na discussão explícita dos participantes e relacionamentos entre elementos de diferentes submodelos. Para tanto, as discussões deveriam focar na organização por diferentes pontos de vistas, envolvendo participantes com conhecimentos diferentes. O modelo fornece, de forma natural, uma possibilidade para os participantes entrarem em questões e fenômenos que são relacionados com sua parte do negócio e ver o impacto de suas decisões ou requisitos de todos os processos da organização.

Os modelos proporcionam benefícios para a cultura e aprendizado organizacional. Os participantes devem explicitamente contribuir com seus conhecimentos do domínio, suas habilidades e experiências. Eles devem ser abertos, construtivos e ativamente participativos. É muito importante que eles saibam ouvir, respeitar e responder aos outros, e que tente encontrar e clarear relacionamentos e aspectos escondidos. Apenas dessa forma, os efeitos de sinergia do grupo podem ser alcançados. O desenvolvimento do conhecimento organizacional é extremamente dependente dos participantes e não dos facilitadores.

A modelagem compreende o uso de técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou parte de um sistema produtivo (Berto e Nakano, 2000). A descrição matemática das características dinâmicas de um sistema é denominada modelo matemático. O primeiro passo na análise de um sistema dinâmico é obter seu modelo. Uma complementação é o uso de simulação, que consiste em utilizar técnicas computacionais para simular a operação de sistemas produtivos, baseado em um conjunto de variáveis em dado domínio, de forma a investigar a relação causal e quantitativa entre essas variáveis (BERTRAND E FRANSOO, 2002).

A metodologia de Modelagem de Sistemas Dinâmicos 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 (Sagawa e Nagano, 2015).

A Figura 4.1 apresenta as etapas da construção de modelos quantitativos.

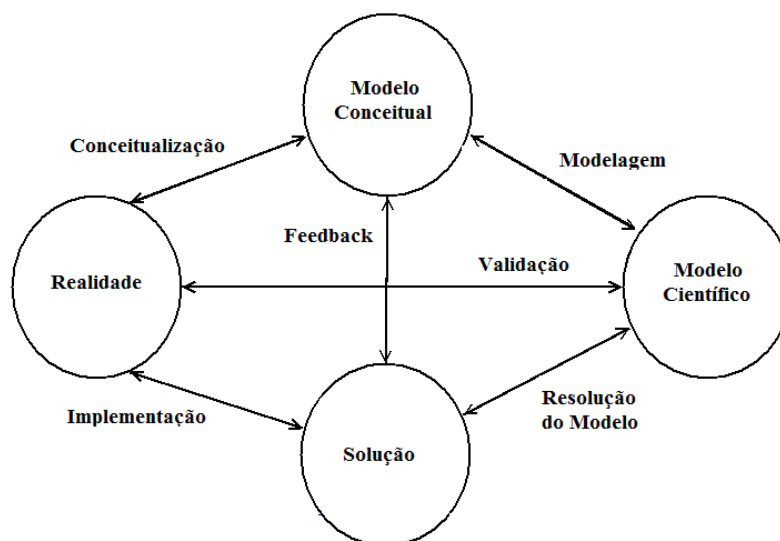


Figura 4.1. Etapas da construção de modelos quantitativos (Bertrand e Fransoo, 2002).

Na fase de conceitualização, é construído um modelo conceitual do problema. Nesta fase, decisões sobre as variáveis que devem ser incluídas no modelo são tomadas. O modelo conceitual pode ser formalizado por meio de linguagem matemática, onde as relações entre as variáveis são especificadas. Deste modo, cria-se o modelo científico. Depois, o uso de métodos matemáticos passa a ser prioridade na busca da resolução do modelo. A solução encontrada é confrontada com o modelo conceitual onde, finalmente, a implementação do modelo é realizada.

Morabito e Pureza (2010) usam uma estrutura similar para descrever o processo de modelagem (Figura 4.2).

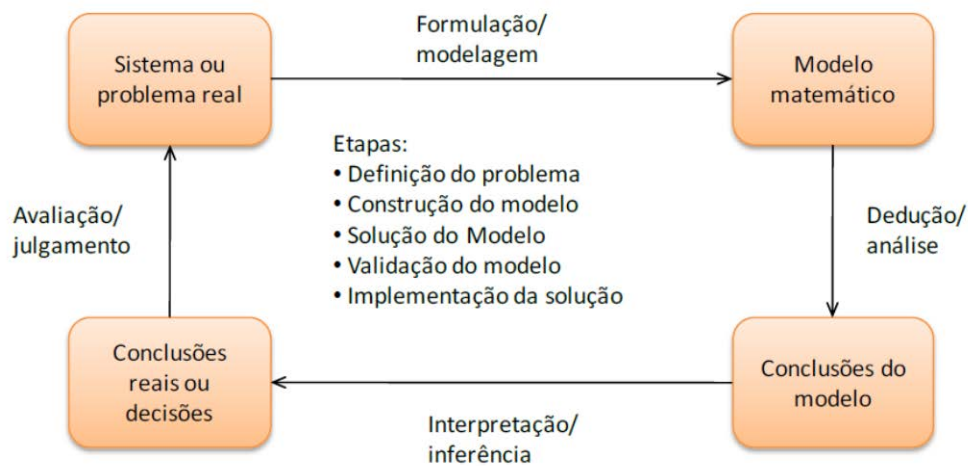


Figura 4.2. Processo de modelagem. (adaptado de Morabito e Pureza, 2010).

As etapas da metodologia de Modelagem de Sistemas Dinâmicos são apresentadas na Figura 4.3. Podemos resumi-la da seguinte forma: definição do problema e construção do modelo (elaboração do modelo físico e obtenção do modelo matemático); solução do modelo; simulação; e análise dos resultados.

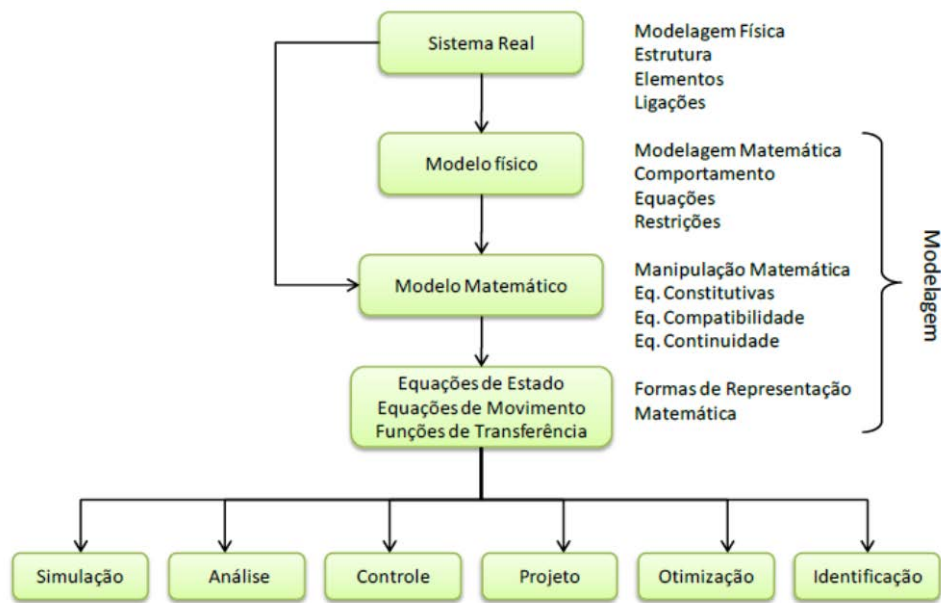


Figura 4.3. Etapas da Modelagem de Sistemas Dinâmicos (Speranza Neto e Silva, 2005).

Modelar sistemas dinâmicos é identificar e representar os processos de retroalimentação que determinam a dinâmica de um sistema, juntamente com estruturas de estoque e fluxo, retardos de tempo e não linearidades. Toda a dinâmica origina-se da interação de apenas dois tipos de anéis de retroalimentação, anel positivo (ou auto-reforço) e anel negativo (ou autocorreção). Os anéis positivos tendem a reforçar ou amplificar o que está acontecendo no sistema. Os anéis negativos se opõem à mudança (Bontempo et al., 2007). Todos os sistemas, independentemente da complexidade, consistem de malhas (*networks*) de retroalimentações (*feedbacks*) positivas e negativas, e toda a dinâmica se origina da interação desses anéis (*loops*) entre si (STERMAN, 2000).

4.2 Simulação

Segundo Borshchev e Filippov (2004), há uma distinção entre modelos analíticos e por simulação. Nos modelos analíticos ou estáticos, o resultado funcional do modelo depende da entrada (número de parâmetros); sendo possível empregar tal modelo em uma planilha. Entretanto, a solução analítica nem sempre pode ser encontrada, ou pode ser muito difícil de ser encontrada. O modelo por simulação pode ser considerado como um conjunto de regras (por exemplo, equações, fluxogramas) que definem como o sistema que está sendo modelado vai se comportar no futuro, dado o seu estado atual. Simulação é o processo de execução do modelo, através de mudanças de estado (discretas ou contínuas) ao longo do

tempo. Nos problemas onde a dinâmica do tempo é importante, a simulação da modelagem é a melhor resposta.

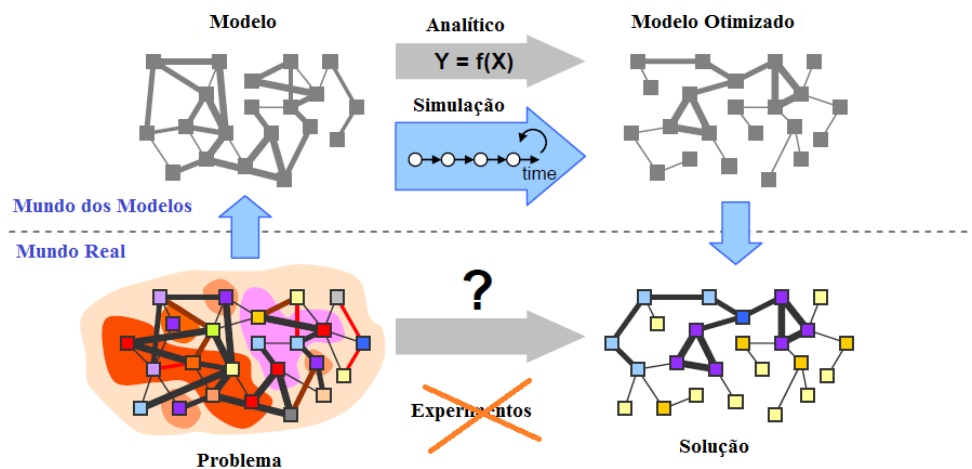


Figura 4.4. Modelo Analítico (Estático) e Simulação (Dinâmica) (adaptado de Borshchev e Filippov, 2004).

Ainda segundo Borshchev e Fillipov (2004), existem três métodos principais de simulação: por eventos discretos, baseados em agentes e por sistemas dinâmicos. Tecnicamente, sistemas dinâmicos lidam com processos contínuos, enquanto que eventos discretos e baseados em agentes trabalham principalmente em tempo discreto, ou seja, pulam de um evento para outro. A escolha do método de simulação deve levar em conta a questão de agregação e abstração do modelo (FERNANDES, 2007).

A agregação e abstração dos modelos devem ser levadas em consideração ao se selecionar o método de simulação. A Figura 4.5 apresenta alguns exemplos de sistemas em um espectro de variação do nível de abstração, agregação e detalhamento. Nos níveis mais altos de agregação, tem-se menor detalhamento do sistema, maior abstração e decisões estratégicas, enquanto no menor nível, o sistema é mais detalhado, menos abstrato e as decisões são mais operacionais. A modelagem por eventos discretos é voltada para sistemas de baixa à média agregação. Para problemas de alta agregação, as abordagens mais adequadas são a baseada em agentes e a de sistemas dinâmicos (BORSHCHEV e FILLIPOV, 2004).

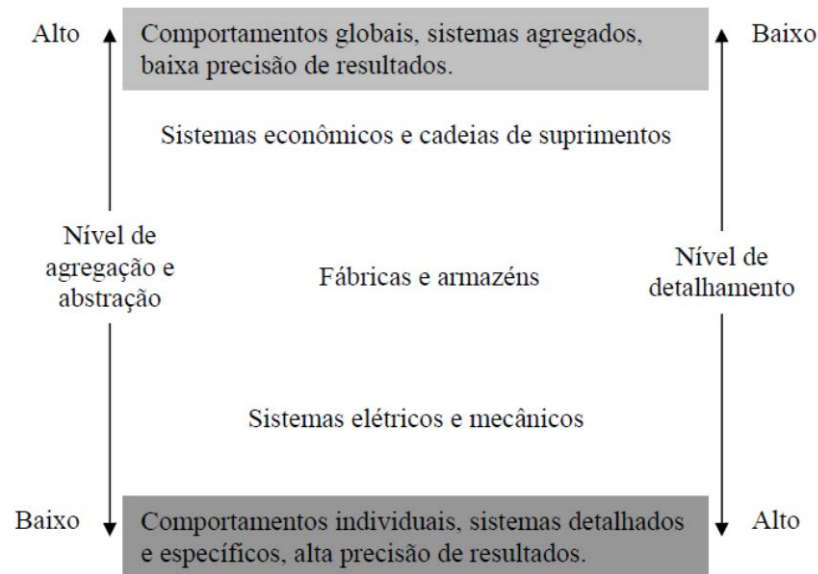


Figura 4.5. Sistemas num espectro de nível de agregação, abstração e detalhamento (Borshchev e Phillipov, 2004).

A simulação por dinâmica de sistemas caracteriza-se pela análise das características de resposta sobre decisões tomadas em sistemas sociais para demonstrar como estruturas organizacionais, políticas e atrasos interagem influenciando no comportamento destes sistemas. As aplicações desta abordagem variam desde cadeias de suprimentos até sistemas urbanos, econômicos e ecossistemas (FERNANDES, 2007).

4.3 Sistemas de Controle

O termo sistema é usado para descrever uma série de componentes que interagem em torno de uma condição limite imaginária, e somente sua entrada e saída são de interesse (Bolton, 1995). Ogata (2011) define sistema como um dispositivo abstrato que recebe entradas e produz saídas como resposta a essas entradas. O autor complementa sua definição inserindo a ideia de sistema de controle, que seria um conjunto de componentes organizados de forma a conseguir a resposta desejada de um sistema.

Segundo Pidd (1998), sistemas de controle normalmente são baseados na ideia de *feedback*. Os sistemas de controle dependem da disponibilidade de informações sobre a performance que são enviadas de volta a um gerente, que é capaz de compará-las com o desejado e mudar a performance do sistema conforme o necessário. Fazendo isto, os gerentes

das organizações estão usando modelos (ainda que implícitos) sobre o que provavelmente ocorrerá se tomarem determinada ação.

Em sistemas de controle, alguns princípios de projeto devem ser seguidos (OGATA, 2011):

- *Requisitos gerais de um sistema de controle:* um sistema de controle deve ser estável e ter uma velocidade de resposta razoavelmente rápida, sendo capaz de reduzir erros a zero ou quase zero.
- *Problemas básicos no projeto de sistema de controle:* sempre haverá distúrbios agindo na planta. O controlador deve levar em consideração quaisquer distúrbios que possam afetar as variáveis de saída. Matematicamente, o problema de controle básico é determinar a lei de controle ótimo, sujeita a vários vínculos de engenharia e econômicos, que minimizam um dado índice de desempenho.
- *Análise:* investigação, sob condições específicas do desempenho, do sistema cujo modelo matemático é conhecido. A análise deve iniciar com uma descrição matemática de cada componente.
- *Projeto:* projetar um sistema significa determiná-lo de modo a desempenhar uma dada tarefa.
- *Síntese:* determinação por um procedimento direto de um sistema que funcione de uma maneira específica.
- *Abordagem básica em projetos de sistemas de controle:* normalmente o projeto de um sistema de controle segue os seguintes passos: o engenheiro inicia o procedimento do projeto conhecendo as especificações ou índice de desempenho, a dinâmica da planta fornecida e a dinâmica dos componentes; este último envolve parâmetros de projeto. O engenheiro de controle aplica então, técnicas de síntese, se disponíveis, conjuntamente com outras técnicas a fim de elaborar um modelo matemático do sistema. Após ser completado o projeto matemático, o engenheiro de controle simula um modelo a fim de testar o comportamento do sistema resultante em resposta a vários sinais e ruídos. Depois desta fase um sistema físico protótipo é construído a fim de testar sua conformidade com os requisitos operacionais do sistema.

Para entender o comportamento de um sistema é necessário obter o seu modelo matemático. Um modelo matemático de um sistema é uma réplica das relações entre a(s) entrada(s) e a(s) saída(s). As relações reais que existem entre a entrada e a saída de um sistema podem ser escritas em expressões matemáticas.

Os sistemas de controle podem ser classificados de acordo com sua estrutura em sistemas de controle em malha aberta ou fechada. Um sistema de controle em malha fechada é aquele no qual o sistema de saída possui um efeito direto na ação de controle. São sistemas de controle realimentados. O sinal erro atuante é alimentado no controlador de modo a reduzir e manter a saída do sistema em um valor desejado. A entrada do sistema de controle é o valor desejado da variável, e o resultado é o valor real da variável na saída.

A Figura 4.6 apresenta os elementos que compõem um sistema em malha fechada. O elemento de comparação compara o valor desejado da variável controlada com o valor medido e determina o sinal de erro que indica quanto o valor da saída está desviado do valor desejado. O elemento de controle decide qual ação tomar quando recebe um sinal de erro. O termo controlador é bastante usado para um elemento que agrupa o elemento de controle e a unidade de correção. O elemento de correção é usado para provocar uma mudança no processo de forma a corrigir o erro. O processo é o sistema no qual uma variável está sendo controlada. O elemento de medida gera um sinal relacionado com a condição da variável que está sendo controlada e fornece um sinal realimentado para o elemento de comparação, para que ele determine se existe um erro.

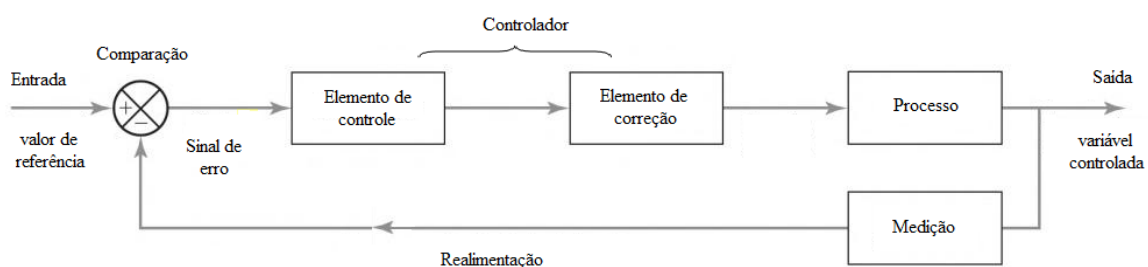


Figura 4.6. Os subsistemas em um sistema de controle em malha fechada (Bolton, 1995).

Sistemas de controle em malha aberta são sistemas de controle nos quais a saída não tem efeito na ação do controle. A saída não é comparada com a entrada de referência. Consequentemente, a cada entrada de referência corresponde uma condição de operação fixa. A Figura 4.7 apresenta os subsistemas em um sistema de controle em malha aberta. O elemento de controle determina a ação que deve ser tomada visando à entrada do sistema de

controle. O elemento de correção responde ao sinal de saída do elemento de controle e age de forma a levar a variável controlada ao valor desejado. O processo é o sistema no qual uma variável é controlada.

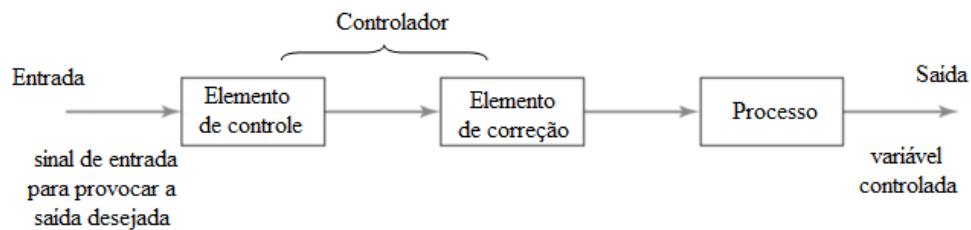


Figura 4.7. Os subsistemas em um sistema de controle em malha aberta (Bolton, 1995).

Uma vantagem do sistema de controle em malha fechada é que o uso de realimentação torna a resposta do sistema relativamente insensível a distúrbios externos e variações internas em parâmetros do sistema. Há um aumento na velocidade de resposta e na faixa de frequência sobre a qual o sistema responderá. Para sistemas nos quais as entradas são conhecidas antecipadamente no tempo e nos quais não há distúrbios, é aconselhável usar controle em malha aberta. Sistemas de controle em malha fechada possuem vantagens apenas quando distúrbios imprevisíveis e/ou variações imprevisíveis em componentes do sistema estão presentes. Uma combinação apropriada de controle em malha aberta e em malha fechada normalmente é mais barata e fornece um desempenho global do sistema bastante satisfatório.

Os sistemas de controle quase sempre são representados por diagramas de blocos. Um diagrama de blocos de um sistema é uma representação das funções desempenhadas por cada componente e do fluxo de sinais. Este diagrama indica a inter-relação que existe entre os vários componentes. A vantagem do uso dos diagramas de blocos é a sua representação mais realista dos fluxos de sinal do sistema real (OGATA, 2011).

Na representação por diagramas de blocos, todas as variáveis do sistema são ligadas às outras através de blocos funcionais – símbolo para a operação matemática sobre o sinal de entrada para o bloco que produz a saída. As funções de transferência dos componentes são usualmente indicadas nos blocos correspondentes, os quais são ligados por flechas para indicar o sentido do fluxo de sinais. Quando sinais são funções do tempo, eles são representados por letras minúsculas seguidas de (t) . Quando os sinais estão no domínio s (por exemplo, uma função de transferência), eles são representados por letras maiúsculas

seguidas de (s) . O bloco é desenhado com sua função de transferência dentro dele. Um diagrama de bloco contém informação relativa à construção física do sistema.

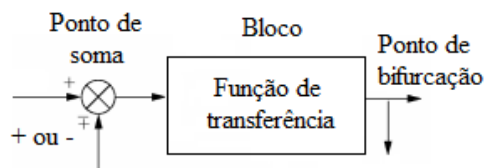


Figura 4.8. Componentes de um diagrama em blocos (Bolton, 1995).

Para desenhar o diagrama de blocos de um sistema, deve-se primeiro escrever as equações que descrevem o comportamento dinâmico de cada componente, tomar as transformadas de Laplace das equações, admitindo condições iniciais nulas, e representar cada equação transformada de Laplace individualmente na forma de bloco. Depois destes passos é que se devem montar os elementos em um diagrama de blocos completo.

Quando uma entrada de comando é aplicada a um sistema de controle, espera-se que depois do transitório a saída do sistema se estabilize no valor de comando. O erro entre este valor e a entrada de comando é chamado erro em regime permanente. É uma medida de precisão do sistema de controle como forma de rastrear uma entrada de comando e é o erro que aparece depois que a resposta transitória já terminou. O erro em regime permanente para um sistema depende da estrutura do sistema e da forma da entrada. Para analisar os erros em regime permanente dos sistemas, é necessário classificar os sistemas conforme o seu tipo. A classificação dos sistemas depende da função de transferência do ramo direto de um sistema em malha fechada com realimentação unitária. O tipo indica para cada entrada o erro em regime permanente que vai ocorrer (BOLTON, 1995).

4.4 Sistemas Dinâmicos (SD)

A abordagem de simulação por SD foi criada por Forrester (1961). Forrester mostrou o valor de modelos explícitos que associavam processos de negócio e estrutura organizacional, inspirada nos métodos de simulação de sistemas de automação e controle, adaptando-o a outros sistemas mais complexos, por isso também é conhecida por simulação de sistemas complexos. Posteriormente este método foi aperfeiçoado, dentre outros, por Roberts et al. (1983) e Sterman (2000).

Os Sistemas Dinâmicos identificam várias características básicas dos sistemas, tais como: relações de causa e efeito (permite a construção de gráficos de relações causais onde se procura delimitar e pesquisar quais as relações de causa e efeito que existem entre os elementos de um sistema); tempos de resposta (decisões estratégicas importantes podem estar sendo tomadas simplesmente sem que se saiba a importância e quais são os tempos de resposta dos sistemas onde elas devem produzir seus resultados, isto frequentemente tem sido causa de oscilações ou mesmo da falência total de sistemas que se desejam estáveis); efeitos de realimentação (também pode se dar no sentido de anular o efeito da decisão ou de chegar a um ponto de equilíbrio almejado para o sistema).

Os Sistemas Dinâmicos são comumente empregados nas Ciências Sociais, nas Ciências Físicas, Químicas e Biológicas e nas Engenharias. Nestas, a Dinâmica de Sistemas nasceu da Teoria de Controle, muito usada para projetar e manter o funcionamento de sistemas dentro de padrões aceitáveis. Todos os conceitos e ferramentas (diagramas, *software*, etc.) de Dinâmica de Sistemas podem também ser aplicados nas Engenharias com o mesmo objetivo da Teoria de Controle.

Forrester (1961) define um SD como sendo “o estudo das características de informação e de *feedback* da atividade industrial para mostrar como a estrutura organizacional, a amplificação (em políticas), e atrasos de tempo (nas decisões e ações) interagem para influenciar o sucesso do empreendimento”. Em SD os processos do mundo real são representados em termos de “estoques” (por exemplo, de material, conhecimento, pessoas, dinheiro), os fluxos entre esses estoques – comumente atividades ou conjunto de atividades - e as informações que determinam os valores dos fluxos. A abordagem de um problema usando a metodologia de SD deve descrever o comportamento do sistema como um número de interações de ciclos de *feedback* e suas estruturas de atraso, que ocorrem ao transmitir e receber informações.

Fundamental para a dinâmica de sistemas é a noção de que atrasos e enlaces de *feedback* são responsáveis por grande parte do comportamento de sistemas humanos organizados. Deste modo, se um sistema precisa ser compreendido, estas duas características precisam ser totalmente levadas em consideração. A dinâmica de sistemas provê uma forma de fazer isto via técnicas de construção de diagramas de enlace causal e uma abordagem de modelagem em computador (Pidd, 1998). Quando Forrester desenvolveu a abordagem da dinâmica de sistemas, a ideia era que o modelador desenvolvesse o diagrama e o utilizasse

visando escrever um conjunto de equações tal que uma simulação dinâmica possa ser baseada nelas.

Pidd (1998) explica que, apesar de ser interessante desenvolver diagramas, muitas vezes é apenas um passo na investigação da dinâmica do sistema em estudo. Para avançar nesta investigação, os diagramas precisam ser transformados em uma forma que possam ser calculados, como um conjunto de equações, de maneira que a simulação dinâmica possa ser baseada nelas. A forma básica de simulação em dinâmica de sistemas adota uma abordagem de tempo simples. O que ocorre no sistema é calculado em pontos regulares de tempo.

De acordo com Roberts et al. (1983), a construção de um modelo de sistemas dinâmicos deve seguir as seguintes etapas:

1. *Definição do modo de referência*: analisar o comportamento das principais variáveis do sistema em estudo para posterior comparação com o comportamento das variáveis simuladas;

2. *Elaboração do diagrama causal*: o diagrama causal apresenta todas as variáveis pertencentes ao modelo e suas inter-relações e os ciclos de retro-alimentação;

3. *Elaboração do diagrama de fluxo*: no diagrama de fluxo as variáveis são identificadas como níveis, vazões, variáveis auxiliares ou parâmetros;

4. *Equações*: a partir do diagrama causal e de fluxo são escritas as equações do modelo para os níveis, fluxos e variáveis auxiliares;

5. *Simulação*: é a última etapa. Deve inicialmente retratar o modo de referência, mostrando que retrata a realidade. Depois, podem-se variar os parâmetros, a fim de construir situações diferentes da inicial.

Forrester (1994) acrescenta mais algumas informações ao processo de construção dos passos do SD (Figura 4.9). A investigação começa pelo passo 1, motivada pelo comportamento indesejável do sistema que precisa ser compreendido e corrigido. O entendimento vem em primeiro lugar, mas o objetivo é a melhoria. O SD é realizado para um propósito. A primeira etapa é a descrição relevante do sistema e a construção de uma hipótese (teoria) para responder como o sistema está criando o comportamento perturbador.

O passo 2 começa pela formulação de um modelo de simulação. A descrição do sistema é traduzida para as equações do modelo de SD. Criar o modelo de simulação requer que a descrição geral e incompleta do passo 1 sejam explicitadas. A cada passo, a redefinição das etapas anteriores é necessária. No passo 2, escrever as equações revela lacunas e incoerências que devem ser corrigidas na descrição anterior.

No passo 3, a simulação do modelo pode começar após as equações da etapa 2 passarem por critérios lógicos de um modelo operacional. A simulação pode, à primeira vista, apresentar um comportamento irreal. Como resultado, a simulação leva a rever a descrição do problema e ao refinamento das equações. O SD deve revelar a forma como se chegou ao presente modelo e, em seguida, o caminho que conduz a uma melhoria do sistema. As primeiras simulações do passo 3 irão levantar questões que causam repetidos retornos as etapas 1 e 2 até que o modelo torne-se adequado às considerações feitas. Note-se que a adequação não significa prova da validade. O modelo construído é quase sempre uma réplica do modelo idealizado por quem opera o sistema real. No entanto, isto não significa que este modelo seja aceito nos passos 5 e 6.

O passo 4 identifica alternativas conceituais para o teste. Os testes de simulação determinam quais conceitos mostram maior adequação. As alternativas podem ser provenientes das percepções intuitivas geradas durante as três primeiras etapas, a partir da experiência do analista, a partir de propostas de pessoas que lidam com o sistema operacional, ou por um teste automático exaustivo de alterações de parâmetros. A busca por um parâmetro automático terá utilidade limitada. Nos sistemas mais complexos, haverá muitos concorrentes para definir critérios de sucesso, de modo que o desempenho mais favorável pode depender de várias alterações simultâneas no modelo. Além disso, os melhores comportamentos alternativos, muitas vezes, vêm ao mudar a estrutura do sistema.

O passo 5 desenvolve-se na implementação do modelo. Representa o maior desafio para a liderança do projeto. Não importa quantas pessoas participaram das etapas 1 a 4, muitas outras vão se envolver na implementação final. O modelo vai mostrar como o sistema está causando os problemas enfrentados. A implementação é um trabalho exaustivo, e sua meta, difícil de alcançar. Muitos conceitos devem ser revistos e isso costuma gerar desconforto entre as pessoas que trabalham diretamente com o projeto. Revisão conceitual e debates devem permear esta fase para que práticas antes usadas sejam modificadas.

No passo 6 são implementados os conceitos novos. As dificuldades existentes nesta etapa surgirão, na sua maioria, devido a deficiências em uma das etapas anteriores. Se o modelo é relevante e persuasivo, e se os debates no passo 5 foram suficientes, então a etapa 6 progride sem problemas. Mesmo assim, a implementação pode demorar muito tempo. Conceitos antigos devem ser erradicados. Novos conceitos exigirão a criação de novas fontes de informações e treinamento.

A avaliação dos conceitos modificados vêm depois da implementação. A avaliação não tem procedimentos claros nem se pode esperar resultados conclusivos na sua aplicação. Enquanto os novos conceitos são implementados e usados, o que é um processo que pode durar vários anos, muitas outras modificações ocorrerão no sistema e em seu ambiente (FORRESTER, 1994).

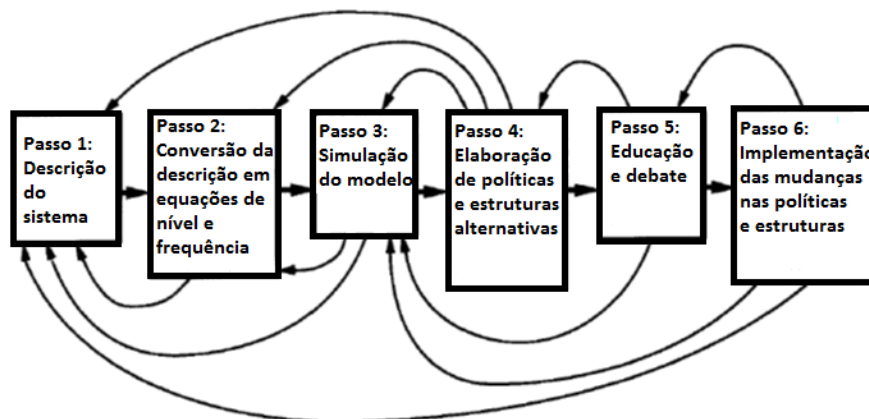


Figura 4.9. Passos de um SD (Forrester, 1994).

Pidd (1998) descreve duas maneiras de construir modelos dentro da dinâmica de sistemas, dependendo das razões para a modelagem:


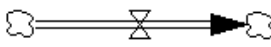

- **Modelagem de dentro para fora:** assume que sabemos bastante a respeito da estrutura do sistema a ser modelado e que desejamos compreender como ele se comporta.
- **Modelagem de fora para dentro:** assume que se sabe bastante sobre o comportamento global de um sistema, mas não o suficiente a respeito do por quê deste comportamento. Consequentemente estão disponíveis dados que descrevem como o sistema parece operar sob determinadas condições. Assim, o objetivo é desenvolver um modelo que provê estruturas sistêmicas para produzir saídas que



imitem o comportamento observado. Este tipo de modelagem visa, primariamente, desenvolver algum entendimento sobre por que as coisas ocorrem.

As relações de causa e efeito num modelo são representadas por Modelos Causais ou Modelos de Estoque e Fluxos. Os Modelos Causais são usados para representar relações qualitativas que ocorrem num sistema complexo, permitindo-se inferir a tendência de crescimento (malha de realimentação positiva) ou decrescimento (malha de realimentação negativa) do sistema. Já os Modelos de Estoques e Fluxos são usados para representar relações quantitativas, expressas através de fórmulas lógico-matemáticas.

Os Modelos de Estoque e Fluxos são uma metodologia sistêmica, onde cinco elementos básicos são usados para se construir os modelos de sistemas complexos. Dyson e Chang (2005) propuseram a construção de diagramas de loops ou fluxo e estoque a fim de facilitar a construção da Modelagem de SD visto que esta modelagem oferece melhor compreensão sobre os problemas complexos uma vez que os modelos mentais construídos pelo ser humano são menos elaborados que os modelos computacionais. A Tabela 4.1 apresenta os elementos básicos, suas representações e aplicações. A Figura 4.10 representa os elementos básicos de um modelo genérico de estoque e fluxo.

Tabela 4.1 – Representação dos elementos básicos no Modelo de Estoque e Fluxos

Elemento Básico	Representação	Aplicação
Auxiliares ou Conversores		Parâmetros usados no sistema. Definem as equações algébricas dos fluxos, estoques ou outras variáveis, mediante operações algébricas. Usados para modelar as informações.
Fluxos		Transporte de recursos no sistema. Medido em unidade de grandeza por unidade de tempo. Representam as variáveis responsáveis pela modificação dos estoques.
Estoques		Acumulações/Desacumulações de algum recurso. Abrangem as variáveis armazenadas de forma potencial para a utilização por outros componentes da modelagem. Fornecem uma visão de como está o sistema em qualquer instante de tempo.

Informações ou Conectores		Ligam os elementos do sistema e explicitam relações entre os mesmos com o propósito de formar as equações algébricas.
Fontes externas		Representa alguma fonte de recurso que está fora do escopo de interesse do modelo em estudo.

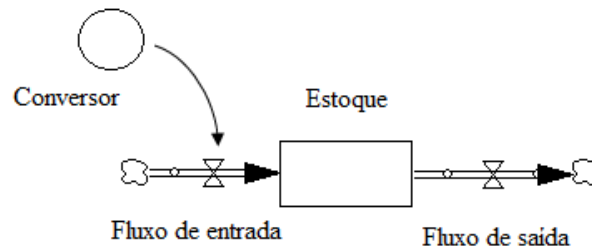


Figura 4.10. Elementos básicos de um modelo genérico de estoque e fluxo (adaptado de Sterman, 2000).

Forrester (2007) e Sterman (2000) explicitam que os sistemas complexos possuem oscilações causadas pela estrutura do seu próprio sistema, por meio de suas realimentações, atrasos e não-linearidades. O objetivo da aplicação de sistemas dinâmicos seria buscar a estabilidade do sistema e simular quando e em quais parâmetros se darão a estabilidade sob os mais diversos cenários. O processo de identificar corretamente os *loops*, as variáveis de estoque e de fluxo mais importantes do modelo mental do campo em análise estão na base da modelagem em qualquer campo de aplicação.

4.5 Aplicações dos Sistemas Dinâmicos (SD) em problemas organizacionais

A seguir serão revisados alguns modelos baseados na metodologia de sistemas dinâmicos em diferentes sistemas de planejamento e produção. Esta revisão visa identificar lacunas da pesquisa desenvolvida nesta área e fornecer embasamento teórico para o modelo proposto neste trabalho. Alguns modelos são discutidos com maior detalhamento devido a sua relevância para o desenvolvimento do modelo proposto.

4.5.1 Ford e Sterman (1998)

Ford e Sterman (1998) propuseram um modelo de sistemas dinâmicos para simular o desempenho de um projeto de desenvolvimento de produtos de múltiplas fases. Cada fase do

projeto foi representada por uma estrutura genérica, personalizada para refletir um estágio específico do desenvolvimento do produto (linhas de código de um software ou teste em protótipos de chips de computador, por exemplo). Esta estrutura genérica da fase possui quatro subsistemas (processos de desenvolvimento, recursos, escopo e metas) que interagem com o desempenho do projeto. O desempenho do projeto foi medido através das medidas tempo, qualidade e custos. Estas medidas foram refletidas no modelo como tempo de ciclo, alterações, e custo.

O desenvolvimento individual das fases proposto pelos autores inclui processos que podem restringir o progresso do projeto. A Figura 4.11 apresenta o processo de desenvolvimento do modelo de estoque e fluxo de fase. No modelo, o desenvolvimento do fluxo se dá em cinco etapas: Tarefas não Concluídas (TnC), Tarefas Concluídas e não Verificadas (TCnotCk), Tarefas a serem Alteradas (TtCh), Tarefas Aprovadas (TAppr) e Tarefas Lançadas (TRel). A primeira atividade desenvolvida é Completar Tarefas (CT). As tarefas concluídas acumulam-se no estoque Completo não Verificado. Se as tarefas não exigirem alterações ou se essas alterações não forem descobertas durante a garantia de qualidade, as tarefas deixam o estoque Completo não Verificado Concluído e passam através de Aprovar Tarefas (ApprT) para o estoque de Tarefas Aprovadas (TAppr).

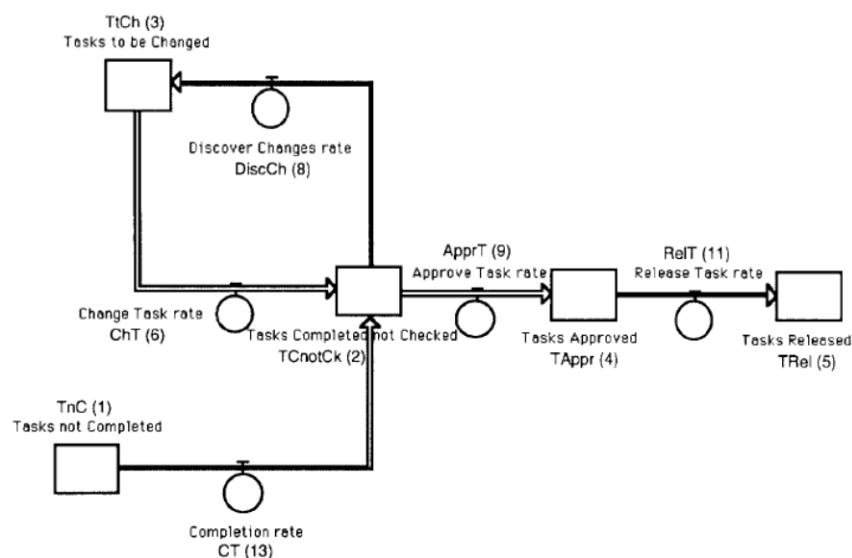


Figura 4.11. Processo de desenvolvimento de um modelo de estoque e fluxo de fase única (Ford e Sterman, 1998).

As Equações Diferenciais (1, 2, 3, 4 e 5) descrevem o desenvolvimento dos fluxos de tarefas de qualquer fase única.

$$(d/dt)(TnC) = -CT \quad (1)$$

$$(d/dt)(TCnotCk) = CT + ChT - DiscCh - ApprT \quad (2)$$

$$(d/dt)(TtCh) = DiscCh - ChT \quad (3)$$

$$(d/dt)(TAppr) = ApprT - ReIT \quad (4)$$

$$(d/dt)(TRel) = ReIT \quad (5)$$

As tarefas aprovadas passam através do fluxo Liberar Tarefas (ReIT) para o estoque Tarefas Liberadas (TRel). Isto representa a entrega de tarefas para os gestores das fases a jusante ou a clientes. As tarefas que necessitam de alterações são descobertas através da atividade Garantia de Qualidade (QA). Estas tarefas se movem através do fluxo Descobrir Alterações (DiscCh) para o estoque Completo não Verificado e depois para o estoque Tarefas a serem Alteradas. Estas tarefas são corrigidas ou melhoradas através da atividade Mudar Tarefas (ChT) e voltam para o estoque Completo não Verificado. As alterações podem ser geradas tanto durante a realização e correção ou melhoria das tarefas. A Figura 4.12 apresenta a estrutura do processo de desenvolvimento do projeto de fase única em detalhes. As Equações (6 a 18) descrevem o restante do processo.

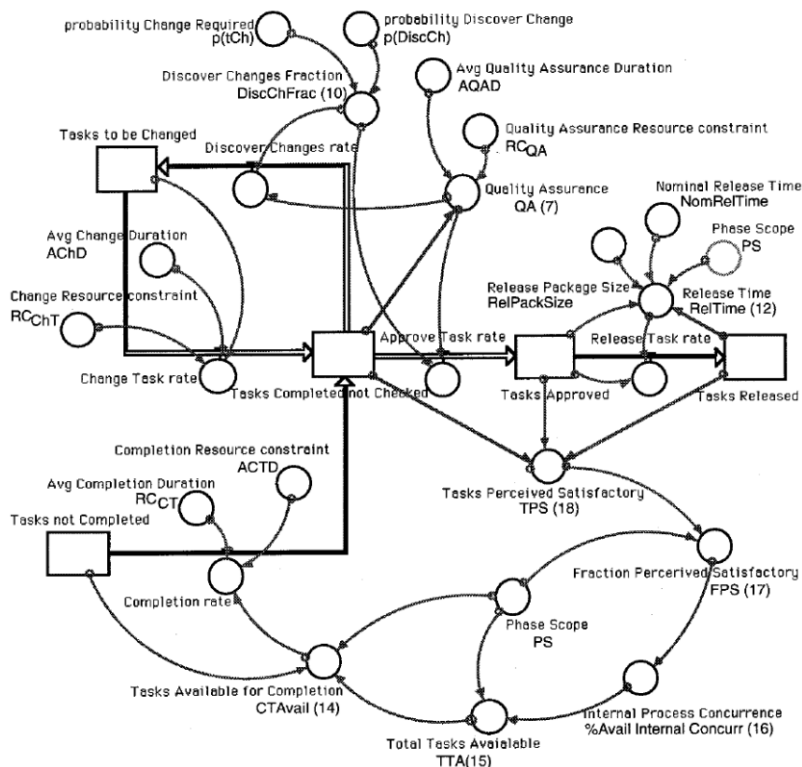


Figura 4.12. Estrutura do processo de desenvolvimento do projeto de fase única (Ford e Sterman, 1998).

$$ChT = \text{Min}(RC_{ChT}, TtCh / AChD) \quad (6)$$

$$QA = \text{Min}(RC_{QA}, TCnotCk / AQAD) \quad (7)$$

$$DiscCh = QA * DiscChFrac \quad (8)$$

$$ApprT = QA * (1 - DiscChFrac) \quad (9)$$

$$DiscChFrac = p(DiscCh) * p(TCh) \quad (10)$$

$$RelT = TAppr / RelTime \quad (11)$$

$$RelTime = IF(TAppr \geq RelPackSize * (PS - TRel)) \quad (12)$$

$$THEN(NomRelTime) ELSE(\infty)$$

$$CT = \text{Min}(RC_{CT}, CTAvail / ACTD) \quad (13)$$

$$CTAvail = \text{Max}(0, TTA - (PS - TnC)) \quad (14)$$

$$TTA = PS * \%Avail\ Internal\ Concurr \quad (15)$$

$$\%Avail\ Internal\ Concurr = f_{IPC}(FPS) \quad (16)$$

$$FPS = TPS / PS \quad (17)$$

$$TPS = TCnotCk + TAppr + TRel \quad (18)$$

Três atividades de desenvolvimento governam os fluxos de tarefas em cada fase do projeto: conclusão, garantia de qualidade e mudança. Cada atividade exige que recursos suficientes estejam disponíveis para realizar o trabalho assim como que estejam disponíveis também, as informações e materiais necessários para completar a atividade (isto é, que exista um estoque de tarefas que podem ser endereçados como um resultado da realização de atividades anteriores). Portanto, a taxa de progresso para cada uma das três atividades de desenvolvimento é o mínimo da taxa permitido pelos recursos e da taxa permitida pelo processo de realizar a atividade de desenvolvimento específica. As equações para os quatro fluxos em fase única, que dependem diretamente das atividades de desenvolvimento, são baseados na Restrição de Recursos, na Duração Média do Processo Atividade das três atividades de desenvolvimento e do trabalho disponível para cada atividade.

A Taxa de Simultaneidade ou Grau de Simultaneidade existente entre as etapas e atividades do processo de desenvolvimento de produtos é representada como uma função gráfica que relaciona as atividades já realizadas numa etapa do desenvolvimento com as atividades da etapa posterior que podem ser realizadas simultaneamente ou seja, a simultaneidade entre as etapas é função do percentual de atividades concluídas em etapas anteriores. A Figura 4.13 apresenta o Grau de Simultaneidade proposto pelos autores. A realização das etapas $n+1$ (posteriores) do PDP depende da execução do número de atividades executadas na etapa n (atual) do desenvolvimento. Os autores explicam que o

formato desta curva (*s-shape*) depende de cada desenvolvimento específico e de cada empresa.

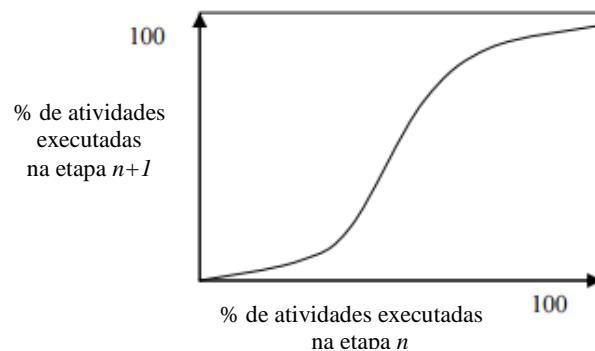


Figura 4.13. Grau de Simultaneidade entre etapas e atividades do PDP (adaptado Ford e Sterman, 1998).

A fase do projeto Processo Interno Simultâneo descreve a interdependência das tarefas dentro da fase. As relações do Processo Interno Simultâneo capturam o grau de sequenciamento ou anuência das tarefas agregadas dentro de uma fase, incluindo possíveis mudanças no grau de anuência enquanto o trabalho progride.

As ligações entre as fases do projeto são capturadas de duas formas: relações do Processo Externo Simultâneo e Coordenação. As relações do Processo Externo Simultâneo são usadas para descrever as restrições de trabalho disponíveis entre o desenvolvimento das fases de uma maneira análoga as restrições internas de trabalho disponíveis descritas no Processo Interno Simultâneo. A relação do Processo Externo Simultâneo descreve a quantidade de trabalho que pode ser feito na fase abaixo desta com base no percentual do trabalho lançado por uma fase acima desta.

As Tarefas que requerem uma Coordenação interfase, como uma reunião para explicar ou resolver problemas, se acumulam em um estoque de Tarefas a ser Coordenadas antes que sejam coordenadas e movidas para o estoque Tarefas a ser Trocadas (Figura 4.14). Dois fluxos preenchem o estoque Tarefas a ser Coordenadas. O primeiro são as tarefas descobertas que precisam de mudanças devido à herança de mudanças de fluxos fases acima a partir do estoque Completo não Revisado para o estoque de Tarefas a ser Coordenadas. O segundo são as tarefas que requerem mudanças e que foi lançada, descoberta por uma fase abaixo e voltaram para a coordenação e correção ou aprimoramento é removida do estoque da fase Tarefas Lançada e entraram no estoque Tarefas a ser Coordenada (TtCoord) através do fluxo de Coordenação devido a Baixa Garantia da Qualidade (CDQA). As tarefas deixam o estoque

Tarefas a ser Coordenada e é introduzida no estoque Tarefas a ser Alterada através da atividade de coordenação (Coord). Um dos benefícios da coordenação é o aprendizado dos desenvolvedores sobre a evolução das fases dependentes.

As Equações (19, 21 a 24, 2a, 3a, 5a, 8a, 9a e 15a) descrevem o processo simultâneo multifase.

$$TTA = PS * \text{Min}(\% \text{ Avail Internal Concurr}, \% \text{ Avail External Concurr}) \quad (15a)$$

$$\% \text{ Avail External Concurr}_j = \text{Min}(f_{EPC_{i,j}}(F \text{ RelUp}_i)) \text{ for } i \neq j \quad (19)$$

$$F \text{ RelUp}_i = T \text{ Rel}_i / PS_i \quad (20)$$

$$(d/dt)(TtCoord) = \text{DiscInterPhaseCh} + CDQA - \text{Coord} \quad (21)$$

$$(d/dt)(T \text{ CnotCh}) = CT + ChT - \text{DiscIntraPhaseCh} - \text{DiscInterPhaseCh} - \text{ApprT} \quad (2a)$$

$$(d/dt)(TtCh) = \text{DiscInterPhaseCh} + \text{Coord} - ChT \quad (3a)$$

$$(d/dt)(T \text{ Rel}) = \text{RelT} - CDQA \quad (5a)$$

$$\text{ApprT} = QA - \text{DiscIntraPhaseCh} - \text{DiscInterPhaseCh} \quad (9a)$$

$$\text{DiscIntraPhaseCh} = QA * p(\text{DiscCh}) * p(\text{IntraPhaseCh}) \quad (8a)$$

$$\text{DiscInterPhaseCh} = QA * p(\text{DiscCh}) * \quad (22)$$

$$CDQA = \sum \left[\frac{(p(\text{InterPhaseCh}) - p(\text{IntraPhaseCh}) * p(\text{InterPhaseCh}))}{((\text{IntraChRel}_j / T \text{ Rel}_j) + (\text{InterChRel}_j / T \text{ Rel}_j))} \right] \quad (23)$$

$$* p(\text{DiscCh}_i) * QA_i * PS_j / PS_i \text{ for } i \neq j$$

$$\text{Coord} = \text{Min}(RC_{\text{Coord}}, TtCoord / ACoordD) \quad (24)$$

O modelo proposto pelos autores de uma estrutura dinâmica para a modelagem de desenvolvimento integrado de processos separadamente dos recursos do projeto, escopo e metas demonstrou a importância da distinção dos processos dinâmicos, capturando como o desenvolvimento do processo afeta o desempenho do projeto. Os estoques definidos permitiram a visualização a cada momento da simulação, da quantidade de atividades executadas, verificadas e retrabalhadas.

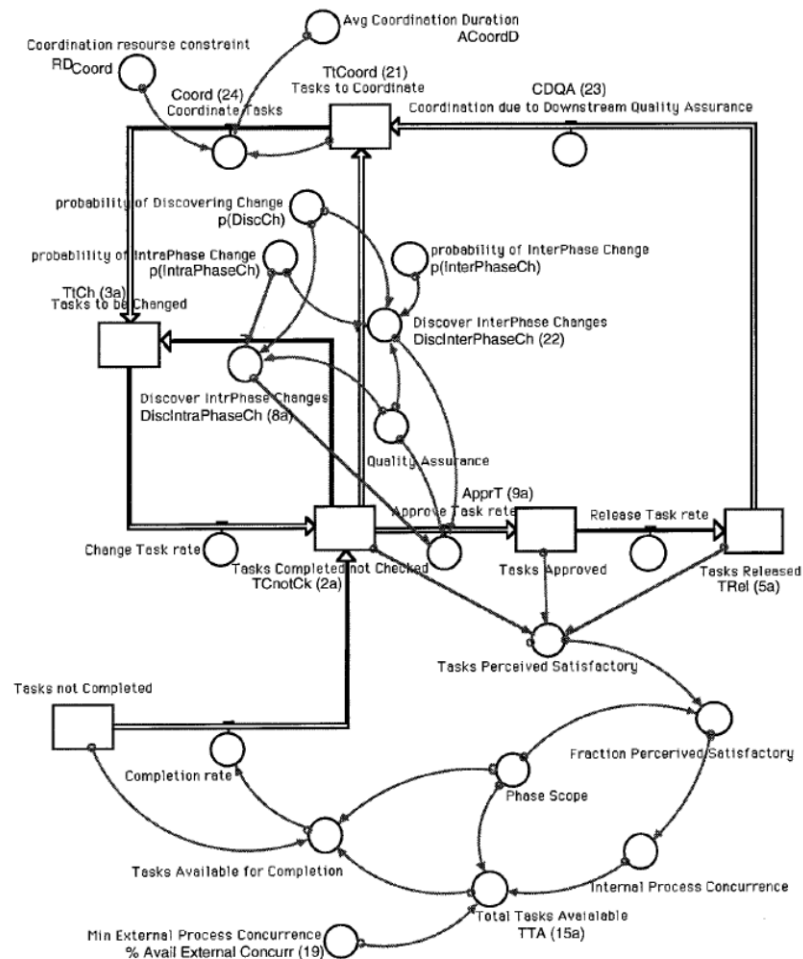


Figura 4.14. Processo simultâneo multifase e estrutura de coordenação (Ford e Sterman, 1998).

4.5.2 Bomtempo, Júnior e Júnior (2007)

Bomtempo, Júnior e Júnior (2007) propuseram a formulação de modelos de negócios para apoiar o processo decisório em organizações complexas. O processo decisório foi estudado, explorando-se os temas da racionalidade limitada, da estruturação de problemas, dos modelos mentais, dos mundos virtuais e da modelagem como apoio à decisão. Os autores aplicaram a dinâmica de sistemas como um instrumento para a construção de modelos, a identificação de regras de decisão e sua comunicação. Um modelo de negócios para as atividades do segmento exploração e produção de petróleo foi apresentado.

Um modelo de negócios é um instrumento para apoio à tomada de decisões. O modelo de negócios proposto por Bomtempo, Júnior e Júnior (2007) foi construído em quatro etapas:

- Etapa 1: mapeamento da estrutura do sistema. Primeiramente as principais variáveis envolvidas foram identificadas através de um diagrama de subsistemas, depois os limites do sistema modelado foram definidos para que as variáveis pudessem ser classificadas como

estoques, fluxos e variáveis auxiliares. As principais relações de causa e efeito entre as variáveis foram identificadas através do Mapa de Estoques e Fluxos.

- Etapa 2: entendimento da dinâmica do sistema. O Mapa de Estoques e Fluxos foi usado para identificar os anéis de retroalimentação positiva e negativa mais relevante.

- Etapa 3: identificação das regras de decisão usadas para a tomada de decisão. Baseado em Diagramas de Estrutura das Regras de Decisão as relações de causa e efeito foram descritas.

- Etapa 4: quantificação do modelo. Com base em dados históricos sobre o comportamento das variáveis do sistema em análise, identificaram-se as relações entre essas variáveis, que foram explicitadas por equações matemáticas. Em seguida, testou-se a validade das equações pela comparação dos números gerados pelo modelo com os dados históricos. Após eventuais ajustes, o modelo estaria então em condições de gerar projeções sobre o comportamento futuro dos estoques, dos fluxos e das regras.

O objetivo do modelo de negócios proposto no estudo era fornecer elementos para a tomada de decisão aos responsáveis pelas atividades desenvolvidas no Segmento de Exploração e Produção de uma empresa da indústria do petróleo, seja ela integrada ou restrita a esse segmento visto que as organizações estão se tornando cada vez mais complexas, em resposta a um ambiente social, econômico, político e tecnológico cada vez mais sofisticado, em que o processo de tomada de decisão tornou-se uma tarefa difícil e imperfeita. A Figura 4.15 apresenta as variáveis relevantes e os limites para a modelagem do sistema.

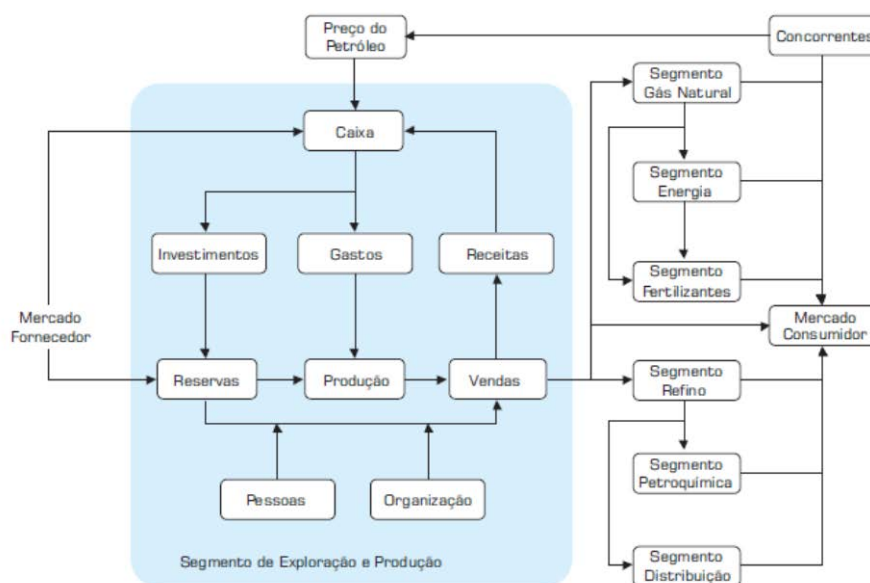


Figura 4.15. Diagrama de subsistemas do segmento de exploração e produção (Bomtempo, Júnior e Júnior, 2007).

Porém, esse ciclo apresenta limitações. O anel de equilíbrio “ E_1 ” indica que, se o volume de vendas aumenta, as desincorporações tendem a aumentar. Se as desincorporações aumentam, o volume de Reservas tende a diminuir. Se o volume de Reservas diminui, o volume de vendas de reservas e de produção tende a diminuir, contrabalançando o crescimento provocado pelo anel de reforço “ R_1 ”. Um segundo anel de equilíbrio “ E_2 ” se opõe ao crescimento provocado pelo anel de reforço “ R_1 ”, da mesma forma que o anel de equilíbrio “ E_1 ”. Um fenômeno semelhante ocorre entre o anel de reforço “ R_2 ” e o anel de equilíbrio “ E_3 ”.

Diagramas de Estrutura das Regras de Decisão (que são desagregações de partes relevantes do Mapa de Estoques e Fluxos) foram apresentados para que fosse possível identificar estratégias, políticas e condicionantes que atuam sobre as taxas de fluxo do sistema. Esses diagramas foram desenhados com o auxílio do pacote de modelagem para simulação Powersim.

O estudo apresentou a modelagem das reservas, da produção, das receitas, dos custos e das despesas. O desenvolvimento do modelo identificou políticas relativas a investimentos, incorporações, exploração, pesquisa e desenvolvimento, desincorporações, produção e pessoal. Identificou, também, estratégias relativas à escolha das regiões de interesse, a intensidade e ao tipo de participação em licitações. Por fim, identificaram-se condicionantes relativos à disponibilidade de reservas nas regiões de interesse, a quantidade de sondas de perfuração e produção disponíveis no mercado, aos preços do óleo, do gás natural e do líquido do gás natural.

Após a especificação dos modelos, simulações para uma empresa típica do segmento exploração e produção de petróleo, de porte médio, partindo de um “cenário base” foram feitas para testar a solução proposta. A modelagem e as simulações desenvolvidas na pesquisa de Bomtempo, Junior e Junior (2007) revelaram aspectos importantes para os gerentes responsáveis pela atividade de análise estratégica e para os executivos responsáveis pelas decisões, ao explicitar e hierarquizar as regras de decisão. Indicou, também, a possibilidade de melhoria na qualidade das decisões ao se fazer uso de simulações com base em modelos adequados. A incorporação desses novos conhecimentos ao processo decisório o torna mais sólido e ágil, proporciona aos gerentes e executivos a delegação das decisões reguladas por políticas para os níveis tático e operacional da organização, orienta no sentido de monitorar os

condicionantes relevantes, e libera tempo e energia para que eles possam dedicar-se as decisões estratégicas que geram vantagens competitivas.

4.5.3 Amaral (2008a, 2008b)

Amaral (2008b) integra a técnica de sistemas dinâmicos à análise do retrabalho, dos efeitos inesperados e do ponto de inflexão para propor melhorias ao gerenciamento de projetos. Muitos dos problemas críticos apresentados em projetos resultam de uma gestão de projetos ineficaz, com práticas organizacionais e procedimentos pouco efetivos. Por exemplo, um dos problemas observados no gerenciamento de projetos refere-se aos prazos. A resposta do gerenciamento a um “deslize” percebido nos prazos muitas vezes é a alocação de mais recursos, na esperança de um aumento da taxa de progresso. Esta ação pode, eventualmente, trazer o projeto para a data prevista de conclusão, eliminando o desvio nos prazos. Outra ação consiste no ajuste dos prazos. Entretanto, há muitos fatores burocráticos envolvidos quando se decide “ajustar” o prazo de um projeto.

Neste sentido, o autor aplica a metodologia de sistemas dinâmicos aos projetos, focando a resposta ao desempenho do projeto, para a interação entre as decisões gerenciais e o desenvolvimento de processos. O modelo proposto é baseado nos modelos de Ford e Sterman (1998 e 2003) e Rodrigues e Bowers (1996). O modelo consiste em um setor de fluxo de trabalho e um setor de alocação de recursos.

O setor de fluxo de trabalho baseia-se na estrutura desenvolvida por Ford e Sterman (2003) para o desenvolvimento da cadeia de valor do ciclo de retrabalho. Nessa estrutura (apresentada na Figura 4.17), o trabalho inicial a ser realizado vai do estoque “trabalho a ser realizado” para o estoque “trabalho a ser validado” (certificação da qualidade do trabalho). O trabalho que passa na certificação de qualidade é aprovado e vai para o estoque de “trabalho liberado”. O trabalho descoberto devido a mudanças no projeto segue para o estoque de “Retrabalho” (RT). O estoque RT pode ser incrementado por trabalhos que surgem devido a efeitos não previstos ou de impacto. O retrabalho concluído volta novamente para a certificação de qualidade, pois o retrabalho pode revelar novos aspectos ocultos ou criar novos requerimentos de mudança.

Abaixo seguem as equações que descrevem o modelo apresentado pelo autor. Os estoques foram representados pelo lado esquerdo das Equações 1 – 4. A Equação (1) representa o estoque do escopo inicial (trabalho a ser realizado) que tem que ser completado.

O tamanho das mudanças de estoque devido a taxas de desenvolvimento das atividades foi representado pelo lado direito das Equações 1 – 4.

$$(d/dt)TR = -R_{TI} \quad (1)$$

$$(d/dt)CQ = R_{TI} - D_{RT} + R_{RT} - R_A \quad (2)$$

$$(d/dt)RT = D_{RT} - R_{RT} + R_{EI} \quad (3)$$

$$(d/dt)TL = R_A \quad (4)$$

Onde:

TR - Estoque Trabalho a ser realizado {pacotes de trabalho}

CQ - Estoque de Certificação de Qualidade {pacotes de trabalho}

RT - Estoque de Retrabalho {pacotes de trabalho}

TL - Estoque Trabalho Liberado {pacotes de trabalho}

R_{TI} - Taxa de trabalho inicial {pacotes de trabalho/semana}

D_{RT} - Taxa de descoberta de retrabalho {pacotes de trabalho/semana}

R_{RT} - Taxa de Retrabalho {pacotes de trabalho/semana}

R_A - Taxa de aprovação de trabalho {pacotes de trabalho/semana}

R_{EI} - Taxa Efeitos de Impacto {pacotes de trabalho/semana}

Os fluxos representados pela variável na parte esquerda das Equações 5 – 9 são as taxas nas quais as tarefas são removidas dos estoques no diagrama básico. Para o modelo básico, os recursos são alocados baseados na proporção de trabalho total. No modelo, F_{RT} na Equação (6) varia de 0 a 1, de acordo com a complexidade do projeto. F_{EI} na Equação (10) varia de 0 até o maior valor que corresponde a interdependência do projeto ao impacto provocado. A duração mínima das Equações (11), (13) e (15) são definidas como 1 semana. O PE nas Equações (12), (14), e (16) são definidos como 1 tarefa/pessoa(recurso)/semana.

$$R_{TI} = \min(TP_{CI}, TR_{CI}) \quad (5)$$

$$D_{RT} = T_{CQ} * F_{RT} \quad (6)$$

$$T_{CQ} = \min(TP_{CQ}, TR_{CQ}) \quad (7)$$

$$R_{RT} = \min(TP_{RT}, TR_{RT}) \quad (8)$$

$$R_A = T_{CQ} - D_{RT} \quad (9)$$

$$R_{EI} = D_{RT} * F_{EI} \quad (10)$$

$$TP_{CI} = TI_{CI} / D_{MC} \quad (11)$$

$$TR_{CI} = PE * EQ_{AC} \quad (12)$$

$$TP_{CQ} = CQ / DCQ_{MC} \quad (13)$$

$$TR_{CQ} = PE * ECQ_{AC} \quad (14)$$

$$TP_{RT} = RT / DRT_{MC} \quad (15)$$

$$TR_{RT} = PE * ERT_{AC} \quad (16)$$

Onde:

TP_{CI} - Taxa do processo de conclusão inicial {pacotes de trabalho/semana}

TR_{CI} - Taxa de recursos para conclusão inicial {pacotes de trabalho/semana}

T_{CQ} - Taxa de Certificação de Qualidade {pacotes de trabalho/semana}

F_{RT} - Fração de Retrabalho {pacotes de trabalho/semana}

TP_{CQ} - Taxa do processo de certificação de qualidade {pacotes de trabalho/semana}

TR_{CQ} - Taxa de Recursos para certificação de qualidade {pacotes de trabalho/semana}

TP_{RT} - Taxa do processo de Retrabalho {pacotes de trabalho/semana}

TR_{RT} - Taxa de recursos de retrabalho {pacotes de trabalho/semana}

F_{EI} - Força de Efeito Impacto {fração}

TI_{CI} - Trabalho inicial para conclusão {pacotes de trabalho}

D_{MC} - Duração mínima para conclusão {1 semana}

D_{RT} - Taxa de descoberta de retrabalho {pacotes de trabalho/semana}

F_{EI} - Força de efeito de impacto {fração}

A força do “efeito de impacto” é uma característica associada a cada projeto, que descreve o tamanho do impacto que a porção de retrabalho do projeto tem no escopo original. Os fluxos entre o estoque de trabalho a ser realizado (TR), qualidade (CQ) e retrabalho (RT) podem ser definidos pela taxa de trabalho e os recursos associados (Equações 11 - 16). A taxa de trabalho é a quantidade de trabalho disponível (recursos), dividida pela mínima quantidade de tempo necessário para concluir um pacote de trabalho. A taxa de recursos é o produto do número de recursos associados ao projeto de cada atividade e a produtividade de cada recurso.

O modelo utilizado pelo autor foi simplificado para expor as relações entre os pontos de inflexão, os comportamentos dos projetos e o gerenciamento. O ponto de inflexão indica o momento em que o projeto para de mostrar progresso e começa a ser degradado, e vice-versa. No ponto de inflexão:

$$F_{RT}(F_{EI} + 1) = 1$$

Onde:

F_{RT} - Fração de Retrabalho

F_{EI} - Força de efeito de impacto

Quando $F_{RT}(F_{EI} + 1) > 1$, o projeto degrada; quando $F_{RT}(F_{EI} + 1) < 1$, o projeto progride; e quando $F_{RT}(F_{EI} + 1) = 1$, o projeto está parado. O ponto de inflexão é mostrado na Figura 4.18. Quando o estoque total do projeto à esquerda da curva diminui, o projeto progride. Quando o estoque total do projeto à direita da curva aumenta, o projeto se degrada. A curva representa as condições do ponto de inflexão. Ignorando as forças que mantêm o projeto estagnado, pequenas digressões para um lado ou para o outro da curva fazem avançar ou degradar o projeto. Se algum enlace dominar, ou o estoque total irá crescer para a degradação do projeto ou diminuir, levando o projeto à conclusão. Por esta razão, o ponto de inflexão é uma condição de equilíbrio instável.

Amaral (2008b) consegue desta forma revelar as condições do projeto que geraram a dinâmica do ponto de inflexão concluindo que a inclinação negativa da curva do ponto de

inflexão indica que os projetos que possuem F_{EI} baixa podem tolerar maior F_{RT} antes de se degradarem, e projetos com baixa taxa de retrabalho podem tolerar maior força de efeito de impacto. Entretanto, a relação entre o ponto de inflexão, a força de efeitos de impacto e a fração de retrabalho são não lineares.

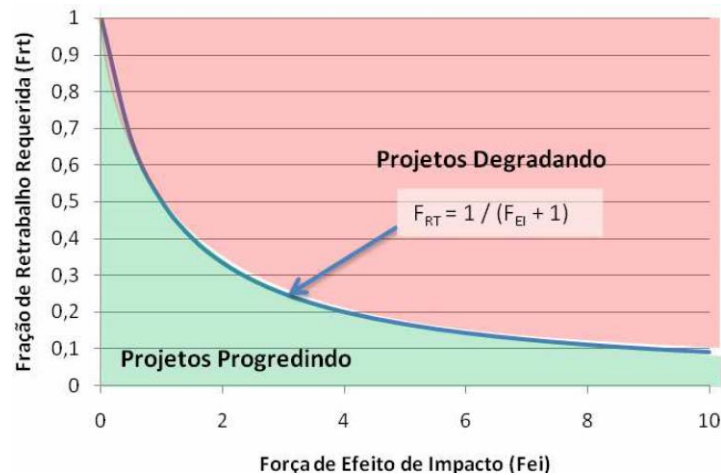


Figura 4.18. Condição básica para o ponto de inflexão (Amaral, 2008a).

4.5.4 Marujo (2009)

Marujo (2009) aborda em seu trabalho conceitos de gerenciamento de projetos e métodos para a redução do tempo de projetos, aplicando a metodologia de SD para propor um modelo que avaliasse a fração de retrabalho na superposição de atividades.

O mercado exige uma flexibilidade e agilidade por parte das empresas, que por sua vez, exigem rapidez no desenvolvimento de novos produtos, na alteração de produtos já existentes e no lançamento de produtos encomendados. Estes ciclos rápidos de desenvolvimento de produtos são constantemente caracterizados por atividades superpostas, uma técnica dita imprescindível na economia de tempo de desenvolvimento.

Geralmente, as atividades de desenvolvimento de um projeto se desenvolvem em uma sequência, onde informações sobre o produto são lentamente acumuladas em estágios consecutivos. Um novo estágio começava apenas quando o anterior havia acabado de modo que as informações eram supridas. No projeto de produção com etapas superpostas, estágios subsequentes iniciam antes que o estágio precedente tenha sido finalizado. Assim, a superposição utiliza informação incompleta o que muitas vezes gera um trabalho adicional ou retrabalho para acomodar o imprevisto.

Dando continuidade aos trabalhos desenvolvidos nesta área, Marujo (2009) desenvolveu um modelo dinâmico de sequenciamento de atividades com superposição. A Figura 4.19 apresenta o sequenciamento de n atividades onde T_{i-1} é a duração estimada para a atividade $i-1$, T_i é a duração estimada para a atividade i e i é superposta a $i-1$ com um montante de horas de superposição de y_i . A soma das durações das duas atividades é dada por $T_\lambda = T_{i-1} + T_i$.

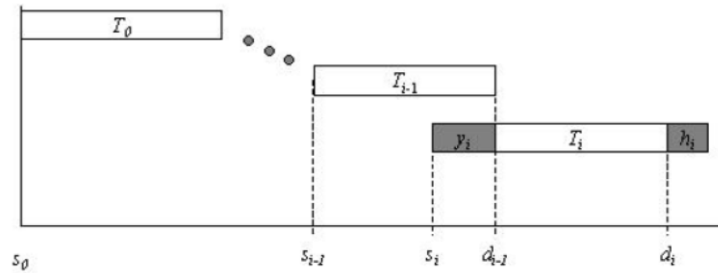


Figura 4.19. Sequenciamento de n atividades (Marujo, 2009).

Baseado em trabalhos que descrevem formulações para o retrabalho, o autor desenvolveu um diagrama de causalidade dinâmico capaz de estimar o tempo total entre duas atividades sequenciais na presença de superposição e com o efeito da aprendizagem, como mostra a Figura 4.20. Nesta Figura, P_i indica a função probabilidade, h_i o total de retrabalho necessário em função da superposição, L_i a aprendizagem, $d_{(i-1)}$ o tempo previsto para o início da atividade, s_i o tempo previsto para o fim da atividade, y_i a superposição, $\frac{dP_i}{dt}$, $\frac{dh_i}{dt}$ e $\frac{dL_i}{dt}$ são relações diferenciais em função do tempo. Os parâmetros α , β e γ dependem das observações feitas no ambiente do projeto como, por exemplo, experiência da força de trabalho, qualidade e quantidade de treinamento, etc.

Para ilustrar a aplicabilidade do modelo proposto, o autor aplica o modelo desenvolvido ao projeto de desenvolvimento de um produto composto de onze atividades, com a finalidade de avaliar qual o nível de retrabalho gerado por cada superposição de pares de atividades. A Tabela 4.2 contém a descrição das atividades, as relações de precedência e os tempos normais de cada atividade. A Figura 4.21 descreve o diagrama de precedências do projeto.

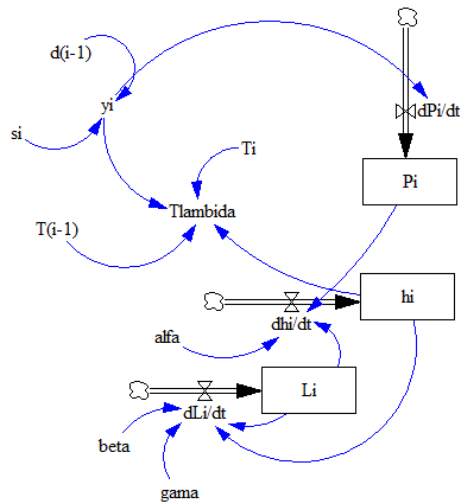


Figura 4.20. Diagrama de causalidade dinâmico (Marujo, 2009).

Tabela 4.2 – Elementos básicos, equações constitutivas e causalidades.

Atividade	Descrição	Atividade Precedente	Tempo Normal (semanas)
1	Projeto do produto	0	8
2	Seleção de materiais	1	10
3	Projeto do processo	2	8
4	Projeto do sistema de produção	3	5
5	Teste de protótipo	4	3
6	Aquisição de materiais	5	4
7	Planejamento da produção	5	3
8	Aquisição de ferramentas e máquinas	5	2
9	Instalação de equipamento e ajuste de ferramentas	8	1,5
10	Contratação de pessoal	5	4,5
11	Comissionamento da planta	6,7,9,10	1

Fonte: Marujo 2009.

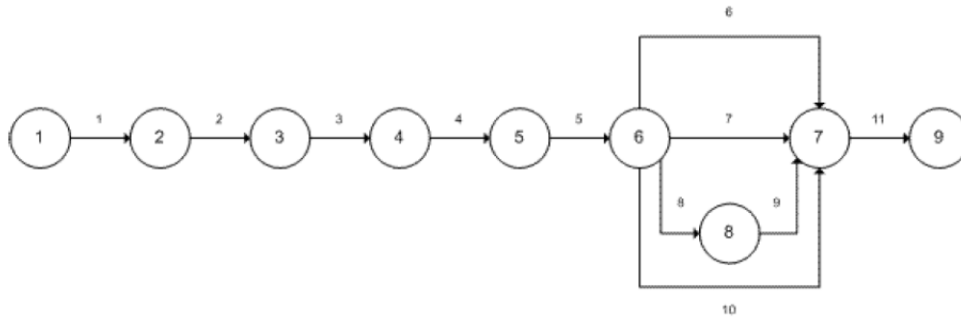


Figura 4.21. Diagrama do projeto (Marujo, 2009).

Com base nos resultados obtidos, o autor infere que o modelo se comporta bem para valores maiores de tempo de duração das atividades e de superposição. Observa ainda, que existe uma correlação entre as variáveis dh_i/dt e dL_i/dt e que o aumento da fração de retrabalho acompanhou o aumento na fração de superposição.

O modelo desenvolvido por Marujo (2009) poderia ser aplicado em um ambiente de alta complexidade, como o processo de desenvolvimento de produtos, que possui um cenário de trabalho colaborativo, onde as horas de trabalho e retrabalhos devem ser estimadas após reuniões periódicas e onde existe incerteza nas informações.

4.5.5 Figueiredo e Loiola (2011a, 2011b, 2012, 2014)

Figueiredo e Loiola (2014) utilizaram a metodologia de sistemas dinâmicos para modelar o comportamento de uma estrutura de fluxo auxiliar para selecionar projetos num funil de desenvolvimento. A saída de itens dos estoques geralmente depende dos atributos que são rastreados em um fluxo auxiliar. Contudo, os modelos clássicos não consideram um fenômeno específico que é a seleção de itens. Para sanar este problema, os autores apresentaram uma nova aplicação para fluxos auxiliares em cadeias temporais: um fluxo auxiliar que permite o processo de eliminar ou aprovar itens dependendo do valor de um atributo. Foi modelado um funil de desenvolvimento de produtos de dois estágios com fluxo auxiliar que acompanha o número de projetos e o valor presente dos mesmos. A fim de validar o modelo apresentado, simulações foram apresentadas no trabalho demonstrando que a seleção de projetos pode eliminar o efeito chicote no funil.

O desenvolvimento de novos produtos (*New Product Development* - NPD) são geridos através de uma sequência de portas (*gates*) em cadeia, onde as ideias competem por recursos. As ideias são esculpidas em projetos, que são revisados e aprovados através de um processo de seleção para que apenas os melhores projetos continuem nas fases subsequentes do *design*,

desenvolvimento e teste. Só então há a liberação desses projetos para o mercado local (KRISHNAN e ULRICH, 2001).

A Figura 4.22 mostra um exemplo clássico do uso de um fluxo auxiliar. O modelo demonstra a configuração mais simples do processo, ou seja, um modelo de fase única com fluxo. Esta representação simplificada mostra como os projetos são iniciados, desenvolvidos e transferidos para um estoque de avaliação, onde são avaliados e, se concluídos, levados para a fase seguinte ou finalizados (COOPER et al., 1998).

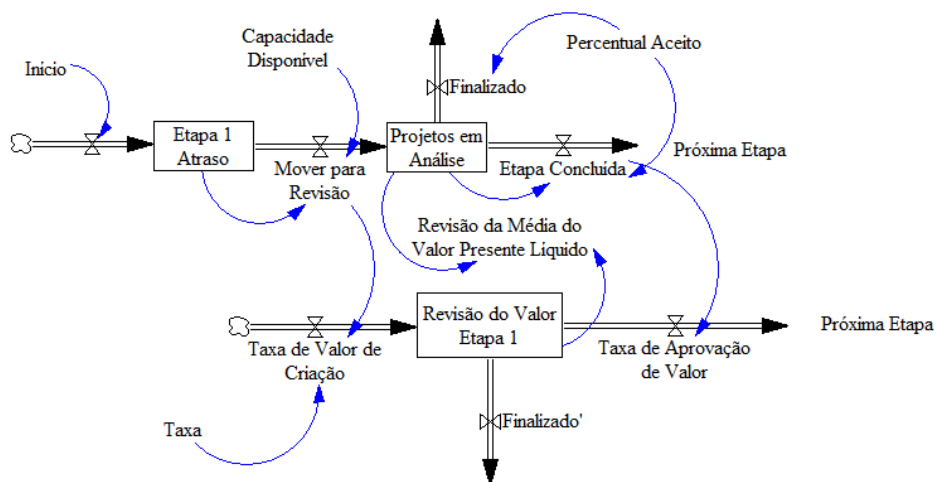


Figura 4.22. Fase simples de um fluxo com seleção de projetos (Figueiredo e Loiola, 2014).

Enquanto os projetos são desenvolvidos, a criação de valores é adicionada ao fluxo auxiliar. Tal valor (um atributo) acumula-se na “Fase de valor 1 – revisão” do estoque, e é perdido ou transferido para a próxima fase, juntamente com os projetos correspondentes. A fim de saber qual parte do estoque de projetos e do estoque de valores deve ser encerrada, é necessário conhecer a fração de projetos que têm um valor inferior ao limite pré-determinado. Para calcular tais frações, é necessário determinar como a população de valores dos projetos é distribuída, ou seja, qual é a função de distribuição de probabilidade dos valores (PDF). A escolha de diferentes limiares irá resultar em uma fração diferente de projetos que serão aceitos. Um limite superior irá necessariamente reduzir essa fração.

O comportamento do modelo proposto por Figueiredo e Loiola (2014) tinha como objetivo determinar a forma como a presença da seleção de projetos muda a intensidade do efeito chicote na cadeia. O efeito chicote é o resultado de uma expectativa de demanda ou oferta que não se realiza, por diversos motivos, entre elas a incapacidade de prever a demanda dos clientes, e que se propaga por todas as empresas da cadeia, influenciando os níveis de

estoques, os tamanhos dos pedidos e a produtividade. Os custos de estocagem ocasionados pelo efeito, em determinados períodos, e a falta de estoques para atender a demanda, em outros, tendem a ser distribuídos por toda a cadeia, o que pode tornar o produto não competitivo (COELHO et al., 2009).

O modelo desenvolvido pelos autores representa a gestão de funil de produtos (*Product Pipeline Management* - PPM) de tomada de decisão. O termo gestão de funil de produtos faz alusão à prática de acompanhar vários projetos NPD através de uma sequência de seleção de projetos. A estrutura de estoques e fluxos na PPM pode ser comparada com a estrutura de um modelo de cadeia de fornecimento de serviços (Anderson et al., 2005), como mostrado na Figura 4.23. O modelo dinâmico PPM proposto pelos autores é derivado de um modelo de cadeia de serviço proposto por Anderson et al. (2005).

A compatibilidade entre os modelos foi justificada pela presença, em ambas as cadeias, de tempo de fluxo e capacidade de processamento de restrições, que determinam a taxa de transferência na cadeia. Anderson et al. (2005) mostrou que, dependendo das magnitudes relativas do tempo de processamento e do tempo de ajuste de capacidade, a cadeia de suprimentos de serviços apresenta uma provisão do efeito chicote, de modo que as oscilações de atraso na fase 2 são maiores do que as oscilações de atraso na fase 1, em resposta a perturbações na demanda do cliente.

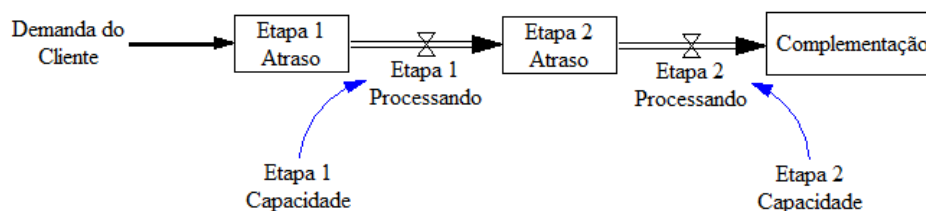


Figura 4.23. Cadeia de suprimentos (Figueiredo e Loiola, 2011b).

Para testar o efeito chicote, Figueiredo e Loiola (2011a) utilizaram uma cadeia um pouco mais complexa, visto que a supressão de algumas fases poderia ocasionar a supressão do efeito em estudo. A Figura 4.24 apresenta o modelo com duas fases da linha de desenvolvimento do produto desenvolvido para o estudo em questão.

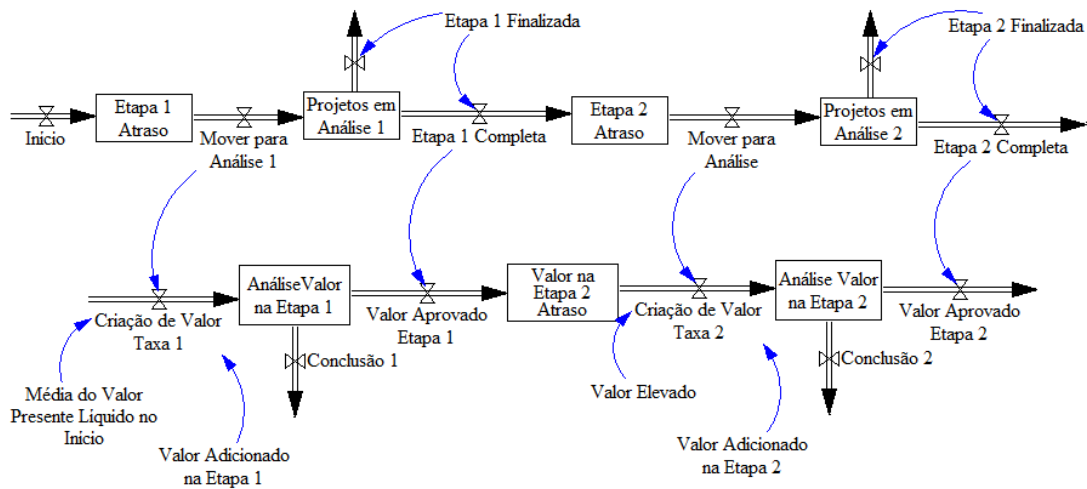


Figura 4.24. Rastreamento da criação de valor em um funil de desenvolvimento de produto em duas fases (Figueiredo e Loiola, 2011a).

A metodologia empregada por Figueiredo e Loiola (2014) é simples. O modelo dinâmico do funil de produtos foi configurado para permitir a presença do efeito chicote. Simulações foram executadas utilizando valores base para as variáveis (em Figueiredo e Loiola (2012) há uma explicação detalhada deste procedimento), e gráficos foram criados para analisar em que condições o efeito chicote era mitigado. Especial atenção foi dada para o impacto da seleção das atividades na cadeia, ou seja, a conclusão dos projetos e como eles vão de um estágio para o próximo. Uma grande variedade de entradas foi testada, e gráficos tridimensionais foram gerados, a fim de mostrar as relações entre as variáveis de decisão e a ocorrência do efeito chicote.

Uma forma de tornar o gerenciamento da capacidade mais abrangente seria incorporar horas extras e contratação ao modelo, mas os autores consideram razoável supor que um aumento da capacidade teria algum impacto sobre a utilização. Assim, no modelo descrito, a capacidade disponível das equipes de desenvolvimento é frequentemente ajustada, a fim de se adaptar quer à demanda de trabalho de cada fase ou para manter o nível de utilização em torno do seu valor nominal normalizado (100%). Este seria o nível de utilização em que a taxa de criação de valor é ideal. Este processo foi definido como “viés de ajustamento da capacidade”, que representa uma tendência dos gestores, quer para trabalhar mais rápido para reduzir os atrasos, quer na utilização da capacidade que melhora o atributo criação (capacidade nominal).

A utilização é, portanto, calculada de acordo com a Equação (1). Em caso de excesso de capacidade, a utilização é igual à capacidade exigida com base no atraso. Supõe-se que

existe um desenvolvimento de tempo nominal (mínimo) para o desenvolvimento de qualquer grupo de itens.

$$\text{Utilização} = \frac{\min\left(\frac{\text{atraso}}{\text{desenv. tempo nominal}}, \text{capacidade disponível}\right)}{\text{capacidade nominal}} \quad (1)$$

Mudanças na Capacidade são modeladas como um ajuste exponencial de primeira ordem da Capacidade Disponível em direção a Capacidade Alvo com um Tempo de Ajuste das Capacidades. A Capacidade Alvo foi definida como a média ponderada da capacidade nominal (uma capacidade que proporciona o valor de pico) e a taxa exigida de desenvolvimento em cada porta com atraso.

$$\text{Capacidade Alvo} = \frac{\alpha \cdot \text{Atraso}}{\text{capacidade nominal}} + (1 - \alpha) \cdot (2 - \text{Utilização}) \cdot \text{Capacidade Nominal} \quad (2)$$

A escolha dos parâmetros para o caso base utilizada no modelo foi feita de modo que a intensidade de trabalho ou a utilização da capacidade seriam mantidas em valores de pico (100%), de modo que quaisquer mudanças nos valores resultariam em um pior desempenho, mesmo quando a intensidade de trabalho fosse aumentada ou diminuída. O funil foi calibrado para um estado de equilíbrio, em que a criação de valor era máxima. A variável Alfa foi definida como uma tendência para reduzir atrasos ou trabalhos na criação de valores maximizados. Uma vez que esta variável afeta o modo como a capacidade muda ao longo do tempo na cadeia, ela tem um efeito crucial sobre a oscilação e a amplificação do tamanho dos atrasos. (FIGUEIREDO e LOIOLA, 2012).

O modelo proposto pelos autores é altamente estilizado, vem com várias simplificações e não foi calibrado para uma empresa real. Uma simplificação usada nesta formulação foi fixar o número de funcionários (em termos de horas de trabalho por mês em cada fase). Consequentemente, um aumento da capacidade foi automaticamente traduzido em um aumento da utilização. A complexidade média do projeto também foi fixada (em termos de horas de trabalho por projeto em cada fase). No modelo, os recursos fixos foram distribuídos uniformemente entre as fases.

O modelo incorpora apenas duas portas como mostrado na Figura 4.24. Todas as variáveis encontradas em um estágio podem ser encontradas no seguinte, e o mesmo processo de seleção é realizado (Figueiredo e Loiola, 2012). As variáveis independentes do modelo são

o número de projetos introduzidos no funil, o valor mínimo aceitável em cada etapa (limiares 1 e 2), e os vieses de gestão durante o ajuste de capacidade, que referem-se à decisão gerencial de ajustar a capacidade das equipes de desenvolvimento à demanda de trabalho em cada fase de forma a reduzir atrasos. Tais processos-chave determinam os fluxos no funil, as medidas de desempenho e a seleção de projetos (FIGUEIREDO e LOIOLA, 2014).

Vários testes foram realizados para discutir a confiabilidade do modelo e para determinar em que condições o modelo é suscetível ao efeito chicote. A figura 4.25 apresenta o efeito do viés intensidade de trabalho no atraso e na saída. O tamanho dos atrasos foi significativamente reduzido na presença do viés gerencial no sentido de reduzir atrasos ($\alpha = 1$). Os fluxos foram evidentemente reduzidos quando houve um viés gerencial no sentido de melhorar a utilização da capacidade, mesmo que temporariamente, uma vez que os estoques atingiram as condições de equilíbrio de “estado estável” quando estavam juntos. Somente quando a tendência para melhoria da utilização da capacidade estava em níveis extremos (como 0), é que o fluxo de projetos foi permanentemente reduzido.

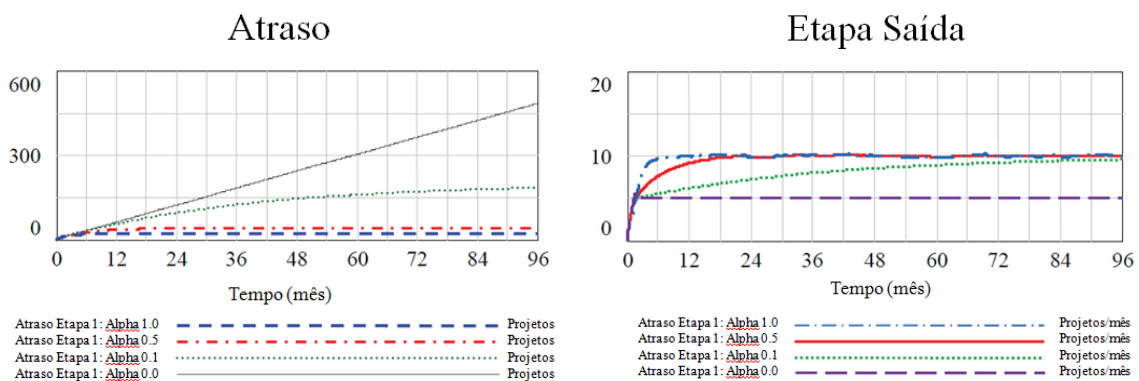


Figura 4.25. Efeito do viés intensidade de trabalho no atraso e na saída. (Figueiredo e Loiola, 2011b).

Um pressuposto relevante para o estudo apresentado por Figueiredo e Loiola (2014) é que a relação entre a utilização da capacidade e o valor criado em cada porta, em vez de ser constante, tem a forma de U invertido, com o valor de pico sendo observado pelo valor nominal de utilização. Os autores mostraram como a produtividade dos funcionários (percentagem do tempo gasto em tarefas que agregam valor), inicialmente aumenta e depois diminui à medida que o número de projetos de desenvolvimento atribuídos simultaneamente para cada engenheiro aumenta. Os custos totais de desenvolvimento podem ser considerados como a soma dos custos de oportunidade e do custo de capacidade, resultando em uma função

convexa de utilização da capacidade. Em suma, há um nível de utilização interior (entre os dois extremos da curva em formato de U invertido) que maximiza o lucro da empresa.

A Figura 4.26 mostra o índice de atraso (pico de atraso 2 dividido por pico de atraso 1) para a condição de “criação de valor endógeno” (valores analisados pelo modelo). Os resultados são muito semelhantes aos da condição de “criação de valor constante”. O atraso do efeito chicote é criado com condições específicas, ou seja, Alfa alto e relação de tempo reduzido. Além disso, o atraso do efeito chicote pode ser completamente eliminado quando a seleção de projetos tem um valor pré-determinado.

Os resultados para ambas as condições de valor de criação demonstram que o pico para o atraso de estoque e seu pico (valor) covariante estão fora de sincronia em termos de “Alfa” e “Razão Tempo”, devido à física dos fluxos. Logo, políticas que minimizem o “atraso no efeito chicote” podem não ser as melhores políticas para minimizar o “valor do efeito chicote”.

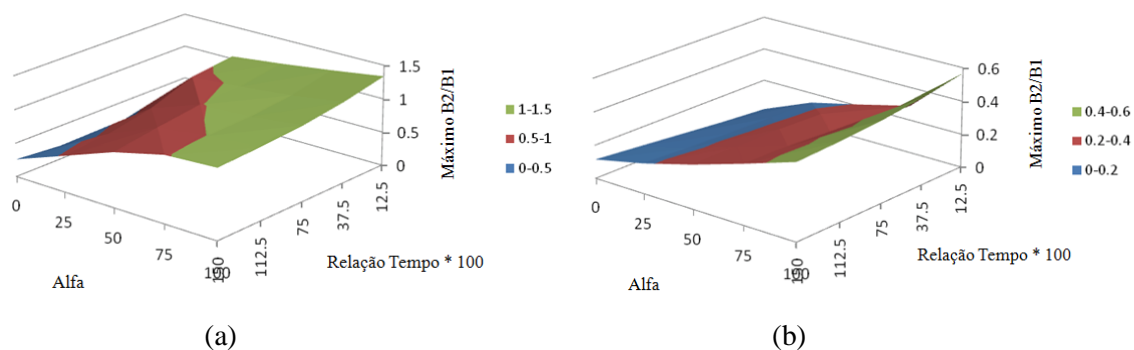


Figura 4.26. (a) Índice máximo de amplificação do atraso sem seleção de projetos; (b) Índice máximo de amplificação do atraso com seleção de projetos (Figueiredo e Loiola, 2011b).

A fim de verificar a robustez dos resultados com a criação de valor constante, um ruído aleatório uniformemente distribuído foi adicionado ao processo. Os resultados mostraram que o pico de atraso depende principalmente de ajustamento da capacidade e da seleção de projetos, e não da criação de um valor presente líquido.

Como o objetivo do modelo proposto pelos autores era descrever uma estrutura básica comum para o processo de seleção de projetos, as suas variáveis de decisão ou independentes não foram endogeneizadas, ou seja, não foi construído um modelo matemático para determinar estas variáveis. O modelo PPM foi desenvolvido como uma ferramenta complementar para proporcionar a simulação baseada na percepção da dinâmica da seleção de projetos em um projeto num funil de desenvolvimento.

4.5.6 Kasperek e Maurer (2013)

Kasperek e Maurer (2013) desenvolveram um trabalho onde sugerem o acoplamento da metodologia *Structural Complexity Management* (StCM) com a metodologia de Sistemas Dinâmicos. Segundo os autores, este acoplamento permite relacionar, simular e gerir influências dinâmicas sobre os processos de desenvolvimento de produtos em um nível estrutural, possibilitando uma otimização do processo de desenvolvimento do produto para um comportamento dinâmico mais robusto e confiável além de permitir uma projeção inicial do desempenho do desenvolvimento do sistema ao longo do tempo baseado na sua estrutura.

A metodologia *Structural Complexity Management* (StCM) apresentada é uma abordagem utilizada quando se tem sistemas complexos. Esta abordagem combina as ferramentas do *Design Structure Matrices* (DSM) e do *Domain Mapping Matrices* (DMM). A metodologia StCM permite trabalhar com vários domínios de sistemas fornecendo um procedimento de cinco etapas que ajuda os usuários na definição do sistema, na aquisição de informação, na dedução de dependências indiretas, na análise da estrutura, bem como na aplicação do projeto do produto. A Figura 4.27 apresenta os passos propostos pelos autores para a construção de um modelo StCM para uso com sistemas dinâmicos.

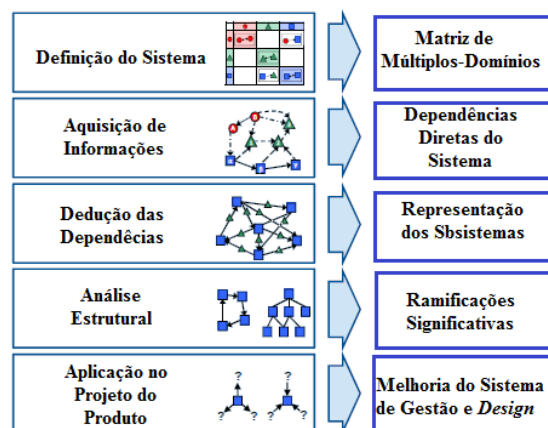


Figura 4.27. Passos da metodologia StCM (Kasperek e Maurer, 2013).

Neste estudo, os autores analisaram o processo de desenvolvimento de um sistema *e-bike-sharing* (PSSycle) para construir o modelo. A estrutura do desenvolvimento do processo foi documentada a cada duas semanas, durante seis meses. Uma matriz de vários domínios (*Multiple Domain Matrix* - MDM) foi construída para cada ponto de tempo observado a fim de investigar a mudança dos elementos e as relações incorporadas nas MDM particulares ao

longo do tempo. Deste modo a mudança dentro da estrutura do processo de desenvolvimento pode ser observada.

A evolução da estrutura durante este tempo observado foi usada como um conjunto de dados para construir um modelo de SD da estrutura do processo de desenvolvimento do produto. Portanto, numa primeira fase, as exigências da metodologia de SD foram mapeadas nas condições especiais estruturais dos modelos. Conseqüentemente, um modelo qualitativo de SD dos dados estruturais foi desenvolvido. Este modelo foi então utilizado para ilustrar e relacionar as várias influências dinâmicas no processo de desenvolvimento do produto.

Como o processo de desenvolvimento do produto é implementado por ciclos de retrabalho, a sua natureza iterativa foi representada a contento. Ciclos de retrabalho são identificados como os principais elementos para a transformação já que contém vários loops de *feedback* que regulam as taxas de trabalho com tarefas de fluxo entre os diferentes estoques. As influências externas sobre o processo e seu impacto na sua estrutura puderam ser ilustradas e compreendidas. Desse modo, os fatores que influenciam os domínios foram relacionados com a configuração do sistema final. A Figura 4.28 exemplifica um ciclo de retrabalho de fase única.

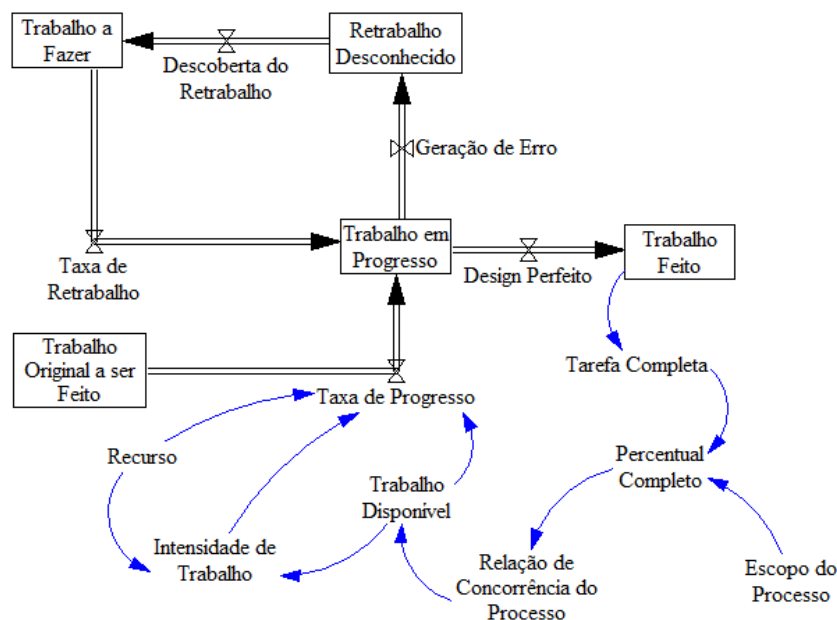


Figura 4.28. Ciclo de retrabalho de fase única (Le et al., 2010).

Através da transformação no modelo de Sistemas Dinâmicos, nem todas as informações (domínios) sobre o sistema incorporado na MDM puderam ser transformados em ciclos de retrabalho. A Figura 4.29 apresenta o conceito desenvolvido pelos autores para a

transformação do modelo de múltiplas matrizes de domínio em um modelo de Dinâmica de Sistemas.

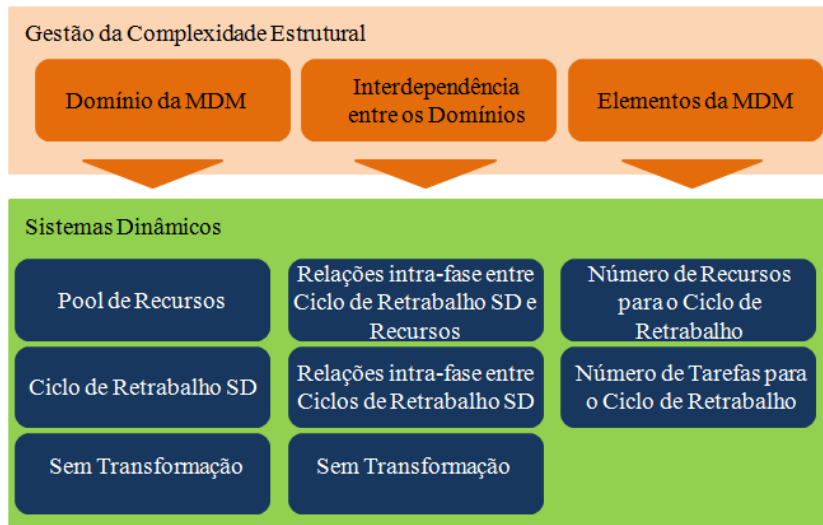


Figura 4.29. Conceito desenvolvido do modelo de transformação de MDM para um modelo de Dinâmica de Sistemas (Kasperek e Maurer, 2013).

O ciclo de retrabalho ilustra as variadas características dos domínios das matrizes de domínio múltiplo do processo de desenvolvimento de produtos. Através da implementação de ciclos iterativos de retrabalho a característica do processo de desenvolvimento de produtos é realçado. A Figura 4.30 apresenta os ciclos de retrabalho. Os retângulos indicam os domínios da matriz de vários domínios que foram transformados em ciclos de retrabalho. O retângulo 1 indica o domínio de requisitos, o retângulo 2, o domínio das funções, o retângulo 3, o domínio de *hardware* e o retângulo 4, o domínio de *software*.

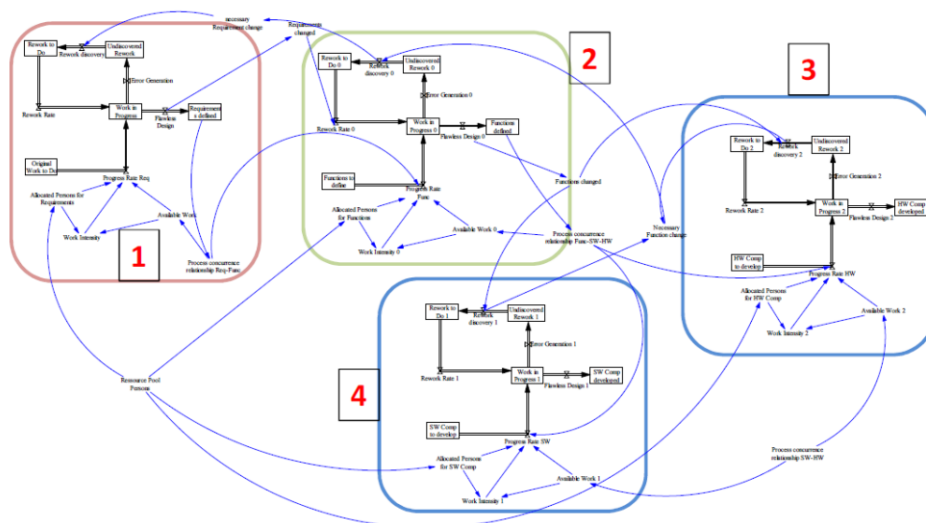


Figura 4.30. Modelo qualitativo de SD do projeto PSSycle para representar o comportamento dinâmico do sistema (Kasperek e Maurer, 2013).

Geralmente, o método de transformação descrito pelos autores é aplicável em vários níveis de abstração: no nível mais alto de abstração, todos os domínios em que possa ocorrer retrabalho podem ser modelados dentro de um ciclo de retrabalho. Por outro lado seria também possível modelar a estrutura de um nível inferior de abstração, como ilustrado no trabalho de Kasperek e Maurer: vários ciclos de retrabalho interconectados foram usados para ilustrar o comportamento de um domínio único. Com este procedimento, os conjuntos de tarefas dentro de um domínio foram modelados como ciclos de retrabalho. Ao fazer isso, as informações sobre sequências dentro da estrutura (por exemplo, uma ordem de tarefas), poderiam ser transformadas em um nível mais detalhado no modelo de SD.

A simulação do modelo quantitativo não foi apresentada no trabalho, mas os autores pretendem realizá-la para refinar o modelo no nível correto de abstração para prever resultados tais como os fatores de influência externos e internos (motivação, carga de trabalho) afetam os processos de desenvolvimento de produtos, analisando este impacto ao longo do tempo. Isto pode permitir um maior controle e compreensão do processo de desenvolvimento do produto.

4.5.7 Sagawa (2013); Sagawa e Nagano (2015)

Sagawa (2013) traz uma abordagem combinada de estudo de caso e Modelagem de Sistemas Dinâmicos para analisar a dinâmica e a prática do Planejamento e Controle da Produção (PCP). Seu trabalho está dividido em duas partes. Uma analisa a integração, a qualidade da informação e as incertezas do ambiente no âmbito do PCP. A outra aborda o desenvolvimento de um modelo dinâmico para controle da produção de múltiplos produtos, capaz de responder às incertezas que afetam a estabilidade dos sistemas produtivos.

Uma abordagem qualitativa foi desenvolvida para interpretar o ambiente e a percepção dos indivíduos envolvidos na verificação das métricas importantes para a função do PCP nas empresas de manufatura; a influência das variáveis integração, incerteza e qualidade da informação no desempenho do PCP, em termos de níveis de reprogramação; o relacionamento do nível de reprogramações com o desempenho da empresa em termos de fatores competitivos e financeiros.

Variáveis quantitativas, mensuráveis e linguagem matemática foram aplicadas no desenvolvimento de um modelo dinâmico para controle da produção capaz de executar reprogramações e ajustes, automaticamente, em resposta a incertezas e modificações nas

condições de produção. O desempenho em termos de reprogramações confere à empresa um equilíbrio em relação ao custo, confiabilidade e flexibilidade. Estes fatores levam a empresa a ter um bom desempenho tanto financeiro quanto de mercado.

Sagawa e Nagano (2015) desenvolveram um modelo dinâmico para controle da produção de múltiplas famílias de produtos baseado na teoria de Modelagem de Sistemas Dinâmicos e na metodologia dos grafos de ligação. Como forma de avaliar a metodologia proposta a uma situação real, os autores modelou um sistema de produção de embalagens de uma empresa do interior de São Paulo.

A empresa analisada fabrica sob encomenda embalagens de rafia para rações de animais, fertilizantes, açúcar e mantas térmicas revestidas de alumínio. Os sacos de rafia apresentam diferentes características de gramatura, resistência e acabamento. Para atender as necessidades dos clientes, a empresa fabrica nove grupos distintos ou família de produtos. A formação das famílias de produtos se deve a similaridade de roteiros e processos de fabricação. Os produtos de uma mesma família podem variar em termos de dimensões, cores, características de fio, gramatura, abertura da trama, entre outros. Mas todos os produtos da família seguem a mesma sequência de operações. A Figura 4.31 apresenta um fluxograma simplificado da produção de embalagens de rafia.

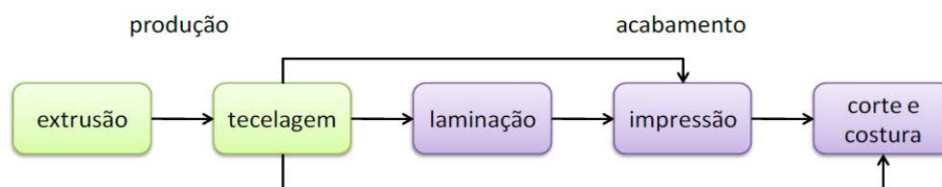


Figura 4.31. Fluxograma simplificado da produção de embalagens de rafia (Sagawa, 2013).

Para executar os processos de produção a empresa conta com uma máquina para a extrusão, doze para a tecelagem, uma para a laminação, duas para a impressão, quatro para corte e costura, uma para corte manual e cinco para costura manual. Para comparar as capacidades dessas diferentes máquinas, foi feita uma padronização nas unidades de medidas. Além disso, foi definido o *mix* de produção da empresa (razão entre o volume a ser produzido de cada família em relação ao volume total de produção). Todas essas informações foram necessárias para que fossem definidas as porcentagens do fluxo de material que deveria seguir cada roteiro de produção.

O modelo físico para representação do sistema de produção de embalagens de rafia foi descrito com base nas etapas do processo produtivo, nos roteiros do processo e nos dados do maquinário da empresa. Nesse modelo, as máquinas foram representadas por círculos, sendo precedidas por estoques intermediários. 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.

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, os autores optaram por representá-los como uma única máquina (máquina 2), com capacidade de processamento equivalente à soma das capacidades individuais de cada tear. A vantagem dessa representação é a redução da complexidade em termos de programação computacional, uma vez que se reduz a quantidade de código necessária. Por outro lado, as impressoras e as máquinas de corte e costura foram representadas individualmente, uma vez que haviam diferenças significativas em suas características. Nesse caso, os autores julgaram necessário representar tais diferenças no estudo da dinâmica do sistema. A Figura 4.32 representa o modelo físico.

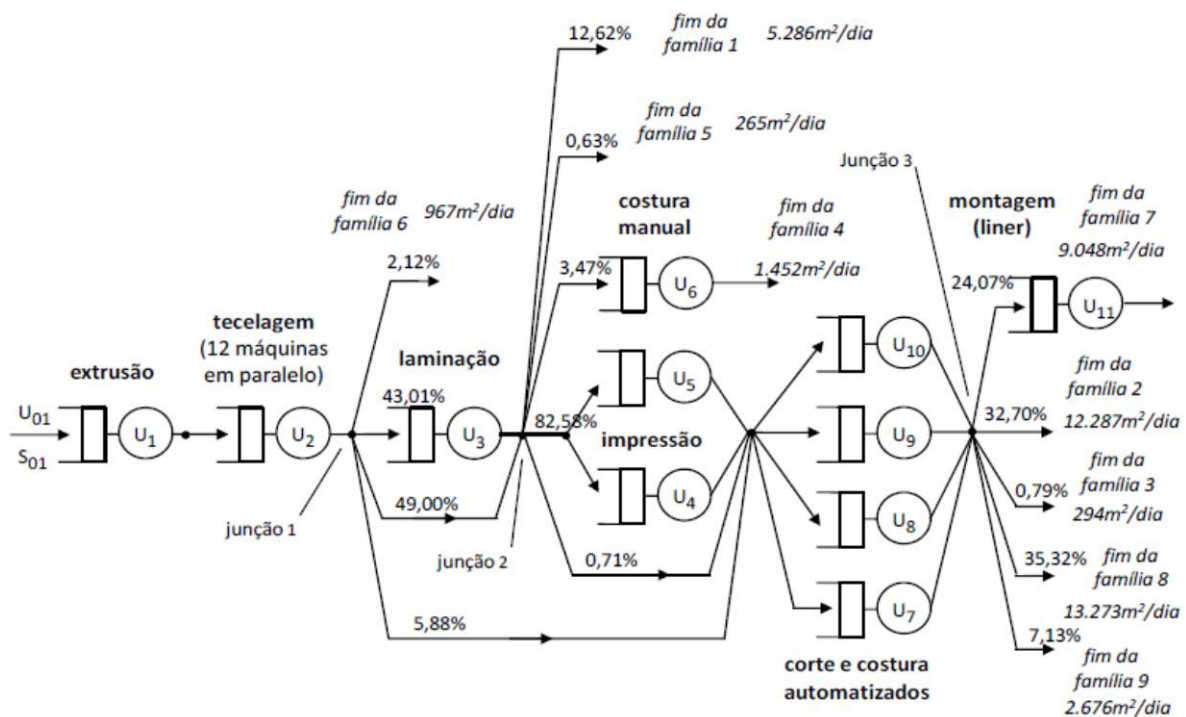


Figura 4.32. Modelo físico do sistema de produção de embalagens de rafia (Sagawa, 2013).

Excetuando-se a junção 1, nem todas as famílias passam por todas as junções. Desta forma, as porcentagens de fluxo em cada junção foram normalizadas para que o modelo se mantivesse consistente.

A construção do modelo físico proposto por Sagawa (2013) foi baseada na metodologia dos Grafos de Ligação. Esta metodologia permite que o modelo de um sistema seja obtido a partir da modelagem de seus subsistemas. As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 apresentam os grafos de ligação do sistema de embalagem de rafia proposto. Neste sistema, a estação composta por uma máquina e um estoque precedente foi representada pela junção de um capacitor, uma fonte de esforço e um resistor. A parte divergente das junções foi representada por elementos transformadores com módulo correspondente à porcentagem de fluxo passante no ramo em questão.

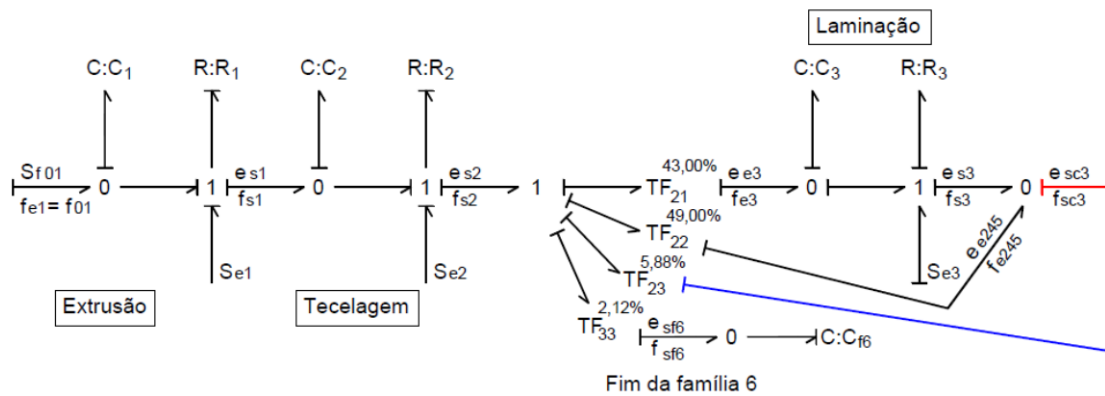


Figura 4.33. Grafos de Ligação do sistema de embalagens de rafia: parte 1 (Sagawa, 2013).

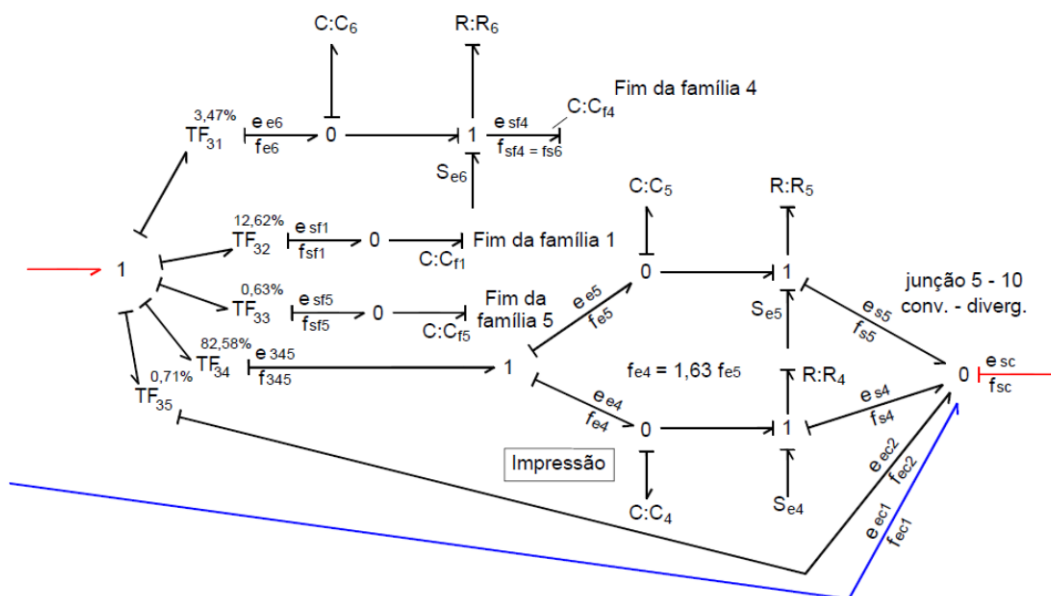


Figura 4.34. Grafos de Ligação do sistema de embalagens de rafia: parte 2 (Sagawa, 2013).

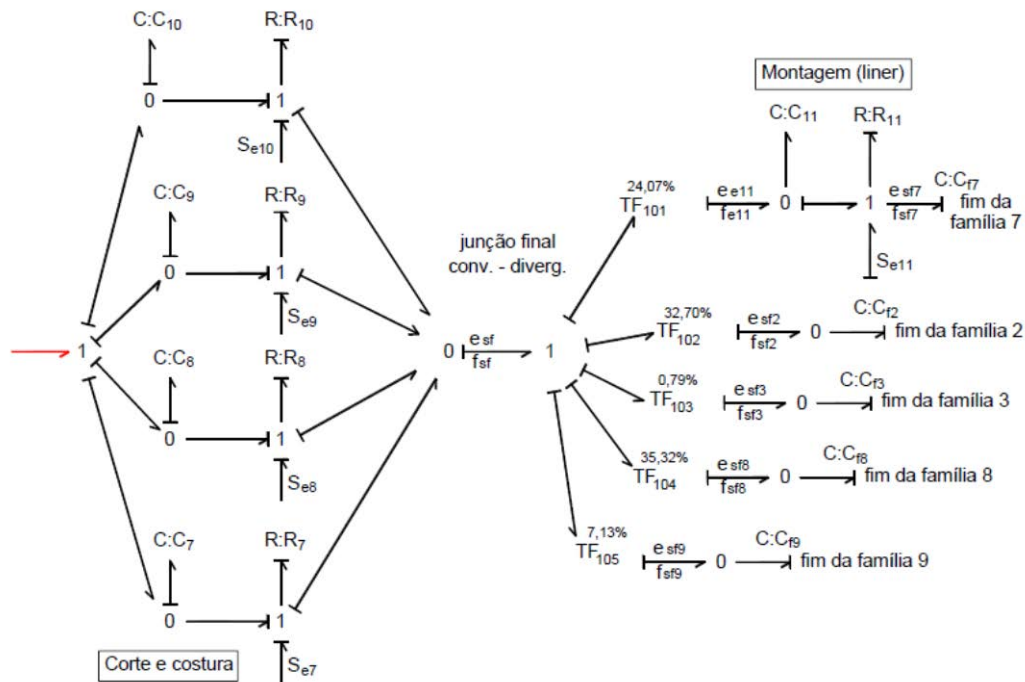


Figura 4.35. Grafos de Ligação do sistema de embalagens de rafia: parte 3 (Sagawa, 2013).

As equações constitutivas (relações causais) dos elementos puros, fontes e junções foram usadas para escrever o modelo matemático. Um maior detalhamento das equações e suas deduções são encontrados em Sagawa (2013) e Sagawa e Nagano (2015).

O uso combinado da metodologia de SD e dos Grafos de Ligação nos trabalhos permitiram que o sistema fosse equacionado e implementado com o auxílio de um *software* de simulação. A modelagem empregada possibilitou a obtenção de um modelo de sistema unificado da produção de todas as famílias de produtos. A solução em regime permanente forneceu estimativas da frequência ideal mínima de operação das máquinas, isto é, seu tempo de ciclo para realizar uma dada tarefa. Desta forma, foi possível simular a quebra de máquinas ou problemas relacionados a estoque.

4.5.8 Domingos et al. (2015)

Domingos et al. (2015) propuseram um modelo de Simulação de Sistemas Dinâmicos que proporcionasse uma visão holística não só das interações existentes nos processos típicos (planejamento de vendas, planejamento de produção e suprimento) do ciclo S&OP (*Sales and Operations Planning* ou Planejamento de Vendas e Operações), mas também, das interações com os demais processos existentes em uma empresa que estão implicitamente envolvidos nas decisões resultantes do S&OP.

Inicialmente, os autores apresentaram um diagrama de enlace causal (Figura 4.36) que mostrava as relações de causa e efeito das regras de negócios existentes nas diversas áreas funcionais de uma empresa. Mais especificamente, este diagrama apresentou o relacionamento entre plano de vendas, plano de estoque, plano de produção, suprimentos, custos de estoque, custo unitário médio móvel, capacidade dos centros de trabalho, faturamento, contas a pagar, contas a receber e fluxo de caixa. As setas representam a relação de causa e efeito entre duas variáveis.

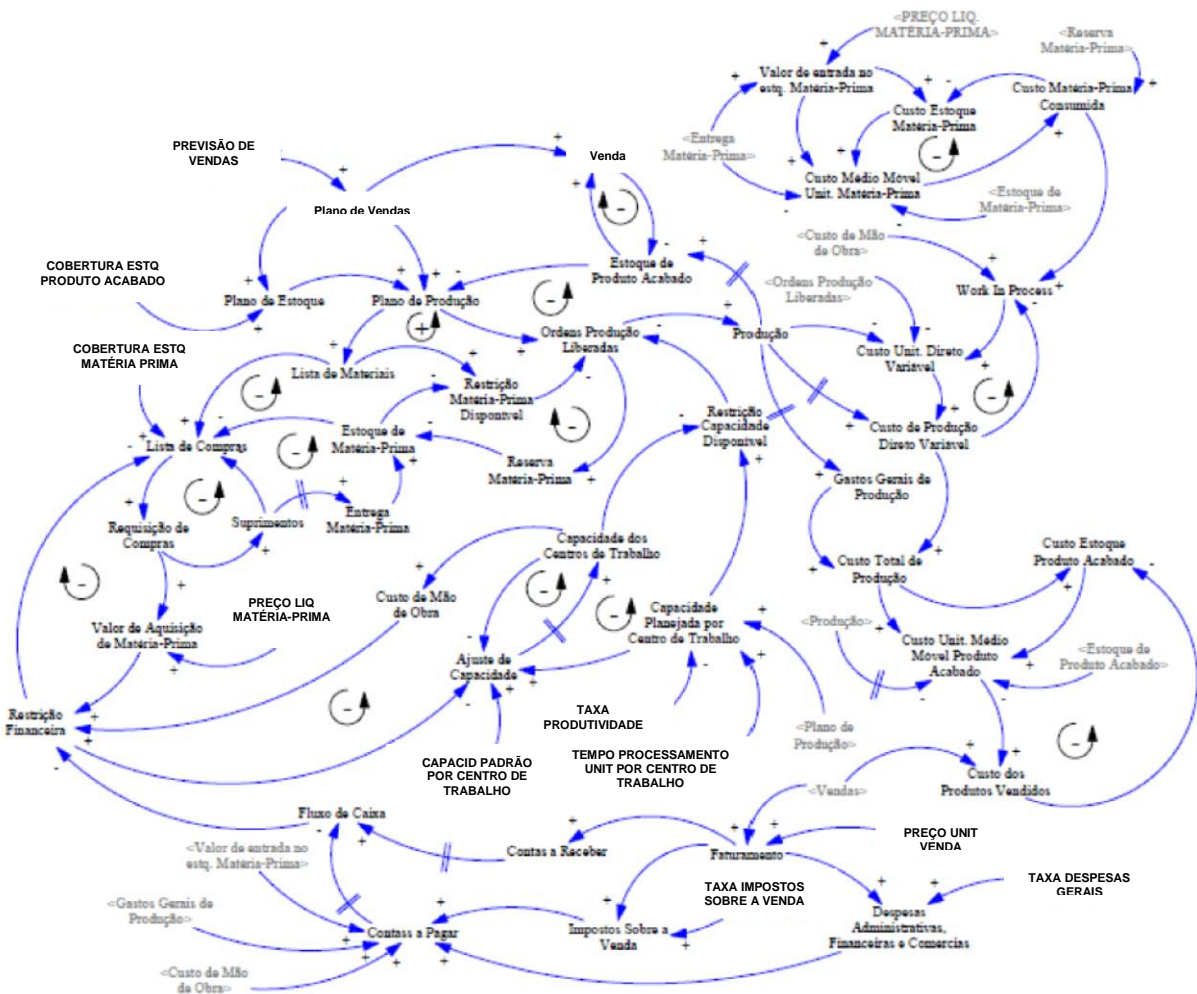


Figura 4.36. Modelo de enlace causal do processo de S&OP (Domingos et al., 2015).

A partir deste modelo de enlace causal, os autores realizam sua conversão para um modelo de estoque e fluxo. Através desta conversão, o modelo passou a ter um maior detalhamento da estrutura das regras de negócio do processo, o que facilitou sua implementação computacional.

O modelo de Sistemas Dinâmicos construído foi agrupado em sete macroprocessos: suprimentos, produção, capacidade, previsão de vendas, custeio por absorção,

faturamento/análise econômica e fluxo de caixa. A Figura 4.37 apresenta a estrutura do macroprocesso previsão de vendas. Em Domingos et al. (2015) encontram-se todas as fases detalhadas.

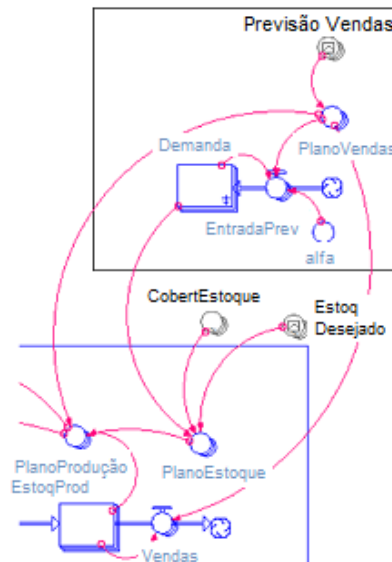


Figura 4.37. Estrutura modelada em Sistemas Dinâmicos para o macroprocesso “Previsão de Vendas” (Domingos et al., 2015).

Através do modelo em Sistemas Dinâmicos, os gestores puderam ajustar as restrições de cada área funcional modelada. A simulação deste modelo permitiu gerar um cenário de planejamento para o horizonte de tempo desejado. Alterações dos valores de entrada permitiram a criação de múltiplos cenários onde cada cenário era composto pela agregação do plano de vendas, plano de produção, plano de estoque, plano de suprimentos, plano financeiro e previsão do fluxo de caixa. Esta alteração dos valores de entrada possibilitou aos gestores do processo de S&OP a escolha de cenários que direcionassem a tomada de decisões no sentido de equilibrar a demanda e a oferta de produtos, considerando o bom uso dos recursos para atender com qualidade os serviços prestados aos clientes e às metas estratégicas da empresa.

O modelo apresentado pelos autores possui todas as atividades envolvidas no processo de S&OP, o que permite que todos os participantes tenham ciência de todas as etapas do processo. Este fato permite minimizar a diferença entre o real e o planejado.

4.6 Análise das aplicações dos Sistemas Dinâmicos em problemas organizacionais

A Tabela 4.3 apresenta uma análise dos pontos positivos e negativos apresentados nos trabalhos que aplicam a metodologia de sistemas dinâmicos em etapas da produção.

Tabela 4.3 – Análise das aplicações de SD em problemas organizacionais⁴

Autor	Pontos positivos do trabalho	Pontos negativos do trabalho
Ford e Sterman (1998)	A estrutura elaborada permite executar os passos executar-verificar-retrabalhar em todas as etapas do PDP.	Considera que os recursos humanos não apresentam diferenças de capacitação para execução das atividades em cada etapa.
Bomtempo, Junior e Junior (2007)	A aplicação de SD na construção do modelo que aperfeiçoasse a tomada de decisões permitiu o desenvolvimento de simulações para testar a solução proposta.	O capital organizacional não foi representado explicitamente no modelo, sendo vinculado ao capital físico (Reservas), ao capital financeiro (Caixa) e ao capital humano (Pessoal).
Amaral (2008a, 2008b)	A utilização de SD em conjunto com a técnica de ponto de inflexão permitiu uma melhoria importante no gerenciamento de projetos auxiliando o gerente na tomada de decisões e evitando que elementos antes ocultos ao gerenciamento, pudessem ser monitorados.	Apenas as características que descrevem a estrutura do ponto de inflexão, as políticas de gestão em projetos e os processos fundamentais impactados foram incluídos na análise. As características dos participantes não foram consideradas.
Marujo (2009)	A metodologia de SD foi empregada para avaliar a fração de retrabalho na superposição de atividades.	É necessário um refinamento do modelo, validando-o com uma base de dados maior em organizações diferentes.
Figueiredo e Loiola (2011a, 2011b, 2012 e 2014)	Aplicação de SD em uma estrutura de fluxo auxiliar que seleciona projetos num funil de desenvolvimento.	As simulações usadas para validar o modelo foram realizadas em uma empresa fictícia.
Kasperek e Maurer (2013)	As influências dinâmicas no PDP foram muito bem representadas pelo modelo de SD com ciclos de retrabalho.	A simulação do modelo não foi apresentada no trabalho não apresentando, portanto, um refinamento do modelo proposto.

Sagawa (2013), Sagawa e Nagano (2015)	O uso combinado da metodologia de SD com grafos de ligação permitiu a construção de um modelo do planejamento e controle da produção.	No modelo proposto, os autores consideraram que os estoques finais tinham capacidade de armazenamento ilimitado.
Domingos et al. (2015)	A utilização de SD permitiu representar e relacionar o comportamento dinâmico das variáveis que compõem os planos de S&OP.	Os autores utilizaram uma base de dados hipotética para testar o modelo.

Diante dos artigos estudados, nota-se que a modelagem através de sistemas dinâmicos apresenta modelos capazes de prever etapas da produção ajudando a minimizar distúrbios que as afetam de modo negativo. Um modelo bem definido, que representa a realidade do sistema produtivo, permite a simulação, por exemplo, de quebras de máquinas e falta de insumos. Os modelos estudados dizem respeito ao planejamento e controle da produção, à gestão e análise de custos, a processos decisórios e a uma parte da fase portfólio do PDP. Nesse sentido, seria extremamente atrativo o desenvolvimento de modelos de sistemas dinâmicos das outras fases do PDP uma vez que esse é um processo cada vez mais determinante da sobrevivência e competitividade das empresas, e ainda, que dado seu caráter multidisciplinar, especialmente em sistemas mecatrônicos, previsões quanto a tempo e custo resultariam em melhores decisões das empresas quanto a em quê e quando inovar em produtos.

5. MODELAGEM DA FASE DO PROJETO TÉCNICO

Analisando o modelo de referência do desenvolvimento de produtos mecatrônicos, observa-se que o projeto técnico é uma fase central, sendo uma das fases mais complexas e que demanda mais tempo, pois apresenta soluções técnicas para as funções principais dos produtos. Nesta fase, as funções primárias do projeto de engenharia são avaliadas quanto ao cumprimento das especificações dos produtos, podendo ocorrer no âmbito do desenvolvimento do produto ou dos seus subsistemas em função da complexidade do projeto.

No Capítulo 3 foi apresentada a fase do Projeto Técnico (Figura 3.3) – uma das fases do MRM. Para melhor compreensão, a Figura 5.1 apresenta um modelo desta fase mais detalhado, desenvolvido com o auxílio do *software* Vensim@PLE. Na Figura 5.1 inicialmente temos uma entrada (1) definida pelas especificações do projeto e pelo plano técnico do projeto. Podemos ter a incorporação de novas tecnologias (2) (quando estas forem consideradas maduras) no desenvolvimento do produto ou usar uma tecnologia existente (3) para desenvolver o projeto de engenharia básica do produto, o projeto do sistema de controle, comunicação e microprocessado, o projeto eletrônico e o projeto de *software* de alto nível. Depois de especificados os projetos, aquisiciona-se materiais e componentes de prateleira (4) para então, desenvolver e testar o protótipo Alfa do produto (5). Depois destes passos é realizada a verificação dos resultados do projeto técnico (6) para finalmente serem documentadas as soluções técnicas (7).

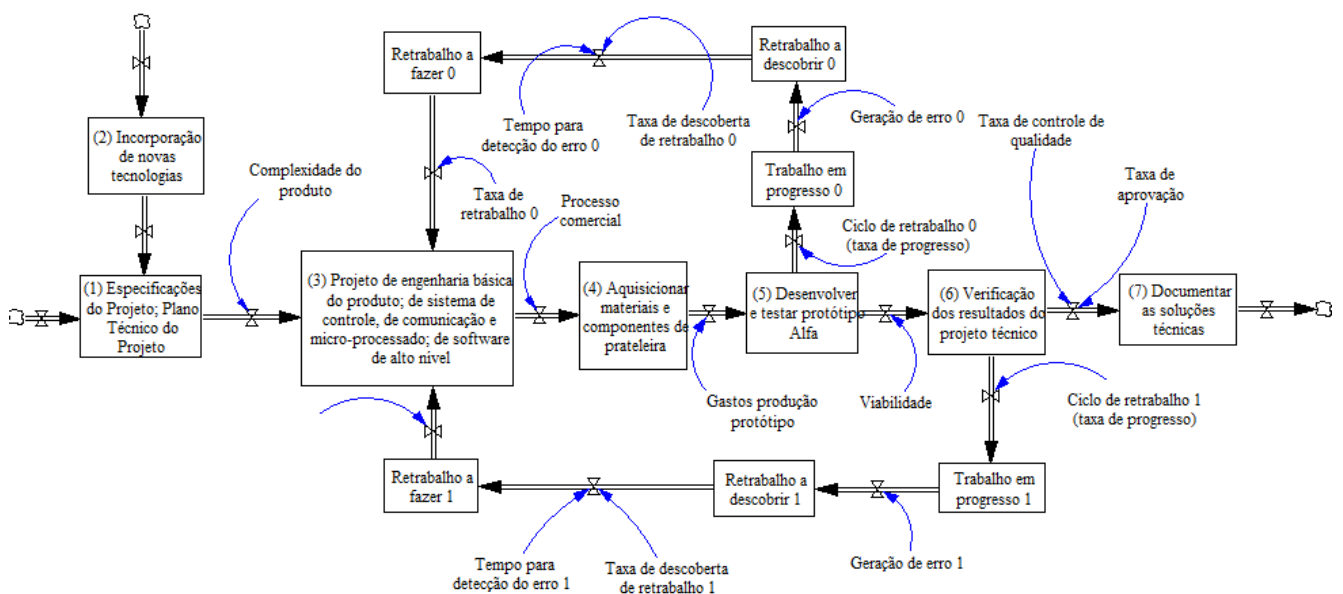


Figura 5.1. Modelo da Fase do Projeto Técnico.

Neste modelo podemos observar dois ciclos de retrabalho. O primeiro ciclo pode-se dar na fase de desenvolvimento e teste do protótipo Alfa (5) uma vez que este protótipo pode apresentar problemas detectáveis apenas quando está sendo integrado. Por exemplo, um dispositivo que não se encaixe perfeitamente no protótipo Alfa, pode gerar um retrabalho no projeto eletrônico, ocasionando uma diminuição na taxa de progresso das tarefas gerais. O segundo ciclo pode acontecer na fase de verificação dos resultados do projeto técnico (6). Em ambos os ciclos, é necessário retornar a fase do desenvolvimento dos projetos do produto (3) para que sua correção possa ser feita e assim, seja dado sequenciamento ao fluxo.

A literatura apresenta, geralmente, um único ciclo de retrabalho na modelagem dos processos. Estes ciclos adéquam-se aos modelos de iterações típicas dos processos de projeto de engenharia. O benefício de se modelar a influência do retrabalho em modelos de SD reside na sua capacidade para capturar a dinâmica e as complexidades dos sistemas do mundo real, melhoram a compreensão do comportamento do processo de projeto de engenharia e seu impacto sobre o desempenho do processo. Ford e Sterman (2003) mostram em seu trabalho que o retrabalho requer uma coordenação entre a etapa que descobriu a exigência de mudança e a etapa que o gerou e deve corrigir o trabalho. Vale salientar que estes ciclos atrasam os projetos ocasionando mais despesas e demandando mais tempo.

Kasperek et al. (2014) explica detalhadamente o funcionamento do ciclo de retrabalho (Figura 5.2). A variável definição A define o valor inicial do *Trabalho Remanescente A*. As tarefas de trabalho, em seguida, seguem como um fluxo de trabalho paralelo com erros (montante definido pela *qualidade do trabalho A*) acumulando em *Retrabalho Não Descoberto A*. Somente se esses erros forem detectados, será necessário retrabalho. O trabalho a ser reformulado é descrito pela taxa de *retrabalho descoberto A* que processa o trabalho para o estoque *Trabalho Remanescente A* e um fluxo de volta do *Trabalho Realizado A* em *Trabalho Remanescente A*. Um *feedback* adicional é implementado a partir do *Trabalho Realizado A* para *Trabalho Remanescente A*. O *feedback* é controlado pela taxa *A corrompida* que é desencadeada por eventos externos. A construção de modelos com estes dois *loops* de retorno permite diferenciar entre retrabalho interno dentro da fase (controlada pelo *retrabalho descoberto A*), tal como interações convencionais durante a fase de concepção, e retrabalho devido a eventos externos, tais como a ocorrência de impactos cíclicos. O ciclo de retrabalho termina se a quantidade de trabalho realizado é igual à soma de trabalho inicial a fazer.

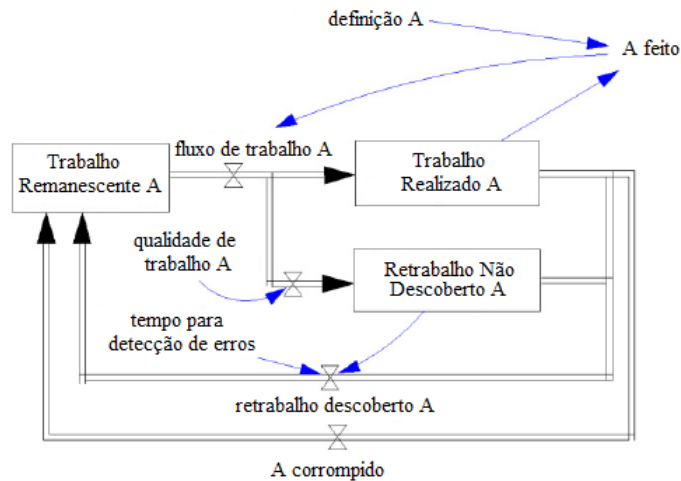


Figura 5.2. Ciclo de retrabalho de fase única (Kasperek et al. 2014).

Um das etapas mais importantes do modelo da fase do projeto técnico é a etapa (3), em que se desenvolvem os projetos do produto mecatrônico. Nesta etapa, alguns pontos importantes sobre os projetos precisam ser compreendidos: o projeto da engenharia básica do produto detalha a concepção do produto para sua função principal; o projeto do sistema de controle, que integra o projeto de controle com o sistema de controle, requer que a equipe de projeto tenha familiaridade com sua aplicação; o projeto do sistema de comunicação é implementado através do projeto eletrônico que, por sua vez, depende da estratégia de controle adotada; os sistemas de controle são implementados através de componentes microprocessados; e o projeto de *software* de alto nível produz o código que implementa as funções definidas na análise de requisitos de *software*.

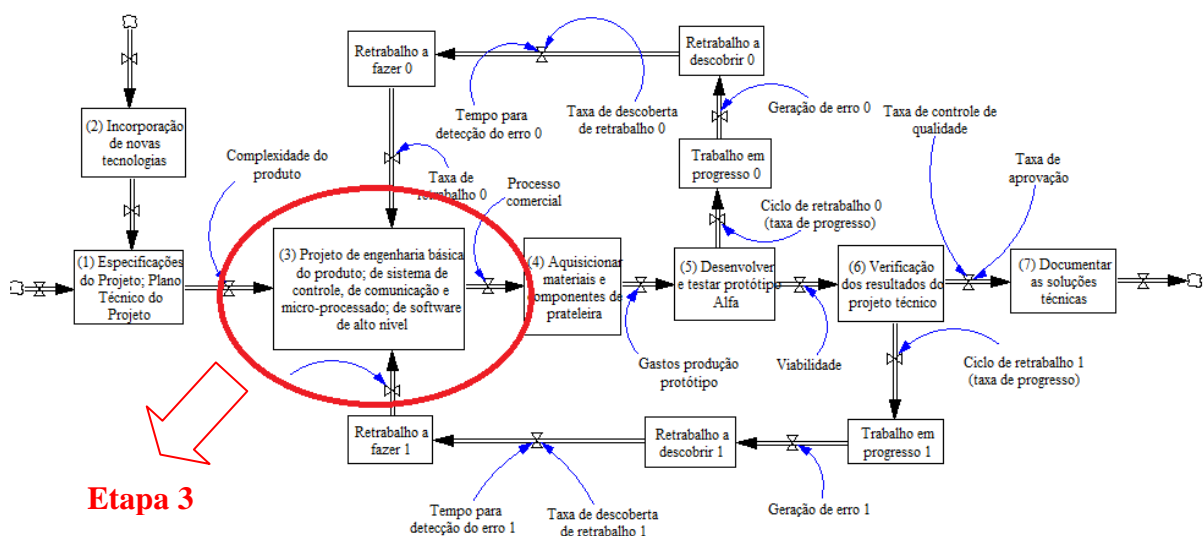


Figura 5.3. Etapa (3) – Fase do Projeto Técnico.

A Figura 5.4 traz de forma mais detalhada esta etapa (3) do modelo do projeto técnico. Deve-se observar que existe um ciclo simultâneo em cada projeto desenvolvido neste estoque. É necessário que todos os projetos estejam finalizados para que seja possível dar seguimento ao fluxo e passar para o próximo estoque, que é a aquisição de materiais e componentes de prateleira (4). Outra característica deste estoque diz respeito às taxas de entrada e saída. Para que não seja desenvolvido estoque intermediário, é necessário que a taxa de saída seja igual a taxa de entrada.

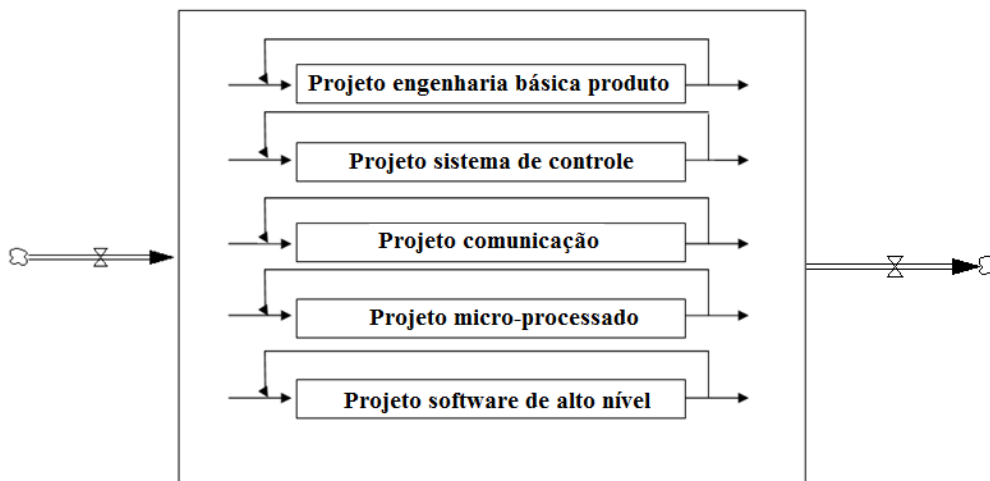


Figura 5.4. Ciclos simultâneos dos projetos: Etapa 3 da Fase do Projeto Técnico.

Os ciclos simultâneos dos projetos da Fase do Projeto Técnico podem ser entendidos como circuitos lógicos. George Boole descreveu em seu livro intitulado *Uma Investigação das Leis do Pensamento*, uma forma de se tomar decisões com base em circunstâncias verdadeiras (também chamadas de estado 1, sim, aparelho ligado, presença de tensão, chave ligada, etc.) ou falsas (também chamadas de estado 0, não, aparelho desligado, ausência de tensão, chave elétrica desligada, etc.). A representação dos sistemas através de símbolos e operadores que descrevem essas decisões é chamada de álgebra booleana. Uma das aplicações da álgebra booleana é descrever a relação entre as saídas de um circuito lógico (as decisões) e as entradas (as circunstâncias). As entradas são consideradas variáveis lógicas e seus níveis determinam o(s) nível(is) da(s) saída(s).

A álgebra booleana é formada por três operações lógicas básicas: *AND* (e), *OR* (ou) e *NOT* (não). Para entender a operação lógica AND, vamos considerar a convenção no circuito:

- Chave aberta ou Lâmpada apagada = 0
- Chave fechada ou Lâmpada acesa = 1

Observando todas as possíveis combinações (Figura 5.5(a)), pode-se concluir que a lâmpada só fica acesa quando as duas chaves (A e B) estão simultaneamente fechadas. Outra forma de representar estas combinações é através da tabela verdade (Figura 5.5 (b)). No lado esquerdo da tabela estão todas as combinações para os níveis lógicos de entrada e, no lado direito, os níveis lógicos resultantes para a saída. Há ainda a possibilidade de representar a operação lógica *AND* através de portas (Figura 5.5 (c)).

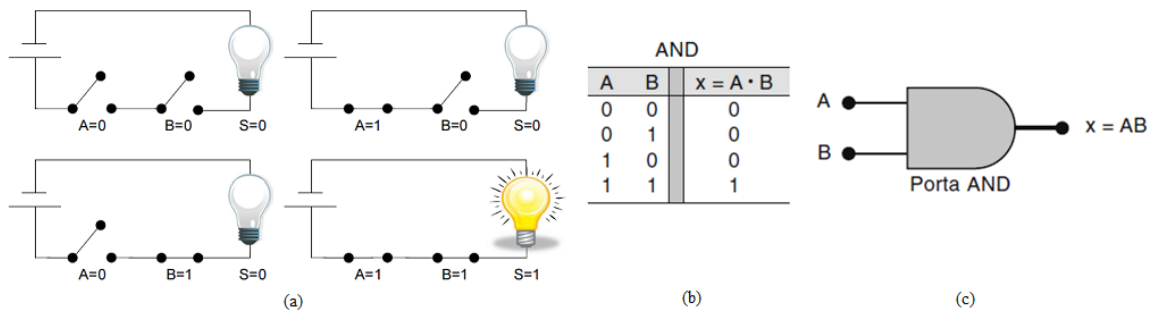


Figura 5.5. Álgebra Booleana: operação lógica *AND*. (a) Representação por circuitos, (b) representação por tabela verdade e (c) representação por porta.

Os ciclos simultâneos dos projetos da Fase do Projeto Técnico podem ser representados através da porta *AND* onde os projetos representam as entradas e a saída só é possível quando todos os projetos forem aprovados, ou seja, quando todos os projetos tiverem valor igual a 1 simultaneamente. A Figura 5.6 mostra a representação dos ciclos simultâneos dos projetos através de portas.

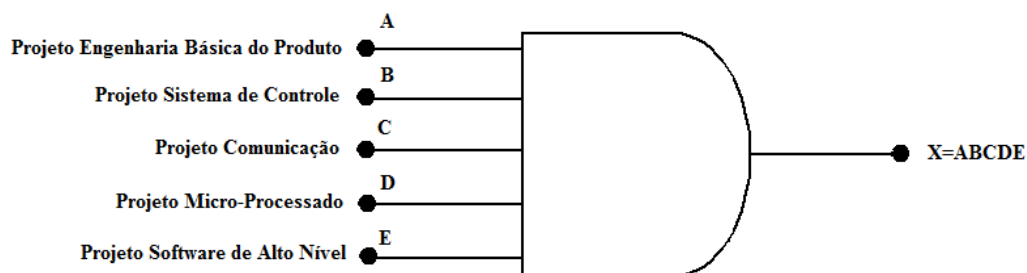


Figura 5.6. Representação dos ciclos de projeto simultâneos através de portas.

Além de ciclos simultâneos, a execução dos projetos (A, B, C, D e E) é influenciada por duas variáveis: complexidade e senioridade (as definições dessas variáveis foram amplamente discutidas na seção 2.3). Muitos projetos possuem um alto nível de complexidade, o que requer uma senioridade alta para que os projetos sejam desenvolvidos em um menor tempo e com um dado padrão de qualidade.

A partir das definições das áreas do conhecimento (Guia PMBOK 2013), das discussões apresentadas na seção 2.3 e dos ciclos simultâneos dos projetos da Etapa 3 da Fase do Projeto Técnico, podemos dizer que a qualidade do projeto pode ser descrita como uma relação diretamente proporcional à complexidade e inversamente proporcional à senioridade, em um dado tempo de execução.

O gerenciamento de qualidade em projetos adota a abordagem da Gestão da Qualidade Total ou *Total Quality Management* (TQM), que é centrada na busca pelo atendimento aos requisitos do consumidor, definindo padrões de qualidade, garantindo que estes sejam seguidos e monitorem os níveis de qualidade buscando melhoria contínua (Aggarwal e Rezaee, 1996). Um planejamento de qualidade de alto nível aumenta as chances do projeto ser executado de maneira mais adequada, sendo possível confirmar se os resultados obtidos estão dentro das especificações.

A relação da qualidade com o tempo, ao invés de utilizar escopo ou custo (restrição tripla – Guia PMBOK 2013) se deve ao fato de que o tempo relaciona as decisões de sequenciamento e programação das atividades realizadas, compreendendo o controle da duração de todas as atividades definidas como decorrência do escopo. O gerenciamento do tempo permite monitorar e controlar o projeto bem como determinar um fluxo para as atividades, estabelecendo uma sequência a ser seguida. Após o sequenciamento das atividades é possível estimar recursos (custos). Ou seja, mediante gestão do tempo indiretamente é possível estimar custos.

A Figura 5.7 (a) ilustra a relação da qualidade em função do tempo, que está operacionalizada com o sugerido por Sterman (2000), em que à medida que decorre o tempo de execução do projeto, mais próximo da excelência (qualidade = 100%) se está. As Figuras 5.7 (b), (c) e (d) foram desenvolvidas a partir das definições propostas por Sterman (2000) e pelas definições de complexidade e senioridade apresentadas na seção 2.3.

A Figura 5.7 (b) mostra a relação entre a qualidade e a senioridade (S) do projeto. Quanto maior for a senioridade dos desenvolvedores, mais próximo da qualidade de excelência se está. O gráfico da Figura 5.7 (c) apresenta a relação entre o tempo e a complexidade (C) do projeto. Quanto mais complexo um projeto é, mais tempo levará para ser executado. O gráfico da Figura 5.7 (d) mostra a relação entre o tempo e a senioridade (S) do projeto. Quanto maior for a senioridade dos desenvolvedores, menor será o tempo de sua execução. Analisando as relações apresentadas nos gráficos, nota-se que é possível atingir a

excelência num tempo menor mesmo quando o grau de complexidade dos projetos é alto. Para solucionar tal questão, é necessário que os desenvolvedores tenham um alto nível de senioridade.

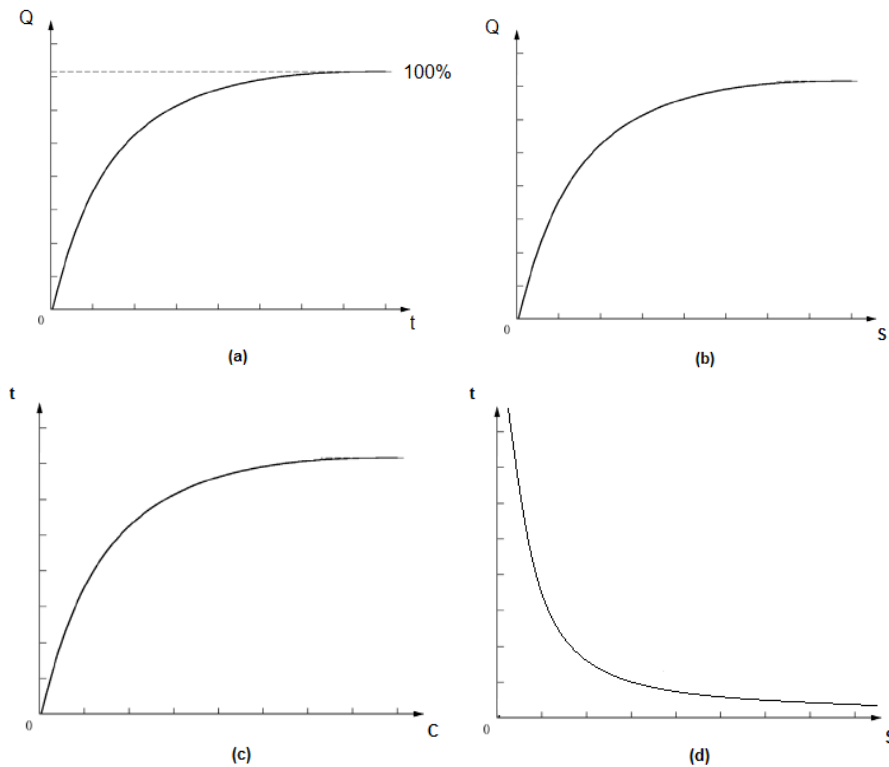


Figura 5.7. (a) Relação qualidade em função do tempo. (b) Relação qualidade em função da senioridade. (c) Relação tempo em função da complexidade. (d) Relação tempo em função da senioridade.

A relação qualidade em função do tempo é descrita por Sterman (2000) como “busca por metas”. Loops de *feedback* positivos geram crescimento, amplificam desvios e reforçam mudanças. Loops negativos buscam o equilíbrio. Loops de *feedback* negativos atuam para trazer o estado do sistema de acordo com uma meta ou estado desejado. Eles eliminam as perturbações que afastam o estado do sistema da meta. A Figura 5.8 apresenta a estrutura dos loops de *feedback* negativos. O estado do sistema é comparado com a “meta”. Se houver uma discrepância entre o desejado e o estado atual, uma ação corretiva é iniciada para trazer o estado do sistema de volta alinhado com a “meta”. Este gráfico se assemelha ao apresentado na Figura 5.8.

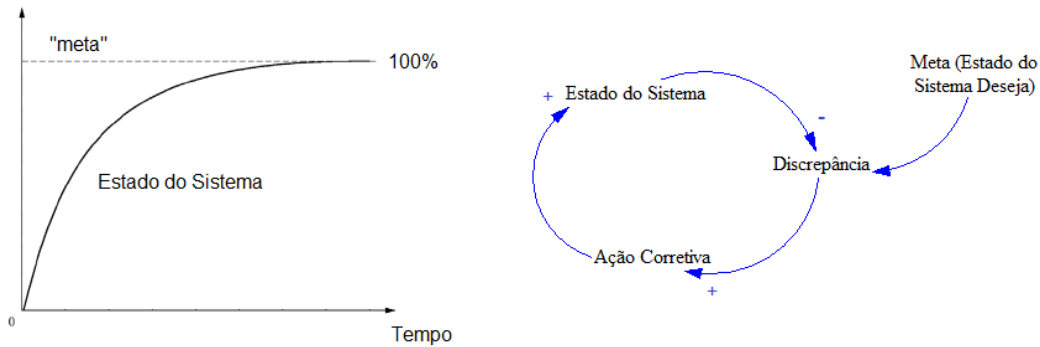


Figura 5.8. Busca por “metas”: estrutura e comportamento (Sterman, 2000).

Outra relação que se assemelha ao gráfico da relação qualidade em função do tempo é a resposta do sistema de primeira ordem para uma entrada em degrau unitário. Consideremos, inicialmente, o sistema de primeira ordem

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{Ts + 1}, \text{ com } T = \text{constante.} \quad (5.1)$$

A resposta ao degrau unitário será dada por

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s) = \frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (5.2)$$

onde $\frac{1}{s}$ é a Transformada de Laplace da Função Degrau Unitário. Considerando a transformada inversa de Laplace obtemos

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ para } t \geq 0. \quad (5.3)$$

Inicialmente, em $t = 0$, a resposta $c(0) = 0$. Por outro lado, $t \rightarrow \infty$ implica em $c(t) = 1$. Em $t = \tau$, $c(\tau) = 1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}} = 1 - e^{-1} = 0,632$, ou seja, $c(t)$ atinge 63,2% de seu valor total. Note-se que quanto menor for a constante τ , mais rapidamente o sistema responde. O gráfico da Figura 5.9 representa a resposta do sistema de primeira ordem para uma entrada em degrau.

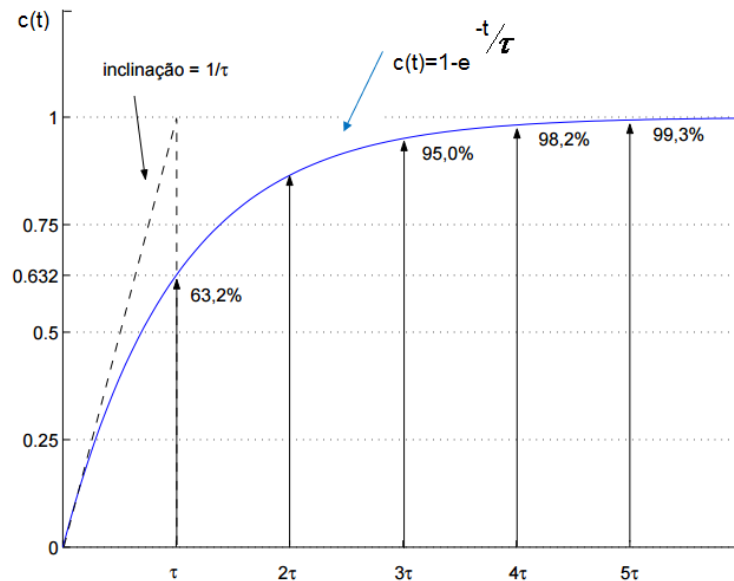


Figura 5.9. Resposta do sistema de primeira ordem para uma entrada em degrau.

É possível observar na Figura 5.9 que, sendo a entrada em degrau o requisito de qualidade do projeto ou seja, as especificações a serem atingidas em cada área de projeto (engenharia básica, sistema de controle, comunicação, microprocessado e *software* de alto nível), o gráfico sugere que no tempo τ , 63,2% do valor total do projeto terá sido desenvolvido. Um valor maior que 99,3% será atingido a partir do tempo 5τ .

5.1 Modelo da Fase do Projeto Técnico

A partir das definições abordadas na seção 2.3 de senioridade (S) e complexidade (C), e da equação da resposta do sistema de primeira ordem para uma entrada em degrau (Equação 5.3), podemos escrever uma equação para a Etapa 3 – Ciclos Simultâneos da Fase do Projeto Técnico, na qual a qualidade do projeto é descrita em função do seu tempo de execução:

$$Q(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.4)$$

Nesta equação (5.4), a qualidade do projeto é definida em função do seu tempo de execução. O tempo (t) é medido em meses e a constante τ é definida por

$$\tau = \frac{C}{S}$$

onde C é a complexidade e S a senioridade.

Com o auxílio do software Scilab 5.5.2, foi possível construir um gráfico tridimensional da Qualidade x Tempo x Complexidade (Figura 5.10(a)). Analisando o gráfico podemos fazer algumas inferências. Quanto maior a complexidade, menor a qualidade do projeto. Um projeto com baixa complexidade leva um tempo muito menor para atingir a qualidade de excelência (próximo a 1 ou 100%) enquanto que um projeto com alta complexidade, gasta muito mais tempo. O mesmo ocorre para na análise do gráfico Qualidade x Tempo x Senioridade (Figura 5.10(b)). Neste contexto, a análise da senioridade mostra-se extremamente necessária visto que uma alta senioridade é capaz de acelerar o tempo de resposta de um projeto com alta complexidade.

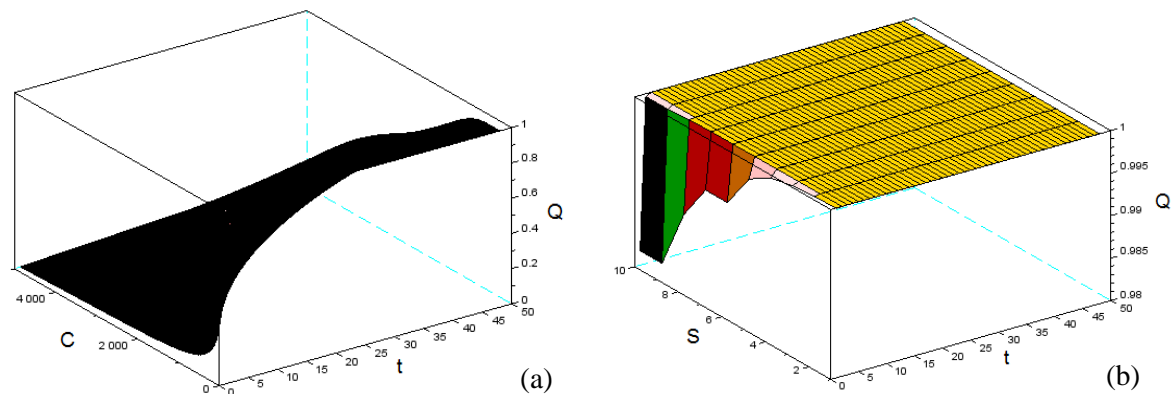


Figura 5.10. (a) Relação entre a Qualidade x Complexidade x Tempo e (b) Qualidade x Senioridade x Tempo.

A fim de analisar o relacionamento entre o Tempo, a Senioridade e a Complexidade, utilizamos como base um projeto fictício onde o seu tempo de execução tem duração máxima de 48 meses; a Senioridade varia de 1 a 10 onde 1 representa os profissionais com pouca experiência/titulação e 10, os profissionais com muita experiência/titulação; e a Complexidade varia de 1 a 10 onde 1 representa baixa complexidade e 10, alta complexidade (os valores da complexidade e da senioridade foram normalizados para que o seu tempo de processamento fosse mais rápido).

As relações extremas entre senioridade e complexidade são mostradas na Figura 5.11. Nos casos em que ocorrem as relações “Mínima Senioridade e Mínima Complexidade” e “Máxima Senioridade e Máxima Complexidade” (Figuras 5.11 (a) e (d), respectivamente), observa-se que o tempo de resposta para se atingir a Qualidade de excelência é pequeno. Na relação “Mínima Senioridade e Máxima Complexidade” (Figura 5.11 (b)), tem-se um tempo

de resposta maior para se atingir a Qualidade de excelência. E no último caso (Figura 5.11 (c)), em que ocorre “Máxima Senioridade e Mínima Complexidade”, a resposta do sistema é muito rápida, ou seja, a Qualidade é atingida em um tempo muito curto.

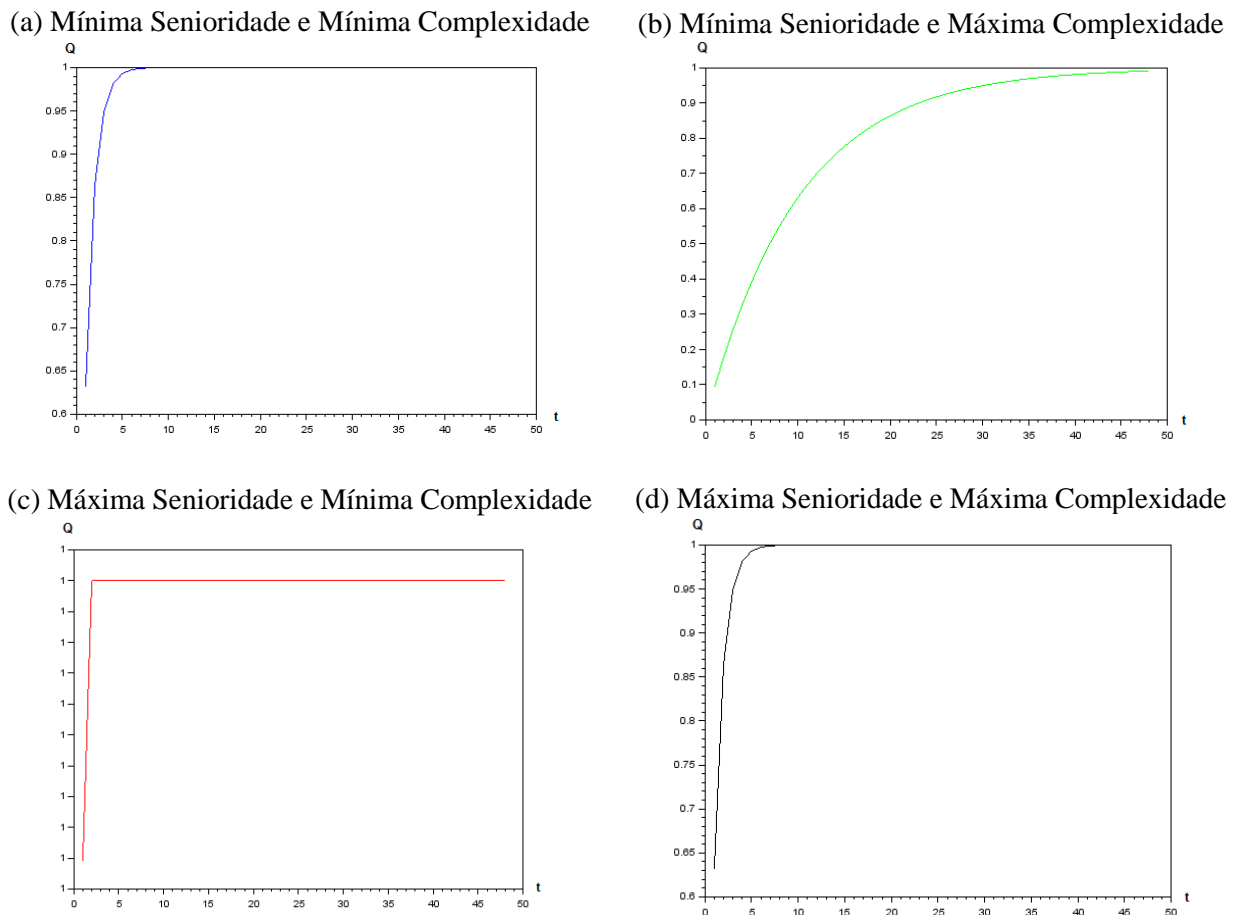


Figura 5.11. Gráfico da qualidade em função do tempo: relações entre Senioridade e Complexidade.

Analisando especificamente a constante $\tau = \frac{C}{S}$, sabemos que quanto menor for o seu valor, mais rapidamente o sistema responderá, alcançando a Qualidade. Para os casos apresentados na Figura 5.11 e de acordo com a resposta do sistema mostrado na Figura 5.9, podemos estimar o tempo gasto na execução do projeto quando este se encontra a 63,2% (τ) e a 99,3% (5τ) do seu tempo de execução.

Tabela 5.1 – Tempo necessário para a execução de projetos.

$\tau = \frac{C}{S}$	63,2% do projeto executado	99,3% do projeto executado
----------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

$\left. \begin{array}{l} S = 1 \\ C = 1 \end{array} \right\} \tau = 1$	$t \cong 1$ mês	$t \cong 5$ meses
$\left. \begin{array}{l} S = 1 \\ C = 10 \end{array} \right\} \tau = 10$	$t \cong 10$ meses	$t \cong 50$ meses
$\left. \begin{array}{l} S = 10 \\ C = 1 \end{array} \right\} \tau = 0,1$	$t \cong 0,1$ mês	$t \cong 0,5$ mês
$\left. \begin{array}{l} S = 10 \\ C = 10 \end{array} \right\} \tau = 1$	$t \cong 1$ mês	$t \cong 5$ meses

Analisando o tempo necessário para se executar os projetos descritos na Tabela 5.1, temos que um projeto com mínima complexidade e máxima senioridade atinge seu padrão de qualidade desejado 100 vezes mais rápido que um projeto com máxima complexidade e mínima senioridade. Nos casos em que o valor da complexidade é igual ao valor da senioridade, o tempo de resposta é o mesmo devido ao valor da constante τ ser o mesmo. Em um projeto com complexidade mínima, o impacto da senioridade é de 1 para 10, ou seja, uma equipe com máxima senioridade tem dez vezes a produtividade de uma equipe com menor senioridade.

6. VALIDAÇÃO DO MODELO DA ETAPA DA FASE DO PROJETO TÉCNICO

Conforme apresentado no Capítulo 1, este trabalho se propôs a construir um modelo de uma das etapas da Fase do Projeto Técnico do Modelo de Referência Mecatrônico para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos. O modelo proposto foi testado em três produtos mecatrônicos da empresa OPTO: Magis II (mínima complexidade), Fotocoagulador a Laser (mediana complexidade) e Retinógrafo (máxima complexidade). Tais produtos tiveram seu ciclo de desenvolvimento concluído e tanto os dados de estrutura de produto quanto os relativos aos tempos de desenvolvimento de cada um foram disponibilizados para a pesquisa.

Inicialmente foi realizada uma análise dos componentes que compõem cada produto, tendo sido classificadas as partes que constituíam sua estrutura de produto em relação à tipologia mecatrônica. Nesta análise foram identificados os elementos da Fase do Projeto Técnico (engenharia básica, sistema de controle, comunicação, eletrônica, projeto micro processado e *software* alto nível) e da Fase de Otimização (alimentação, carenagem e suporte, integração e interface homem-máquina). Foram incorporados os elementos vinculados à fase de otimização porque o produto já havia sido desenvolvido e a estrutura de produção disponibilizada para a pesquisa já incorporava tais elementos os quais, se não classificados implicariam em dificuldade de definição das áreas de projeto para as funções primárias.

Assim, apenas os elementos que compunham o projeto das tecnologias previstas para a Fase do Projeto Técnico foram extratificados e analisados a posteriori. A partir de tal análise foi possível definir a complexidade dos projetos (discutida na seção 2.3) uma vez que esta é dada pelo número de componentes do produto, levando em consideração a identificação da tecnologia que lhe originara. Ou seja, se houver 50 componentes na estrutura de produto que estejam vinculados ao projeto da engenharia básica, tal componente somará complexidade 50 e assim por diante. A complexidade do sistema será dada pela soma da complexidade de cada parte componente do projeto técnico, ou seja, da engenharia relacionada às funções primárias do produto.

Para especificar a senioridade foi utilizado um sistema de pontuação que relaciona a formação e a experiência profissional de cada pessoa (desenvolvedor) que trabalhou no projeto levando em consideração a definição de faixa dinâmica apresentada por Dyer,

Gregersen e Christensen (2011), que sugerem que existe uma diferença considerável entre a média qualidade e a melhor qualidade em função do perfil do profissional alocado a uma equipe de projetos inovadores. Assim, a pontuação máxima de cada indivíduo não ultrapassou 200 pontos considerando os elementos de formação acadêmica e de experiência de trabalho em anos.

A aplicação do valor da senioridade no modelo foi representada pela média aritmética simples da senioridade total. Este cálculo deve-se ao fato de que se tivéssemos, por exemplo, uma equipe com 4 desenvolvedores técnicos e com uma experiência de 1-5 anos e uma outra equipe com apenas um desenvolvedor doutor e com uma experiência de mais de 20 anos, teríamos em ambos, uma senioridade total igual a 200. Desta forma, o cálculo da média aritmética da senioridade mostra-se mais adequado. A Tabela 5.2 apresenta a normalização da senioridade.

Tabela 6.1 – Normalização da Senioridade.

Valor da senioridade	Formação	Valor da senioridade	Experiência
25	Técnico	25	1-5 anos
50	Graduado	50	5-10 anos
75	Mestre	75	10-20 anos
100	Doutor	100	Mais de 20 anos

Tanto os dados de complexidade como os de senioridade foram coletados mediante entrevista com o gerente do escritório de projetos à época do desenvolvimento dos equipamentos aqui pesquisados. Os dados foram solicitados à empresa mediante demanda apresentada à diretoria de pesquisa e desenvolvimento da companhia. Gerentes de projetos analisados foram contatados para validar informações repassadas pelo gerente entrevistado quando considerado necessário.

Após as especificações da valoração da complexidade e da senioridade existente em cada projeto, os valores consolidados de complexidade e senioridade foram calculados e o modelo proposto foi testado. Para finalizar, será feito um comparativo entre os dados obtidos com a aplicação do modelo e as informações sobre o tempo real de desenvolvimento dos projetos, dados esses colhidos também junto ao gerente do escritório de projetos da empresa, unidade em que havia consolidação trimestral dos cronogramas e prazos envolvidos nos projetos da companhia.

6.1 Caracterização da Empresa

A empresa que fabrica os produtos que foram utilizados para validação do modelo, a OPTO Eletrônica S/A, foi fundada em 1985. Sua trajetória teve origem na USP São Carlos, tendo sido constituída por pesquisadores e técnicos do Instituto de Física desta Universidade. Na época de sua inauguração a empresa já trabalhava com áreas importantes no seu portfólio atual como filmes finos especiais e aplicações industriais a laser. Posteriormente destaca-se sua entrada nos mercados de defesa, espacial e médico oftálmico.

Atualmente a empresa conta uma grande equipe de pesquisadores divididos na sede em São Carlos, em um escritório comercial de São Paulo, um escritório em Porto Alegre/RS e um outro em Miami, Estados Unidos. Há representantes na Europa, na Ásia e na Oceania. As unidades de São Carlos e Porto Alegre realizam operações industriais, as demais, apenas vendas e assistência técnica. Apenas em São Carlos há desenvolvimento de produtos.

Devido à origem da empresa e sua vocação para o desenvolvimento de tecnologias e equipamentos ela tem em seu portfólio de produtos:

- Produtos ópticos e industriais: medidor a laser para controle de pneus e multiposicionador laser, refletores odontológicos, filtros, espelhos, prismas, lentes, dentre outros;
- Produtos de defesa e espaço: desenvolvimento, a baixo custo, de *hardwares* e *softwares* que integrem tecnologias ópticas, laser e eletrônica adequadas à área aeroespacial;
- Produtos antirreflexo: tratamentos antirreflexo, antirrisco e hidrorrepelente para lentes de óculos;
- Produtos da área médica: laser para retina, sistema de varredura inteligente para fotocoagulação, sistema de crosslinking para córnea, microscópios, sistema grande angular de não-contato para vitrectomia, lentes para oftalmologia, lâmpada de fenda, sistema para avaliação de acuidade visual.

Os produtos desenvolvidos na empresa são validados por um departamento independente do departamento responsável pelas atividades de desenvolvimento, visando assegurar a qualidade dos projetos. Ensaios baseados em normas nacionais e internacionais são realizados em laboratórios, análises de riscos e “*try-outs*” são conduzidos

sistematicamente, dentre outros métodos utilizados para a validação dos produtos a fim de garantir a qualidade dos produtos desenvolvidos.

A empresa adota estratégias de produção diferentes para suas linhas de produto, segundo a classificação de Pires (1995). Há uma linha de produtos de catálogo disponibilizada para produção e venda. Esses produtos, entretanto, não estão disponíveis em estoque sendo produzidos de acordo com o fechamento de pedidos. Os equipamentos médicos, científicos e fabris são produzidos nessa filosofia que configura sistemas de montagem por encomenda.

Há outra tipologia de produto que é vendido como projeto mediante contatos com os departamentos de marketing e engenharia. É fechada uma proposta de fornecimento e o aparelho passa a ser projetado e posteriormente, prototipado, testado, homologado e entregue ao cliente. Esse tipo de manufatura é caracterizado como engenharia por encomenda.

Há projetos governamentais que podem ser caracterizados como produtos de produção por encomenda, uma vez que, embora o projeto seja financiado pelo contratante, sua entrega não se resume a uma unidade, como no caso dos projetos de engenharia por encomenda. Ao invés disso, o produto é fabricado a pedido do órgão de defesa.

6.2 Descrição dos Produtos e Aplicação do Modelo

A seguir será feita uma breve descrição dos produtos utilizados na validação e na aplicação do modelo.

6.2.1 Magis II – Mínima Complexidade

O produto mecatrônico Magis II, estudado para validar o modelo proposto, é desenvolvido pela empresa OPTO Eletrônica S/A. Este equipamento é um avançado sistema para avaliação da acuidade visual. Ele é composto por um *hardware* nano - designação para placas altamente integradas com diversas funcionalidades preexistentes em um único hardware - e imagens em *full* HD. É um equipamento pequeno e de fácil instalação (necessita apenas de um monitor ou TV com entrada HDMI). Possui ainda um controle remoto, feito por meio de um *air mouse wireless*, de comandos práticos e intuitivos. Pelo controle remoto é possível ter acesso direto a todos os comandos. O *software* traz variados testes e tabelas, com possibilidades de ajustes de distância para teste perto e longe. A Figura 6.1 apresenta o produto Magis estudado.



Figura 6.1. Magis II.

Os componentes que compõem a tipologia mecatrônica do Magis II foram divididos em alimentação, carenagem e suporte, engenharia básica, integração, interface homem-máquina e sistema de controle. No presente trabalho, apenas os projetos que compõem a Etapa 3 da Fase do Projeto Técnico (Fig. 5.4) serão analisados. A Tabela 6.2 especifica o tipo de projeto e sua respectiva complexidade. O Projeto do Produto Magis II durou aproximadamente, 10 meses.

Tabela 6.2 – Componentes do Magis II.

Projeto	Complexidade
Engenharia Básica	16
Sistema de Controle	11
Comunicação	-
Microprocessado	-
Software de Alto-Nível	1
Complexidade Total	28

Para determinar a senioridade dos desenvolvedores do projeto do produto em estudo foram analisadas a formação acadêmica e a experiência profissional das equipes de desenvolvimento dos projetos. A Tabela 6.1 apresenta os valores utilizados para pontuar a senioridade. A Tabela 6.3 apresenta todos os desenvolvedores que participaram do desenvolvimento do projeto do Magis II com suas respectivas formações e experiências. Os nomes foram omitidos por questões de sigilo de informações.

Tabela 6.3 – Senioridades dos Desenvolvedores - Magis II.

Desenvolvedor	Experiência	Formação	Senioridade
A	10-20 anos	Graduado	125
B	10-20 anos	Graduado	125
C	1-5 anos	Técnico	50
Senioridade Total			300

Com o auxílio do *software* Scilab 5.5.2, foi possível construir o gráfico da Figura 6.2.

Para construir este gráfico, o valor de τ , que é dado pela $\frac{C}{S}$, foi dado pelos valores $C = 28$ (obtido na Tabela 6.2) e $S = 100$ (obtido pela média aritmética simples da Senioridade Total – Tabela 6.3). Logo, o valor de $\tau = 0,28$.

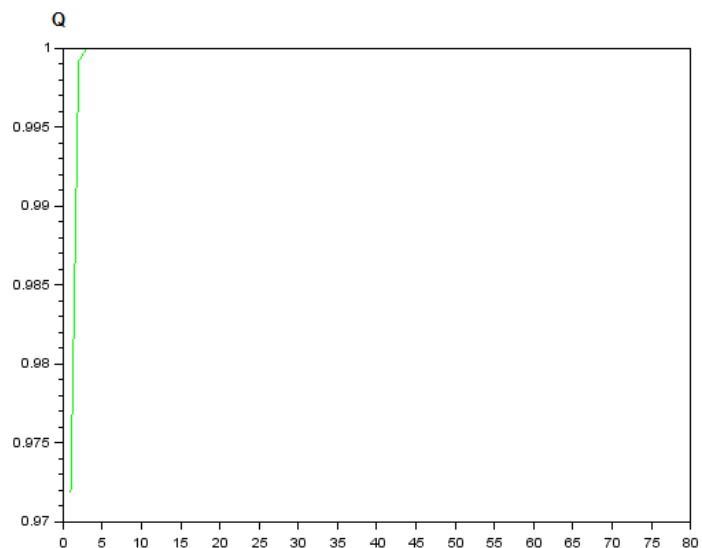


Figura 6.2. Gráfico da qualidade em função do tempo: relações entre Senioridade e Complexidade analisadas no Magis II.

A Tabela 6.4 fornece os resultados do gráfico da qualidade em função do tempo do produto Magis II.

Tabela 6.4 – Resultados qualidade em função do tempo: Magis II.

t (mês)	Q
1	0.97
2	0.99
3	0.99

4	0.99
5	0.99
6	0.99
7	0.99
8	0.99
9	0.99
10	0.99
11	1.00

Analisando o gráfico da Figura 6.2 e as informações contidas na Tabela 6.4, é possível inferir que, o projeto atinge 63,2% de sua execução antes de completar um mês. A execução total do projeto, ou seja, a qualidade de excelência (Q=100%) foi atingida em 11 meses. Visto que o projeto Magis II foi concluído em 10 meses, o erro relativo percentual foi de 10%, indicando que a margem de erro da modelagem para produtos com Mínima complexidade, com resultados muito próximos da realidade apresentada.

Em produtos com Mínima complexidade, como o Magis II, é importante salientar que inicialmente existe um grande salto de qualidade, alcançando patamares de execução bastante elevados nos tempos subsequentes, sendo necessária a utilização de mais casas decimais para determinar as diferenças na execução do projeto e também minimizar a propagação do erro. Nos próximos passos, será verificado o comportamento da modelagem frente a um produto de Média complexidade, o Fotocoagulador a Laser.

6.2.2 Fotocoagulador a Laser: Mitra Yellow Laser – Média Complexidade

O segundo produto analisado foi o produto mecatrônico Mitra Yellow Laser, que é um fotocoagulador a laser, desenvolvido pela empresa OPTO Eletrônica S/A. Este equipamento é utilizado para o tratamento de doenças vasculares da retina, principalmente o diabetes. Outra aplicação deste equipamento consiste na prevenção e tratamento de alguns casos de descolamento de retina. O laser amarelo é menos tóxico para os tecidos oculares e sofre menos espalhamento no trajeto entre a córnea e a retina, resultando em maior precisão quando comparado com produtos similares que utilizam luz laser nas faixas do infra-vermelho e do espectro verde. O disparo é de fácil visualização e a dosagem pode ser facilmente corrigida. O equipamento é apresentado na Figura 6.3.



Figura 6.3. Fotocoagulador a Laser: Mitra Yellow Laser.

O primeiro passo na análise do Fotocoagulador a Laser foi a determinação da tipologia mecatrônica dos elementos que compõem sua estrutura de produto. Neste produto temos elementos de alimentação, engenharia básica, integração, interface homem-máquina, sistema de controle, suporte e carenagem, *software* de alto nível e micro processado. Ainda é possível encontrar componentes do tipo arte, arte final, projeto elétrico, manuais, partes mecânicas de suporte, projeto básico do sistema óptico, produtos químicos e *software* micro-processado. O presente estudo está focado na Etapa 3 da Fase do Projeto Técnico (Fig. 5.4), por isso apenas os projetos de engenharia básica, sistema de controle, comunicação, sistema micro-processado e *software* de alto nível serão analisados. A Tabela 6.5 especifica a quantidade de componentes encontrada em cada tipologia e é calculada sua complexidade. O Projeto do Produto Fotocoagulador a Laser durou aproximadamente, 40 meses.

Tabela 6.5 – Componentes do Fotocoagulador a Laser.

Projeto	Tipo Componente	Complexidade
Engenharia Básica	Arte/Conjunto/Elétrico/ Mecânico/Óptico/Químico	262
Sistema de Controle	Elétrico/Conjunto	183
Comunicação	-	-
Microprocessado	-	71
Software de Alto-Nível	<i>Software</i>	16
Complexidade Total		532

Para determinar a senioridade dos desenvolvedores do projeto do produto em estudo, foram analisadas a formação acadêmica e a experiência profissional. A Tabela 6.1 apresenta os valores utilizados para pontuar a senioridade. A Tabela 6.6 apresenta todos os desenvolvedores que participaram do desenvolvimento dos projetos do Fotocoagulador a Laser com suas respectivas formações e experiências. Os nomes foram omitidos por questões de sigilo de informações.

Tabela 6.6 – Senioridades dos Desenvolvedores – Fotocoagulador a Laser.

Desenvolvedor	Experiência	Formação	Senioridade
A	5-10 anos	Mestre	125
B	1-5 anos	Graduado	75
C	1-5 anos	Graduado	75
D	1-5 anos	Graduado	75
E	1-5 anos	Graduado	75
F	5-10 anos	Técnico	75
Senioridade Total			500

Com o auxílio do *software* Scilab 5.5.2, foi possível construir o gráfico da Figura 6.4.

Para construir este gráfico, o valor de τ , que é dado pela $\frac{C}{S}$, foi dado pelos valores $C = 532$ (obtido na Tabela 6.5) e $S = 83$ (obtido pela média aritmética simples da Senioridade Total – Tabela 6.6). Logo, o valor de $\tau = 6,41$.

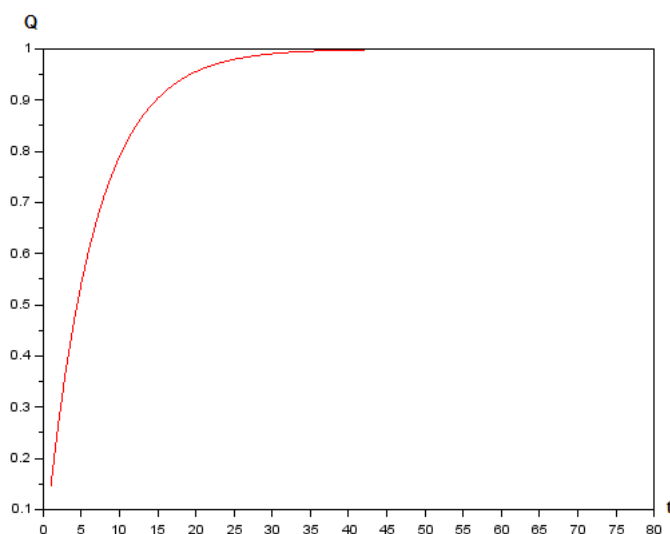


Figura 6.4. Gráfico da qualidade em função do tempo: relações entre Senioridade e Complexidade analisadas no Fotocoagulador a Laser.

A Tabela 6.7 fornece os resultados do gráfico da qualidade em função do tempo do produto Fotocoagulador a Laser.

Tabela 6.7 – Resultados qualidade em função do tempo: Fotocoagulador a Laser.

t (mês)	Q	t (mês)	Q	t (mês)	Q
1	0.14	16	0.92	31	0.99
2	0.27	17	0.93	32	0.99
3	0.37	18	0.94	33	0.99
4	0.46	19	0.95	34	1.00
5	0.54	20	0.96		
6	0.61	21	0.96		
7	0.66	22	0.97		
8	0.71	23	0.97		
9	0.75	24	0.98		
10	0.79	25	0.98		
11	0.82	26	0.98		
12	0.85	27	0.99		
13	0.87	28	0.99		
14	0.89	29	0.99		
15	0.90	30	0.99		

Analisando o gráfico da Figura 6.4 e as informações contidas na Tabela 6.7, é possível inferir que, o projeto atinge 63,2% de sua execução antes de completar sete meses. A execução total do projeto ou seja, a qualidade de excelência (Q=100%) foi atingida em 34 meses. Visto que os projetos foram desenvolvidos em 40 meses, o erro relativo percentual foi de 15%, novamente é possível afirmar que a modelagem realizada apresentou resultados próximos da realidade. A próxima modelagem envolverá um equipamento com máxima complexidade, conforme a amostra aqui utilizada, o Retinógrafo digital.

6.2.3 Retinógrafo Digital: OPTO ADS – Máxima Complexidade

O terceiro produto estudado para validar o modelo proposto foi o produto Retinógrafo Digital, desenvolvido pela empresa pesquisada, e que pertence a família de retinógrafos digitais OPTO ADS. Este equipamento é utilizado por oftalmologistas para tirar fotos da retina possibilitando que o médico visualize nitidamente o fundo do olho, para analisar doenças como Retinopatia Diabética, Hipertensão Arterial, Oclusões Arteriais e Tromboses, Tumores Oculares, dentre outras. O retinógrafo estudado possui óptica embarcada composta por lentes, filtros, refletores e lâmpadas que permitem a perfeita identificação da condição da retina do paciente. A Figura 6.5 apresenta o retinógrafo digital estudado.



Figura 6.5. Retinógrafo Digital OPTO ADS.

Os componentes que compõem a tipologia mecatrônica do Retinógrafo Digital foram divididos em projetos de alimentação, comunicação, projeto eletrônico, engenharia básica, integração, interface homem-máquina, sistema de controle e suporte e carenagem. Dentro de cada projeto é possível encontrar componentes elétricos, eletrônicos, subconjuntos, arte final, peças injetadas, sistemas de comunicação, embalagem, peças mecânicas e ópticas e peças de poliuretano. No presente trabalho, apenas os projetos que compõem a Etapa 3 da Fase do Projeto Técnico (Fig. 5.4) foram analisados. A Tabela 6.8 especifica o tipo de componente encontrado em cada projeto e seu respectivo quantitativo. O Projeto do Produto Retinógrafo Digital durou aproximadamente, 53 meses.

Tabela 6.8 – Componentes do Retinógrafo Digital.

Projeto	Tipo Componente	Complexidade
Engenharia Básica	Comunicação/Conjunto/Elétrico/ Eletrônico/Mecânico/Óptico	601
Sistema de Controle	Mecânico/Elétrico/Eletrônico	240
Comunicação	Elétrico/Eletrônico/Embalagem	9
Microprocessado	-	14
Software de Alto-Nível	-	31
Complexidade Total		895

Para determinar a senioridade dos desenvolvedores do projeto do produto em estudo, foram analisadas a formação acadêmica e a experiência profissional. A Tabela 6.1 apresenta os valores utilizados para pontuar a senioridade. A Tabela 6.9 apresenta todos os desenvolvedores que participaram do desenvolvimento dos projetos do Retinógrafo Digital com suas respectivas formações e experiências. Os nomes foram omitidos por questões de sigilo de informações.

Tabela 6.9 – Senioridades dos Desenvolvedores – Retinógrafo Digital.

Desenvolvedor	Experiência	Formação	Senioridade
A	5-10 anos	Graduado	100
B	1-5 anos	Graduado	75
C	5-10 anos	Mestre	125
D	1-5 anos	Graduado	75
E	1-5 anos	Graduado	75
Senioridade Total			450

Com o auxílio do *software* Scilab 5.5.2, foi possível construir o gráfico da Figura 6.6.

Para construir este gráfico, o valor de τ , que é dado pela $\frac{C}{S}$, foi dado pelos valores

$C = 895$ (obtido na Tabela 6.8) e $S = 90$ (obtido pela média aritmética simples da Senioridade Total – Tabela 6.9). Logo, o valor de $\tau = 9,94$.

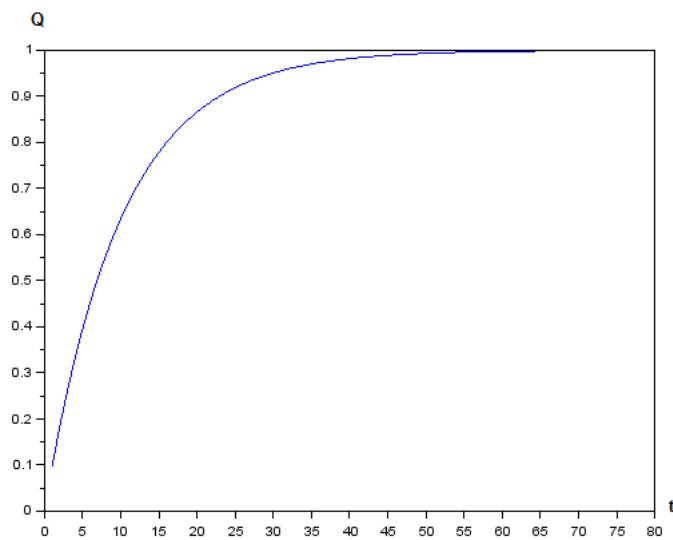


Figura 6.6. Gráfico da qualidade em função do tempo: relações entre Senioridade e Complexidade analisadas no Retinógrafo Digital.

A Tabela 6.10 fornece os resultados do gráfico da qualidade em função do tempo do produto Retinógrafo Digital – OPTO ADS.

Tabela 6.10 – Resultados qualidade em função do tempo: Retinógrafo Digital – OPTO ADS.

t (mês)	Q	t (mês)	Q	t (mês)	Q
1	0.10	21	0.88	41	0.98
2	0.18	22	0.89	42	0.99
3	0.26	23	0.90	43	0.99
4	0.33	24	0.91	44	0.99
5	0.40	25	0.92	45	0.99
6	0.45	26	0.93	46	0.99
7	0.51	27	0.93	47	0.99
8	0.55	28	0.94	48	0.99
9	0.60	29	0.95	49	0.99
10	0.63	30	0.95	50	0.99
11	0.67	31	0.96	51	0.99
12	0.70	32	0.96	52	0.99
13	0.73	33	0.96	53	1.00
14	0.76	34	0.97		
15	0.78	35	0.97		
16	0.80	36	0.97		
17	0.82	37	0.98		
18	0.84	38	0.98		
18	0.85	39	0.98		
20	0.87	40	0.98		

Analisando o gráfico da Figura 6.6 e as informações contidas na Tabela 6.10, é possível inferir que, o projeto atinge 63,2% de sua execução em aproximadamente, dez meses. A execução total do projeto, ou seja, a qualidade de excelência (Q=100%) foi atingida em 53 meses. Visto que os projetos foram desenvolvidos em 53 meses, a exatidão da modelagem com a realidade nos mostra que a aderência do modelo foi alta.

6.3 Considerações sobre a aplicação do modelo

Este capítulo apresentou a aplicação e avaliação do modelo de uma das Etapas da Fase do Projeto Técnico. A fim de verificar a validação do modelo, três produtos foram analisados (contendo Mínima, Média e Máxima complexidades). A Modelagem realizada se mostrou precisa na predição do tempo de desenvolvimento quando o produto apresentou Máxima

complexidade (Retinógrafo Digital: OPTO ADS), obtendo-se 0% de erro relativo percentual em comparação ao valor real. Também foram obtidos excelentes resultados em complexidades Mínima e Média (Magis II e Fotocoagulador a Laser: Mitra Yellow Laser, respectivamente), com erros relativos percentuais de 10% e 15% respectivamente, quando comparados ao valor real.

Para a empresa pesquisada tais resultados significam que em se iniciando um novo projeto de desenvolvimento de produto, mediante um esforço de criação de uma estrutura de produtos próxima ao que se espera do projeto, e utilizando dados dos participantes da equipe do projeto, se torna possível prever com um grau de exatidão na faixa de 0-15% o tempo de execução do projeto. Para tal não é necessário que todo o projeto esteja detalhado, não é necessário que detalhes de design, de etiquetagem, projeto de sistemas de alimentação, elementos de interface etc., estejam desenvolvidos. É necessário apenas que o projeto básico, a solução inventiva para o produto com um detalhamento mínimo da lista de componentes da parte relativa à função primária esteja disponível.

O estudo foi realizado com apenas três produtos desenvolvidos pela empresa OPTO ELETRÔNICA S/A. Em uma situação de uso real da metodologia apresentada, a empresa deveria aplicá-la a todos os projetos já desenvolvidos, o que seria realizado sem muita dificuldade ou esforço uma vez que tanto as estruturas de produto – que são artefatos disponíveis para a produção comercial - como os dados das equipes de desenvolvimento estão disponíveis para os gestores da área. Uma vez tendo parametrizado os elementos de complexidade e senioridade de cada produto, o modelo seria aplicado de forma a compor um quadro com níveis intermediários de complexidade e senioridade, e os tempos decorrentes com suas margens de erro. Tal sistemática certamente seria mais efetiva no planejamento que os métodos tradicionais, ou poderia ainda ser utilizada de forma complementar as redes PERT/CPM ou demais métodos de planejamento de projetos.

7. CONCLUSÕES

O modelo de referência mecatrônico proposto por Barbalho e Rozenfeld (2013) direcionou a identificação de possíveis falhas no processo produtivo das organizações. Nesse sentido, desenvolveu-se um modelo matemático em que foi empregada a metodologia de sistemas dinâmicos. Esse modelo foi aplicado em uma das etapas da fase do projeto técnico no desenvolvimento de um produto mecatrônico, buscando alinhar indicadores de desempenho e promover a melhoria da qualidade das informações disponíveis ao planejamento e as incertezas que afetam o fluxo de produção, obtendo-se assim as diretrizes gerenciais para tomada de decisões.

Muitos projetos do processo de desenvolvimento de produtos apresentam um alto nível de complexidade, o que requer uma alta senioridade para que os projetos sejam desenvolvidos em um menor tempo e com qualidade. Neste sentido, foram identificadas duas variáveis que influenciam no processo de desenvolvimento de produtos: a complexidade (número de componentes que formam o produto, levando em consideração o seu fator tecnológico) e a senioridade (capacidades, conhecimentos e experiências adquiridos pelo profissional).

A modelagem realizada utilizou três variáveis chaves, que são: senioridade, complexidade e tempo. Através da relação entre essas três variáveis foi possível determinar a qualidade de um projeto técnico utilizando o *software* Scilab 5.5.2, através da resolução da Equação 5.4:

$$Q(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.4)$$

Nesta equação (5.4), a qualidade do projeto é definida em função do seu tempo de execução. O tempo (t) é medido em meses e a constante τ é definida por

$$\tau = \frac{C}{S}$$

onde C é a complexidade e S a senioridade.

A validação do modelo matemático proposto foi realizada através da modelagem utilizando a metodologia de sistemas dinâmicos sobre uma das etapas do projeto técnico de três produtos mecatrônicos produzidos pela empresa OPTO ELETRÔNICA S/A, que são o Magis II, um Fotocoagulador a Laser (Mitra Yellow Laser) e um Retinógrafo Digital (OPTO ADS). Estes produtos apresentam Mínima, Média e Máxima complexidade, respectivamente. Esta diferença apresentada entre a complexidade dos produtos possibilitou analisar a resposta do modelo em diferentes cenários.

A Modelagem realizada se mostrou extremamente eficiente quando o produto apresentou Máxima complexidade (Retinógrafo Digital: OPTO ADS), com uma exatidão perfeita, obtendo-se 0% de erro relativo percentual em comparação ao valor real. Também foram obtidos excelentes resultados em complexidades Mínima e Média (Magis II e Fotocoagulador a Laser: Mitra Yellow Laser, respectivamente), com erros relativos percentuais entre 10 e 15% quando comparados ao valor real. A partir da aplicação do modelo é possível inferir que quanto menor for a constante τ (C/S), mais rapidamente o sistema responderá, alcançando a qualidade em um tempo menor.

Quanto mais complexo o equipamento a ser desenvolvido, mais incertezas se preveem quanto ao tempo de desenvolvimento. O risco resultante desse tipo de contexto implica muitas vezes em desistência das organizações no que tange ao investimento em projetos mais complexos que comumente apresentam maior grau de inovação. Nesse sentido, o modelo proposto pode servir para reduzir as incertezas quanto ao prazo, aumentando as chances de investimento das organizações em projetos mais complexos e inovadores.

Esse tipo de solução seria mais aplicável quanto maior fosse o volume de projetos de caráter incremental desenvolvido. Pode-se supor ainda que projetos do tipo plataforma também poderiam ter seus prazos previstos por esse tipo de metodologia de planejamento. Entretanto, projetos do tipo radical ou tecnologias disruptivas envolveriam elementos de inovação que tenderiam a induzir erros na metodologia em função do grau de desconhecimento da equipe acerca da tecnologia empregada. Ou, ainda, em função da própria complexidade do produto por não ser possível captá-la realizando uma simples análise do quantitativo de componentes do produto.

O modelo desenvolvido é de extrema utilidade e aplicação em produtos que tenham componentes similares ou iguais aos componentes dos produtos estudados. A aplicação do modelo em outros produtos como aeronáuticos ou espaciais, que possuem diferentes níveis de complexidade e senioridade poderiam complementar os demais métodos de planejamento de projetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACAR, M.; PARKIN, R. M. Engineering Education for Mechatronics. **IEEE. Transactions on Industrial Electronics**, v. 43, n. 1, p. 106-112, fev. 1996.

ADAMOWSKI, J. C.; FURUKAWA, C. M. Uma abordagem voltada à automação industrial. **Mecatrônica Atual**, n. 1, p. 8-11, out./nov. 2001.

AGGARWAL, R.; REZAEI, Z. Total quality management for bridging the expectations gap in systems development. **International Journal of Project Management**, v. 14, n. 2, p. 115-120, 1996.

AMARAL, A. O. **Desenvolvimento de melhorias para a gestão em projetos usando sistemas dinâmicos e análise do ponto de inflexão**. 2008. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2008a.

AMARAL, A. O. et al. Dinâmica de sistemas na gestão de projetos: aplicação do ponto de inflexão. In: Conferência IADIS Ibero Americana – WWW/Internet2008, 2008, Lisboa. **International Association for Development of the Information Society**. Lisboa, 2008b. p. 514-517.

ANDERSON JR, E. G.; MORRICE, D. J.; LUNDEEN, G. The “physics” of capacity and backlog management in service and custom manufacturing supply chains. **System Dynamics Review**, v. 21, n. 3, p. 217-247, 2005.

BACK, N. et al. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. 1. ed. São Paulo: Manole, 2008. 601 p.

BARBALHO, S. C. M. **Modelo de referência para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos: proposta e aplicações**. 2006. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2006a.

BARBALHO, S. C. M. **Modelo de referência para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos**. Disponível em: <<http://opto.com.br/mrm/>>. Acesso em: 05 outubro 2015b.

BARBALHO, S. C. M.; SILLOS, M. A.; ROZENFELD, H. **Proposta, aplicação e resultados do Modelo de Referência Mecatrônico (MRM)**. 2011. 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto – CBGDP, Porto Alegre, RS, 2011.

BARBALHO, S. C. M.; ROZENFELD, H. Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produtos mecatrônicos (MRM): validação e resultados de uso. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 20, n. 1, p. 162-179, 2013.

BARNEY, J. B. **Gaining and sustaining competitive advantage**. Reading: Addison-Wesley, 1996.

BERNARDI, M. et al. New approaches for developing mechatronical products in multidisciplinary teamwork. In: CIRP-INTERNATIONAL SEMINAR ON MANUFACTURING SYSTEMS, 35, 2002, Seoul. **Anal. of The 35th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems**. Seoul: CIRP, 2002.

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. A Produção Científica nos Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: Um Levantamento de Métodos e Tipos de Pesquisa. **Produção**, ABEPRO, Rio de Janeiro, v. 9, n. 2, p. 65-76, 2000.

BERTRAND, J. M.; FRANSOO, J. C. Operations Management Ressearch Methodologies Using Quantitative Modelling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BOLTON, W. **Engenharia de Controle**. São Paulo: Makron Books, 1995. 497 p.

BOMTEMPO, J. V.; JÚNIOR, H. Q. P.; JÚNIOR, A. M. A indústria do petróleo como uma organização complexa: modelagem de negócios e processo decisório. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 8-32, jan./abr. 2007.

BORSHCHEV, A.; FILIPPOV, A. From Systems Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling. **The 22nd International Conference of the System Dynamics Society**. Oxford: July 25-29, 2004.

BRADLEY, D. A. et al. **Mechatronics**: electronics in products and processes. London, United Kingdom: Chapman and Hall, 1991.

BRUSSEL, H. M. J. V. Mechatronics - A Powerful Concurrent Engineering Framework. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 1, n. 2, p. 127-136, June 1996.

BUBENKO JR.; J. A.; STIRNA, J.; BRASH, D. **EKD User Guide**, Dpt of computer and systems sciences. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1998.

BUUR, J. **Mechatronics design in Japan**. Institute for Engineering Design, Technical University of Denmark, 1989.

CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. **Product Development Performance: strategy, organization and management in the world auto industry**. Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts, 1991.

CLIFT, T.B.; VANDENBOSCH, M. B. Project complexity and efforts to reduce product development cycle time. **Journal of Business Research**, 45, p. 187-198, 1999.

COELHO, L. C.; FOLLMANN, N.; RODRIGUEZ, C. M. T. O impacto do compartilhamento de informações na redução do efeito chicote na cadeia de abastecimento. **Gestão de Produção**, São Carlos, v. 16, n. 4, p. 571-583, out./dez. 2009.

COOPER, R. G.; EDGETT, S. J.; KLEINSCHMIDT, E. J. **Portfolio Management for New Products**. 2. ed. Cambridge: Perseus Publishing, 1998.

COOPER, R. G. **Winning at new products** - Accelerating the process from idea to launch. 3. ed. Cambridge: Perseus Publishing, 2001. 416 p.

DAVILA, T. An empirical study on the drivers of management control systems design in new product development. **Accounting, Organizations and Society**, 25, p. 383-409, 2000.

DENKER, S.; STEWARD, D. V.; BROWNING, T. R. Planning concurrency and managing iteration in projects. **Project Management Journal**, v. 32, n. 3, p. 31-38, 2001.

DOMINGOS, J. C.; POLITANO, P. R.; PEREIRA, N. A. Modelo de dinâmica de Sistemas para o processo de S&OP ampliado. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 22, n. 4, p. 755-788, 2015.

DORF, R.; BISHOP, R. **Sistemas de Controle Moderno**. Tradução Bernardo Severo da Silva Filho. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

DYER, J.; GREGERSEN, H.; CHRISTENSEN, C.M. **DNA do inovador**. Dominando as 5 habilidades dos inovadores de ruptura. HSM editora, 2011, 336p.

DYSON, B.; CHANG, N. B. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. **Waste Management**, 25, p. 669-679, 2005.

ENGWALL, M.; KLING, R.; WERR, A. Models in Action: How Management Models Are Interpreted in New Product Development. **R&D Management**, v. 35, n. 4, p. 427-439, 2005.

FERNANDES, M. G. F. **Simulação de estratégias de reposição de estoques em uma cadeia de suprimentos com dois estágios**. 2007. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Produção, São Paulo, 2007.

FIGUEIREDO, P. S.; LOIOLA, E. On Retaining Extreme Value Outcomes in an Aging Chain. **XXXV Encontro da ANPAD**. Rio de Janeiro: set. 2011a.

FIGUEIREDO, P. S.; LOIOLA, E. A coflow structure to screen projects in a product pipeline. **XXXV Encontro da ANPAD**. Rio de Janeiro: set. 2011b.

FIGUEIREDO, P. S.; LOIOLA, E. Enhancing New Product Development (NPD) Portfolio Performance by Shaping the Development Funnel. **Journal of Technology Management & Innovation**, v. 7, n. 4, p. 20-35, 2012.

FIGUEIREDO, P. S.; LOIOLA, E. Screening items in an aging chain with a co-flow structure: an application to the product pipeline management problem. **Revista de Administração e Inovação**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 97-114, jan./mar. 2014.

FORD, D. N.; STERMAN, J. D. Dynamic modeling of product development process. **System Dynamics Review**, v. 14, n. 1, p. 31-68, Spring, 1998.

FORD, D. N.; STERMAN, J. D. Overcoming the 90% syndrome: iteration management in concurrent development projects. **Concurrent Engineering: Research and Applications**, v. 11, n. 3, Sept. 2003.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. The M.I.T. Press: Cambridge, 1961.

FORRESTER, J. W. System dynamics, systems thinking, and soft OR. **System Dynamics Review**, v. 10, n. 2 - 3, p. 245 - 256, Summer-Fall, 1994.

FORRESTER, J. W. System dynamics – a personal view of the first fifty years. **System Dynamics Review**, v. 23, n. 2/3, Summer/Fall 2007.

GRIFFIN, A. The effect of project and process characteristics on product development cycle time. **Journal of Marketing Research**, v. XXXIV, v. 34, n. 1, p. 24–35, Feb. 1997.

HÖHNE, G. Projeto de componentes mecânicos para produtos mecatrônicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS, 3, Florianópolis. **Anais do III Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. INSTITUTO DE GESTÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS, Florianópolis/SC, 2001, 1 CD-ROM.

HORIKAWA, O. **Características de projeto de sistemas mecatrônicos**. 2000. Tese (Livre Docência em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ISERMANN, R. Mechatronic systems-innovative products with embedded control. **Control Engineering Practice**, v. 16, p. 14-29, 2007.

KASPEREK, D.; MAURER, M. Coupling structural complexity management and system dynamics to represent the dynamic behavior of product development process. **IEEE**, 2013.

KASPEREK, D. et al. Method for Impact Analysis of Cyclic Changes within Innovation Processes of PSS. Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems. **Procedia CIRP**, 16, p. 205-210, 2014.

KIM, J.; WILEMON, D. Sources and assessment of complexity in NPD projects. **R&D Management**, v. 33, n. 1, p. 15-30, 2003.

KLEIN, M. Integrated Coordination in cooperative design. **International Journal of Production and Economics**, v. 38, p. 85-102, 1995.

KOTONYA, G.; SOMMERVILLE, L. Requirements engineering with viewpoints. **Software Engineering Journal**, v. 11, n. 1, p. 5-18, Jan. 1996.

KRISHNAN, V.; ULRICH, K. T. Product Development Decisions: a Review of the Literature. **Management Science**, v. 47, n. 1, p. 1-21, Jan. 2001.

LARSON, E. W.; GOBELI, D. H. Significance of project management structure on development success. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 36, n. 2, p. 119-125, May 1989.

LE, H. N.; WYNN, D. C.; CLARKSON, P. J. Re-designing process architecture by transforming task network models into system dynamics models. **International Design Conference - Design 2010**. Dubrovnik - Croatia, May 2010.

MACHADO, M. C.; TOLEDO, N. N.; Gozzi, S. A formal product development process: which is its importance for the information flow? **Revista Gestão Industrial**, v. 3, n. 3, p. 46-64, 2007.

MARUJO, L. G. Rework impacts evaluation through system dynamics approach in overlapped product development schedule. **Journal of Technology, Management & Innovation**, v. 4, n. 2, 2009.

MAXIMIANO, A. C. A. **Introdução à Administração**. 7ª ed. rev. São Paulo: Atlas, 2008.

MAXIMIANO, A. C. A. **Teoria Geral da Administração - Da Revolução Urbana à Revolução Digital**. São Paulo: Atlas, 2012.

MCCARTHY, I. P. et al. New Product Development as a Complex Adaptive System of Decisions. **Journal of Product and Innovation Management**, v. 23, p. 437-456, 2006.

MEYER, M.H.; UTTERBACK, J. M. Product development cycle time and commercial success. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 42, n. 4, p. 297–304, Nov. 1995.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**, Paulo A. C. Miguel (ed). Rio de Janeiro: Editora Campus/Elsevier, 2010. p. 165-194.

MÜLLER, R.; GLÜCKLER, J.; AUBRY, M. A relational typology of Project management offices. **Project Management Journal**, v. 44, n. 1, p. 59-76, Feb. 2013.

MUNDIM, A. P. F. et al. Aplicando o cenário de desenvolvimento de produtos em um caso prático de capacitação profissional. **Gestão e Produção**, v. 9, n. 1, p. 1-16, abr. 2002.

MURMANN, P. A. Expected development time reductions in the German mechanical engineering industry. **Journal of Product Innovation Management**, v. 11, n. 3, p. 236–252, 1994.

NOVAK, S.; EPPINGER, S. D. Sourcing by design: product complexity and the supply chain. **Management Science**, v. 47, n. 1, p. 189–204, 2001.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 2011.

OGUNLANA, S. et al. Factors and procedures used in matching project managers to construction projects in Bangkok. **International Journal of Project Management**, v. 20, n.1, p. 385–400, 2002.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos, Métodos e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 412 p.

PAPERT, S. **Mindstorms**. New York: Basic Books, 1980.

PARRY, S. B. The Quest for Competences. **Training**, v. 33, n. 7, p. 48-54, July 1996.

PAULA, J. O.; MELLO, C. H. P. Seleção de um modelo de referência de PDP para uma empresa de autopeças através de um método de auxílio à decisão por múltiplos critérios. **Produção**, v. 23, n. 1, p. 144-156, jan./mar. 2013.

PHENG, L.S.; CHUAN, Q.T. Environmental factors and work performance of Project managers in the construction industry. **International Journal of Project Management**, v. 24, p. 24–37, 2006.

PIDD, M. **Modelagem empresarial**. Ferramentas para tomada de decisão. Porto Alegre: Bookman Companhia, 1998. Reimpressão, 2001.

PIRES, S. R. I. **Gestão estratégica da produção**. Piracicaba/SP: Unimep, 1995.

PRAHALAD, C. K.; HAMEL, G. The core competence of the corporation. In: **Havard Business Review**. p. 79-91, May/June 1990.

PMI (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE). **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos** (Guia PMBOK). 5ª Ed. USA: PMI, 2013.

RESENDE, E. **O Livro das Competências** - Desenvolvimento das Competências: a Melhor Auto-Ajuda para Pessoas, Organizações e Sociedade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2000.

RIETDIJK, J. A. Ten propositions on mechatronics. **Mechatronics in Products and Manufacturing Conference**. Lancaster University, UK, Sept. 1989.

ROBERTS, N. et al. **Introduction to Computer Simulation: The System Dynamics Approach**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1983. p. 562.

RODRIGUES, A.; BOWERS, J. The role of system dynamics in project management. **International Journal of Project Management**, v. 14, n. 4, p. 213-220, 1996.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. São Paulo/SP: Editora Saraiva, 2006.

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. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Produção, São Carlos, 2013.

SAGAWA, J. K.; NAGANO, M. S. Modeling the dynamics of a multi-product manufacturing system: A real case application. **European Journal of Operational Research**, v. 244(2), i. 2, p. 624-636, July 2015.

SAGAWA, J. K.; NAGANO, M. S. Modeling the dynamics of a multi-product manufacturing system: A real case application. **European Journal of Operational Research**, p. 624-636, 2015.

SALMINEN, V. Ten Years of Mechatronics Research and Industrial Applications in Finland. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 1, n. 2, p. 103-105, June 1996.

SBRAGIA, R. The interface between Project and Functional Managers in Matrix Organized New Product Development Projects. In: The Ninth International Conference on Management of Technology - IAMOT, 2000, Miami. **The Ninth International Conference on Management of Technology -IAMOT, 2000**.

SCHÖN, D. A. **The reflective practitioner**: how professionals think in action. New York: Basic Books, 1983.

SCHWEITZER, G. Mechatronics for the design of human-oriented machines. **Transactions on Mechatronics**, v. 1, n. 2, June 1996.

SINGH, R.; KEIL, M.; KASI, V. Identifying and overcoming the challenges of implementing a Project management Office. **European Journal of Information Systems**, v. 18, p. 409-427, 2009.

SPERANZA NETO, M.; SILVA, F. R. **Modelagem e análise de sistemas dinâmicos**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2005.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics**: System Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin: McGraw-Hill, 2000.

TATIKONDA, M. V.; ROSENTHAL, S. R. Technology novelty, project complexity, and product development project execution success: a deeper look at task uncertainty in product innovation. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 47, n. 1, p. 74–87, Feb. 2000.

TIGRE, P. B. **Gestão da inovação**: A economia da tecnologia no Brasil. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006. v. 1. p. 282.

TOMATIS, N. et al. A Complex Mechatronic System: from Design to Application. **IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings**, p. 278-283, 8-12 Jul. 2001.

ULRICH, K.; EPPINGER, S. **Product Design and Development**. New York: Irwin, 2000.

WALTERS, R. M.; BRADLEY, D. A.; DOREY, A. P. A conceptual study for a computer-based tool to support electronics design in a mechatronic environment. **Microprocessors and Microsystems**, v. 24, p. 51–61, 2000.

WHEELWRIGHT, S. C.; CLARK, K. B. **Revolutionizing Product Development**: quantum leaps in speed, efficiency, and quality. New York : The Free Press, 1992.

WYSOCKI, R.; MCGARY, R. **Effective Project Management**: traditional, adaptive, extreme. Wiley Publishing: Indiana, 2003.