



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA DE PROJETO APLICADA À CONCEPÇÃO**  
**DE SISTEMAS MECATRÔNICOS A PARTIR DA**  
**ELABORAÇÃO DE UM MODELO PRESCRITIVO DE**  
**DESENVOLVIMENTO**

**Autor: Jean Carlos Pereira**  
**Orientador: Prof. Dr. Eduardo José Lima II**

Belo Horizonte, 12 de julho de 2016

**Autor: Jean Carlos Pereira**

**METODOLOGIA DE PROJETO APLICADA À CONCEPÇÃO  
DE SISTEMAS MECATRÔNICOS A PARTIR DA  
ELABORAÇÃO DE UM MODELO PRESCRITIVO DE  
DESENVOLVIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Eduardo José Lima II

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2016

P436m

Pereira, Jean Carlos.

Metodologia de projeto aplicada à concepção de sistemas mecatrônicos a partir da elaboração de um modelo prescritivo de desenvolvimento [manuscrito] / Jean Carlos Pereira. – 2016.  
94 f., enc.: il.

Orientador: Eduardo José Lima II.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 89-94.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Mecatrônica - Teses. 3. Projetos mecânicos - Teses. 4. Projetos - Metodologia - Teses. I. Lima II, Eduardo José. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte –  
MG Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax: +55 31 3443-3783  
www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**METODOLOGIA DE PROJETO APLICADA À CONCEPÇÃO  
DE SISTEMAS MECATRÔNICOS A PARTIR DA  
ELABORAÇÃO DE UM MODELO PRESCRITIVO DE  
DESENVOLVIMENTO**

**JEAN CARLOS PEREIRA**

Dissertação defendida e aprovada em 12 de julho de 2016 pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Projeto Mecânico"

---

**Prof. Eduardo Jose Lima II**

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

---

**Prof. Danilo Amaral**

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

---

**Prof. Luiz Cláudio Oliveira**

Centro Federal de Educação Tecnológica de MG/CEFET

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me guiado ao longo do mestrado, me iluminando nos momentos mais difíceis e concedendo tantas graças.

À minha esposa Júlia que sempre esteve ao meu lado e sempre confiou em meu potencial, dando força nos momentos mais difíceis. Te amo.

Aos meus pais, Jorge e Marília, por nunca medirem esforços para me educar, incentivando, aconselhando e orgulhosos com as minhas vitórias. Amo vocês.

Aos meus irmãos, Michelly e Diego, pelo companheirismo, amizade, carinho e por sempre torcerem por mim. Amo vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo José Lima II por ter me dado a oportunidade de desenvolver este trabalho e por ter me conduzido nos caminhos da pesquisa com paciência e maestria.

Ao Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício e Prof. Dr. Valter Júnior de Souza Leite pelo apoio, amizade, orientação profissional e por sempre acreditar em meu trabalho.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Mecatrônica do CEFET-MG pela torcida, amizade e incentivo.

À empresa ASK do Brasil que, principalmente no início do trabalho, incentivou e foi favorável à minha capacitação. Em especial aos colegas da engenharia: Felipe Costa Cardoso, Leonardo Antunes, Leonardo Campos, Junio Oliveira e Giordano Rocchetti.

A todos os docentes do Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica da UFMG pelos ensinamentos que contribuíram muito para minha formação acadêmica.

Ao CEFET-MG pelo apoio e incentivo.

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação (LRSS) pela disponibilização da estrutura física para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos demais familiares, amigos e professores que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

*"A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo"*

Albert Einstein

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABELAS E QUADROS .....	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	12
RESUMO .....	13
ABSTRACT .....	14
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1 Mecatrônica .....	20
2.1.1 O que é mecatrônica .....	20
2.1.2 Sistemas mecatrônicos.....	25
2.2 Metodologia de projeto.....	27
2.2.1 Ferramentas de auxílio ao processo de projeto.....	34
2.2.2 Metodologia de projeto mecânico .....	37
2.2.3 Metodologia de projeto de <i>hardware/software</i> .....	40
2.2.3 Metodologia de projeto de sistemas de controle .....	46
2.3 Metodologia de gerenciamento de projetos.....	49
2.3.1 PMBOK.....	51
2.3.2 PRINCE2® .....	53
2.3.3 Gerenciamento ágil de projetos - Método SCRUM .....	56
2.4 Processo de desenvolvimento de produtos (PDP) .....	59
2.4.1 Definições do PDP .....	59
2.4.2 Modelos PDP.....	61
2.4.2.1 Modelo proposto por Prasad (1996) .....	61
2.4.2.2 Modelo proposto por Rozenfeld et al. (2006).....	62
2.4.2.3 Modelo proposto por Back et al. (2008).....	64
2.4.2.4 Modelo Axiomático proposto por Suh (1990).....	64
2.5 Modelos de desenvolvimento de sistemas mecatrônicos .....	65
2.5.1 Modelo V .....	66
2.5.2 Modelo Hierárquico.....	68
2.5.3 Modelo 3-Ciclos .....	69
3 METODOLOGIA.....	72

3.1 Classificação da pesquisa .....	72
3.2 Estratégia de pesquisa bibliográfica .....	72
4 RESULTADOS .....	74
4.1 Modelo X para projeto de sistemas mecatrônicos .....	74
4.2 Descrição das fases do Modelo X.....	75
4.2.1 Estudo de Projeto – Fase I.....	76
4.2.2 Projeto Conceitual – Fase II .....	77
4.2.3 Desenvolvimento Simultâneo do Projeto – Fase III.....	79
4.2.4 Modelagem e Simulação Final – Fase IV.....	82
4.2.5 Prototipação e Realização de Testes – Fase V .....	83
4.2.6 Finalização do Projeto – Fase VI.....	84
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	85
6 CONCLUSÕES .....	88
REFERÊNCIAS .....	90

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Ilustração dos diferentes pontos de vista envolvidos no desenvolvimento de um produto mecatrônico (Fonte: TÖRNGREN et al, 2014 - adaptado).....	16
FIGURA 2.1 Diagrama ilustrativo da integração das áreas que compõem o conceito de mecatrônica.....	21
FIGURA 2.2 Projetos mecânicos convencionais passivo (a), ativo (b) e mecatrônicos (c) (Fonte: HORIKAWA, 2000).....	22
FIGURA 2.3 Exemplo de sistema mecânico ativo (Fonte: ROSÁRIO, 2005). ....	23
FIGURA 2.4 Exemplos de sistemas mecatrônicos (Fonte: Isermann, 2008).....	26
FIGURA 2.5 Processo de projeto ideal no âmbito do conhecimento humano (Fonte: Tomiyama, Gu, et al., 2009 - adaptado). ....	29
FIGURA 2.6 Fluxograma de projeto proposto por Asimov (1968) .....	31
FIGURA 2.7 Guia VDI 2222 – Fonte: Birkhofer e Jansch (2006).....	39
FIGURA 2.8 Guia VDI 2221 – Fonte: Birkhofer e Jansch (2006).....	40
FIGURA 2.9 Histórico das metodologias de projeto de HW/SW – Fonte: Gajski et al. (2003) .....	41
FIGURA 2.10 Diagrama Y proposto por Gajski e Kuhn (1983) – Fonte: Fernandes (2009) .	43
FIGURA 2.11 Método em Cascata ou “waterfall” proposto por Royce (1970).....	44
FIGURA 2.12 O <i>Vorgehensmodell</i> <sup>2</sup> (ou Modelo em “V”) proposto por Broehl e Droeschel (1995). ....	45
FIGURA 2.13 Representação do modelo Espiral proposto por Boehm (1986) .....	46
FIGURA 2.14 Metodologia de projeto de sistemas de controle proposto por Dorf e Bishop (2009). ....	47
FIGURA 2.15 As três funções da gestão de projetos – Fonte: Verzuh (2000) .....	51
FIGURA 2.16 Estrutura do método PRINCE2® – Fonte: Carvalho (2015).....	56
FIGURA 2.17 Relação entre a plataforma de gerenciamento de projeto tradicional e ágil – Fonte: Chin (2004) .....	57
FIGURA 2.18 Ilustração do método SCRUM – Fonte: Schwaber (2004) (adaptado).....	58
FIGURA 2.19 Modelo PDP proposto por Prasad (1996) – Fonte: Prasad (1996) .....	62
FIGURA 2.20 Modelo PDP proposto por Rozenfeld et al. (2006) – Fonte: Rozenfeld et al. (2006) .....	63
FIGURA 2.21 Modelo Axiomático– Fonte: Hehenberger, F., et al. (2010), adaptado.....	65

FIGURA 2.22 Modelo V proposto por VDI 2206 – Fonte: Vasic e Lazarevic (2008), adaptado. .....	67
FIGURA 2.23 Modelo Hierárquico– Fonte: Hehenberger et al. (2010), adaptado. ....	69
FIGURA 2.24 Modelo 3-Ciclos – Fonte: Gausemeier et al. (2011), adaptado. ....	70
FIGURA 2.25 Modelo de projeto genérico integrativo – Fonte: Gausemeier et al. (2011), adaptado. ....	71
FIGURA 3.1 Metodologia de pesquisa. ....	73
FIGURA 4.1 Ilustração do Modelo X para desenvolvimento de sistemas mecatrônicos. ....	75
FIGURA 4.2 Níveis de complexidade das soluções. ....	78
FIGURA 4.3 Estrutura de desenvolvimento simultâneo. ....	80

## **LISTA DE TABELAS E QUADROS**

TABELA 2.1 Classificação para os modelos de projeto .....	31
TABELA 2.2 Modelos de projeto descritivos .....	32
TABELA 2.3 Modelos de projeto prescritivos .....	33
TABELA 5.1 Quadro comparativo entre o modelo proposto e os modelos existentes na literatura .....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
DFX	<i>Design for X</i>
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
PRINCE	<i>Projects in controlled environments</i>
PRINCE2	<i>Projects in controlled environments 2</i>
ACCT	<i>Agência de Computação Central e Telecomunicações</i>
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
DTM	<i>Design and Theory Methodology</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
IHM	Interface Homem Máquina

## RESUMO

Em parte dos centros de engenharia integrada, os profissionais geralmente não se preocupam com o processo de projeto de seus sistemas e com as consequentes estratégias de desenvolvimento. Eles se concentram, na maioria das vezes, apenas nos aspectos técnicos, científicos e tecnológicos das soluções dos problemas que lhes são apresentados. Entretanto, a crescente necessidade por resultados de melhor qualidade e custo-benefício, que estão cada vez mais complexos e multidisciplinares, tem motivado a alteração dessa tradicional tratativa. No âmbito da mecatrônica, o cenário é ainda mais agravante. O sucesso nos resultados é extremamente dependente do modo de como foi conduzido o projeto, principalmente, no aspecto sinérgico entre seus domínios. Contudo, devido ao baixo entendimento de como as áreas, subsistemas e componentes se relacionam, se interagem e se comunicam durante as fases de desenvolvimento, a maior parte dos projetos mecatrônicos seguem a abordagem sequencial. Nesse modo de pensamento, as partes são idealizadas separadamente e, ao final, são apenas unidas. Porém, os projetos que são conduzidos dessa maneira, muita das vezes, possuem desempenho limitado ou até ineficiente. Diante disso, o presente trabalho propõe uma metodologia de projeto aplicada à concepção de sistemas mecatrônicos a partir da elaboração de um modelo prescritivo de desenvolvimento. O Modelo X proposto prescreve estágios estruturados, os quais mapeiam os caminhos a serem percorridos pela equipe de projeto, com o objetivo minimizar os problemas acima citados e alcançar os principais requisitos e funções do sistema de forma eficiente e otimizada. Diante disso, o autor espera que a presente dissertação seja fonte de informação para auxiliar profissionais e estudantes de engenharia no desenvolvimento de sistemas mecatrônicos e também lhes despertar o interesse pela área de metodologia de projeto.

**Palavras Chaves:** Sistemas Mecatrônicos, Metodologia de Projeto, Modelo X

## **ABSTRACT**

In part of the integrated engineering centers, professionals usually do not care about the design process of their systems and its consequent development strategies. They focus, most of the time, only on the technical, scientific and technological solutions to the problems presented to them. However, the growing need for better quality results and cost-effectiveness, which are increasingly complex and multidisciplinary, has motivated the change of that way of thinking. In the context of mechatronics, the scenario is even more aggravating. For successful results, it is extremely necessary to evaluate how the project was conducted, mainly in the synergetic aspect of their domains. Nevertheless, due to the low understanding of how the areas, subsystems, and components are related, during the phases of development, most of the mechatronic projects follow the sequential approach. In that manner, the parties are idealized separately and at the end, are just joined. However, projects that are conducted in this way, much of the time, have limited or even inefficient performance. Therefore, the present work proposes a design methodology for mechatronic systems from a prescriptive model of development. The X Model proposed prescribes structured stages, which map the paths to be followed by the project team, in order to minimize the problems mentioned above and reach the main system requirements and functions efficiently and optimally. Thus, the author hopes that the present dissertation can be used as a source of information to assist professionals and engineering students in the development of mechatronic systems and awaken their interest in the design methodology area.

**Keywords:** Mechatronic systems, Design methodology, X Model

## 1 INTRODUÇÃO

Nos mercados atuais, a competição no desempenho e qualidade dos produtos tem se tornado o principal fator que as companhias enfrentam. Estas pressões são responsáveis pelo avanço tecnológico para fornecer sistemas que apresentem alto desempenho, baixo custo e respeito aos requisitos de projeto, (BARBERI, FANTUZZI e BORSARI, 2014). Nas últimas décadas, houve um aumento considerável da complexidade dos produtos industriais, com funcionalidades cada vez mais exigentes como, por exemplo, melhor interoperabilidade, precisão, confiabilidade, repetibilidade, eficiência energética, inteligência e autonomia. Novas funcionalidades são alcançadas por meio da interconexão e interação ‘sinérgica entre componentes de diferentes áreas, (MHENNI, CHOLEY, *et al.*, 2014).

Nesse cenário, houve o nascimento do conceito de sistemas mecatrônicos que significa interação sinérgica entre engenharia mecânica, eletrônica e controle inteligente computacional no projeto e manufatura de produtos e processos industriais, (HARASHIMA, TOMIZUKA e FUKUDA, 1996). Tais sistemas são caracterizados pelos seus aspectos multidisciplinares e são equipados com vários componentes como sensores, dispositivos eletrônicos, atuadores e estruturas mecânicas. Os mesmos interagem entre si com o objetivo de desempenhar as funções gerais requeridas e aplicar novos controles para extrair novos níveis de desempenho dos sistemas mecânicos. Assim, o projeto bem-sucedido pode ser alcançado apenas se o sistema como um todo for considerado e se as interações entre os componentes forem completamente entendidas e planejadas, (MHENNI, CHOLEY, *et al.*, 2014).

Nesse contexto, pode-se dizer que projetos mecatrônicos estão dentro do conceito de Engenharia Simultânea (*Concurrent Engineering*) que é uma abordagem da área de desenvolvimento de produto em que o projeto, manufatura e seus desdobramentos (no caso de produtos mecatrônicos, por exemplo, seriam os grupos especializados de cada área) estejam integrados de um modo especial. É a ideia que as pessoas podem fazer um melhor trabalho se elas cooperarem entre si para alcançarem um objetivo comum. Além disso, tal conceito é influenciado pelo reconhecimento de que a maior parte dos custos da manufatura são definidos e decididos na fase do projeto do produto, (SHETTY e KOLK, 2011).

Os produtos mecatrônicos desempenham um número muito maior de funções do que um produto mecânico tradicional. Diante disso, engenhar tais produtos eficientemente tem se tornado um grande desafio, pois cada função pode ser realizada como uma combinação complexa de vários domínios do conhecimento (QAMAR, WIKANDER e DURING, 2015).

Dessa forma, os tradicionais problemas multidisciplinares industriais tornaram-se mais complexos, extensos e profundos, (SALEN e MAHFOUZ, 2013).

A completa interação entre os desenvolvedores de produto mecatrônicos, pertencentes a diferentes áreas, é impedida pelo entendimento insuficiente entre os assuntos envolvidos e pela falta de plataformas comuns para modelagem e simulação de sistemas complexos, (HEHENBERGER, 2014). Além disso, envolvem múltiplos *stakeholders* (partes interessadas) de projeto, que possuem diferentes, porém, relacionados, pontos de vista. Portanto, utilizam distintas concepções, informações de produto e ferramentas para lidarem com suas preocupações de interesse, conforme ilustrado na FIG 1.1. Exemplos de pontos de vista típicos incluem projeto mecânico, de controle e de *software* e análise de segurança (TÖRNGREN, QAMAR, *et al.*, 2014).

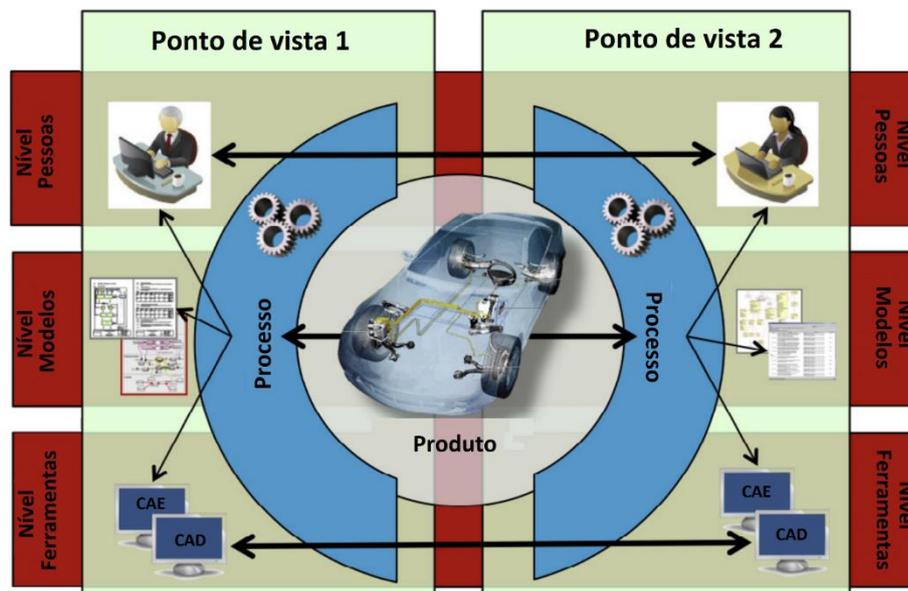


FIGURA 1.1 Ilustração dos diferentes pontos de vista envolvidos no desenvolvimento de um produto mecatrônico (Fonte: TÖRNGREN *et al.*, 2014 - adaptado).

Para que o desenvolvimento eficiente ocorra é necessário lidar com as relações intrínsecas entre os pontos de vista, no nível de pessoas, modelos e ferramentas. Conseqüentemente, são necessárias formas efetivas de comunicação e cooperação entre os diferentes grupos especializados ao longo do processo de desenvolvimento de produto, de forma a permitir a avaliação do impacto das mudanças de projeto e assegurar a eficiência geral da Engenharia Simultânea, (GAUSEMEIER, DUMITRESCU, *et al.*, 2011). A dificuldade de encontrar a solução multidisciplinar adequada ou ótima é intensificada porque as conseqüências das decisões de projeto e os efeitos das mudanças introduzidas nos diferentes domínios não são

avaliados pelos modelos, métodos e ferramentas disponíveis atualmente, (QAMAR, WIKANDER e DURING, 2015). Relativamente pouca atenção é dada em como projetar de forma integrada os produtos mecatrônicos baseado em uma metodologia sistemática de projeto, (WANG, YU, *et al.*, 2013).

As convencionais e estabelecidas metodologias de projeto, por exemplo, Pahl et al. (2007) e o guia VDI 2221 (1993) da engenharia mecânica, o gráfico Y de Gajski et al. (2009) da engenharia elétrica, Föllinger (2008) da engenharia de controle, ou os modelos *Waterfall*, *Expiral* e *V* de Sommerville (2007) da engenharia de *software*, são insuficientes e incompletas, pois focam em suas áreas de origem. Historicamente, o projeto de sistemas multidisciplinares emprega uma abordagem sequencial chamada de “*design-by-discipline*”, (SHETTY e KOLK, 2011).

Nesse tipo de abordagem, o projeto de um sistema mecatrônico é geralmente realizado em três passos, sendo que, tradicionalmente, inicia-se com o projeto mecânico. Quando o projeto mecânico está completo, a potência e a microeletrônica são projetadas, seguidas pelo projeto e implementação do algoritmo de controle. A maior desvantagem dessa abordagem é que, fixando o projeto em vários pontos sequencialmente, novas restrições são criadas e passadas para a próxima área ou disciplina. É comum ouvir: “Projete e construa a parte mecânica, então peça aos pintores para pintá-la e chamem os engenheiros de controle para implantar os controles”, (SHETTY e KOLK, 2011).

Outra desvantagem óbvia dessa abordagem sequencial é a falta de compatibilidade entre os subsistemas, que resulta em esforços e custos adicionais para alcançar as especificações gerais do sistema, (HEHENBERGER, 2014). Os projetos de controle geralmente não são eficientes devido a essas restrições adicionais. Além disso, *trade offs* (situações de projeto em que há conflito de escolha) feitos durante os estágios de projetos mecânicos e elétricos muitas vezes envolvem a definição de sensores e atuadores. É possível reduzir o custo do projeto, ao utilizar sensores menos precisos e atuadores menos potentes.

A fim de verificar as consequências do desenvolvimento sequencial de projeto Shetty e Kolk (2011) mostraram que empresas de projetos com esse tipo de abordagem apresentavam:

- 31,1 % taxa de cancelamento de projetos.
- 22,2 % extrapolam o prazo de projeto.
- Apenas 16,2 % completam em tempo e dentro do *budget* (orçamento)

- O custo de manutenção excede 200 % do custo inicial estimado na fase dos projetos

Adicionalmente, Aberdeen Group (2008) realizou uma pesquisa sobre a importância da utilização de uma correta metodologia para o projeto de sistemas mecatrônicos. Para isso, os pesquisadores consideraram cinco critérios de desempenho: receita, custo do produto, data de lançamento do produto, qualidade e custo de desenvolvimento. A partir desses critérios, as empresas pesquisadas foram divididas em dois grupos: *best-in-class* e *laggards*. As empresas classificadas como *best-in-class*, que utilizavam alguma metodologia de projeto mecatrônico, provaram serem duas vezes mais propensas a alcançarem os alvos de receita, os limites de custo de produto, as datas de lançamento, os objetivos de qualidade e o controle do custo de desenvolvimento. Além disso, revelaram que esses bons resultados estavam relacionados com os seguintes pontos:

- 2,8 vezes mais propensas do que as *laggards* em comunicar, cuidadosamente, as mudanças de projeto entre as disciplinas envolvidas.
- 3,2 vezes mais propensas do que as *laggards* em alocar os requerimentos de projetos aos sistemas, subsistemas e componentes específicos.
- 7,2 vezes mais propensas do que as *laggards* em digitalmente validar o comportamento do sistema com simulação integrada (mecânica, elétrica e componentes de *software*).

Dessa maneira, guias específicos para métodos estruturais de projeto e ferramentas para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos, que podem ajudar tanto estudantes quanto profissionais da área, são altamente recomendáveis e requeridos, (SALEN e MAHFOUZ, 2013). A fim de lidar com essa situação, várias ferramentas, modelos e métodos de projeto estão sendo investigadas nas comunidades de desenvolvimento industrial como, por exemplo, o Modelo em “V” do guia VDI 2206 (2004), o Modelo *3-Cycle* de Gausemeier et al. (2011), o Modelo Hierárquico de Hehenberger et al. (2010). Porém, apresentam lacunas e deficiências, conforme será discutido no penúltimo capítulo deste trabalho.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia de projeto para desenvolvimento de sistemas mecatrônicos que considere a integração das áreas de forma completa e consistente, ou seja, que possua efetividade na comunicação e cooperação entre os diferentes domínios, considere o entendimento e o planejamento das interações entre os seus componentes, permita a avaliação dos impactos das decisões de projeto e alcance os requisitos

e as funções principais do sistema de forma otimizada (menor custo possível). Os objetivos específicos foram:

- Investigar os principais modelos, ferramentas e métodos de projeto a serem aplicados no campo da mecatrônica, desenvolvendo uma revisão bibliográfica como fonte de informação para profissionais e estudantes da área de projetos.
- Realizar um estudo comparativo entre o modelo de desenvolvimento proposto e os existentes na literatura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais assuntos presentes na literatura relacionados com o objeto de pesquisa deste trabalho. Como o objetivo principal foi propor um modelo descritivo de projeto para o desenvolvimento sistemas mecatrônicos, foram descritos os conceitos e as definições mais importantes para a caracterização do problema. Além disso, foi realizado um embasamento teórico geral que envolveu o tema investigado com as várias áreas em que o mesmo pode ser aplicado como, metodologias clássicas desenvolvidas para os projetos de outros domínios, metodologias de gestão de projetos e de desenvolvimento de produtos.

### 2.1 Mecatrônica

#### 2.1.1 O que é mecatrônica

O termo mecatrônica foi originado no Japão, no fim da década de 70, como resultado da combinação bem-sucedida de engenharia mecânica, engenharia eletroeletrônica e processamento de dados no controle inteligente de sistemas mecânicos, (FIG 2.1). Shetty e Kolk (2011) definem mecatrônica como uma metodologia utilizada para o projeto ótimo de produtos eletromecânicos. Além disso, a caracterizam como uma filosofia de integração da engenharia de projeto, na qual a sinergia é gerada pela combinação correta entre componentes e parâmetros das diferentes áreas, ou seja, com resultado final melhor do que apenas a soma desses elementos.

Hunt (1988) conceitua mecatrônica como “[...] um termo cunhado pelos japoneses para descrever a integração das engenharias mecânica e eletrônica”. Embora já havia na década de 70 diversos equipamentos e dispositivos que utilizavam ambas as tecnologias, a especificidade da mecatrônica é definida pelo autor como “... uma abordagem multidisciplinar e integrada para o projeto de produtos e sistemas de manufatura”. Além disso, discorre sobre a importância da utilização de times multidisciplinares no projeto de produtos mecatrônicos. Contudo, enfatiza o caráter integrador de tecnologias de grupo, tais quais *computer aided process planning* (CAPP), *computer aided engineering* (CAE), *computer aided design* (CAD), *computer aided manufacturing* (CAM) e robôs, como impulsionador da integração entre os diferentes grupos funcionais envolvidos no projeto de novos produtos.

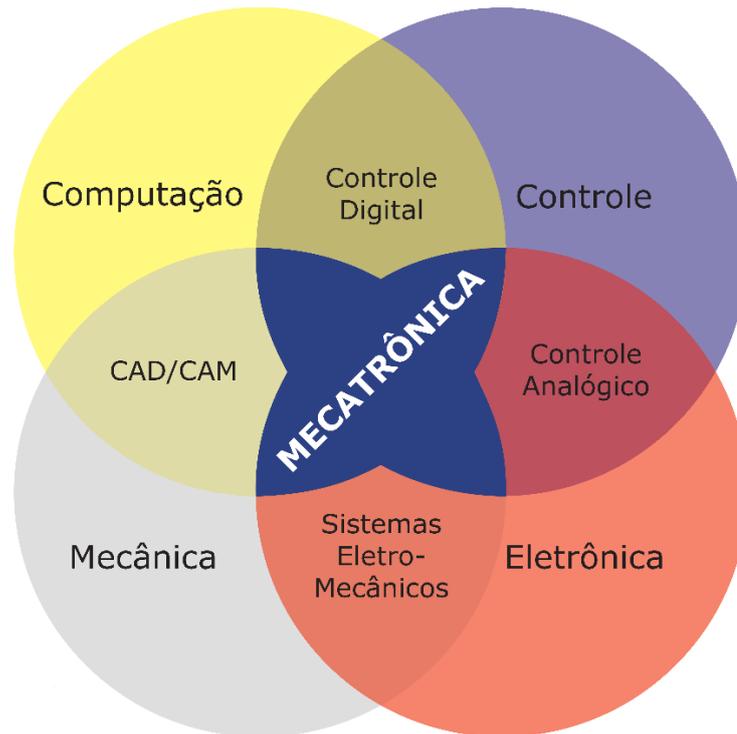


FIGURA 2.1 Diagrama ilustrativo da integração das áreas que compõem o conceito de mecatrônica.

O cenário idealizado por Hunt (1988) para indicar como o conceito de mecatrônica deveria evoluir na época da publicação do referido texto, foi ilustrado no seguinte trecho:

“ A Mecatrônica não é, ainda, uma tecnologia específica que pode ser comprada, mas uma abordagem para a automação de tecnologias, organização e gerenciamento. Esta integração é parte de um movimento geral para criar a fábrica mecatrônica do futuro, uma facilidade totalmente automatizada com elementos de marketing e manufatura trabalhando em harmonia...” (idem ibidem, p.48)

Por se tratar de uma disciplina baseada no estado-da-arte das tecnologias incorporadas nos produtos a ela relacionados, a mecatrônica exige a constante atualização dos profissionais das diferentes áreas técnicas. A engenharia mecatrônica deve estar apta a prover as demandas tecnológicas que os distintos campos de aplicação da mecatrônica necessitam, (BARBALHO, 2006).

Nesse aspecto, surge a perspectiva funcional da mecatrônica, ou seja, um entendimento do tipo de funcionalidade do produto mecatrônico e não apenas da combinação das disciplinas para o seu desenvolvimento. Tal abordagem funcional procura definir elementos que demonstrem como os produtos mecatrônicos se diferenciam dos equipamentos

desenvolvidos com as tecnologias clássicas, isto é, mecânica, eletroeletrônica e computação. O primeiro autor a desenvolver uma perspectiva funcional na definição de mecatrônica foi Buur (1990):

“ 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”.

A abordagem funcional também é descrita por Grimheden e Hanson (2005) como forma de demonstrar a evolução do conceito de mecatrônica. Segundo eles, do ponto de vista funcional, a mecatrônica pode ser entendida como uma abordagem pela qual é possível prover produtos com:

- inteligência: habilidade para utilizar um conjunto de parâmetros para o controle de funções. A inteligência do sistema está relacionada com a adaptabilidade a variações nos parâmetros, programabilidade, comunicação, autodiagnóstico, auto-reparo, etc; e
- flexibilidade: facilidade com a qual o produto pode ser ajustado a um novo ambiente durante o seu ciclo de vida.

Horikawa (2000) aborda a mecatrônica sob o aspecto de projeto. Segundo ele, a mecatrônica pode ser definida como um sistema mecânico com realimentação elétrica. O autor classifica projetos mecânicos como convencionais (passivos ou ativos) e como mecatrônicos, os quais são ilustrados na FIG 2.2.

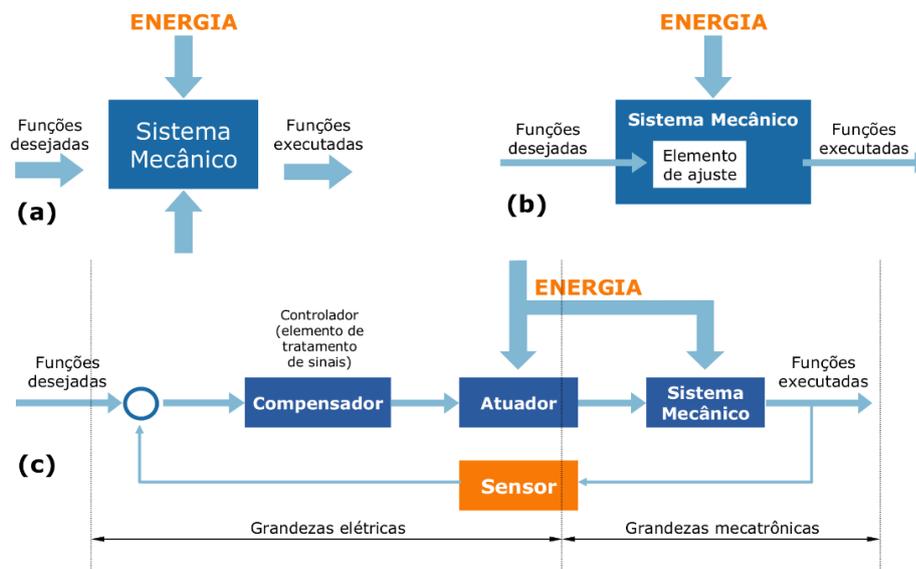


FIGURA 2.2 Projetos mecânicos convencionais passivo (a), ativo (b) e mecatrônicos (c) (Fonte: HORIKAWA, 2000)

Projetos mecânicos passivos e ativos são totalmente baseados nas ciências básicas da engenharia mecânica como, cinemática, dinâmica, resistência dos materiais, termodinâmica, etc. Em projetos passivos, o processo de adaptação do produto a uma nova necessidade é integralmente dependente da intervenção humana. Como exemplo, pode-se citar um dispositivo de furação no qual a alteração da velocidade de rotação é realizada manualmente por meio de uma alavanca que altera a relação de transmissão. Novas funções são conseguidas apenas por meio do reprojeto do produto.

Os projetos mecânicos ativos incorporam o conceito de controle através de uma malha de realimentação baseada em princípios mecânicos. A malha de controle introduz elementos de ajuste que corrigem os parâmetros internos do sistema. Um exemplo de sistema mecânico ativo é a locomotiva equipada com um regulador automático de velocidade, proposta por James Watt em 1788 e ilustrada na FIG 2.3. Nesse regulador, assim que a velocidade de rotação da locomotiva aumenta, a força centrípeta que age sobre os contrapesos também aumenta, fazendo com que o deslizador suba. Isso, por sua vez, faz com que uma válvula se feche e diminua a quantidade de vapor que flui para a locomotiva. A velocidade da locomotiva tende a cair, o que resulta no oposto do que foi descrito. O processo de aumento e diminuição de velocidade se repete iterativa e continuamente até que a força da mola, que tende a fazer com que os contrapesos subam, equilibre aquela gerada pela força centrípeta que age sobre os contrapesos. Apertando ou desapertando o parafuso, regula-se a força exercida pela mola e, com isso, altera-se a velocidade na qual se dá o equilíbrio. Essa classe de sistemas mecânicos ativos é chamada de sistemas mecânicos ativos com realimentação mecânica, (ROSÁRIO, 2005).

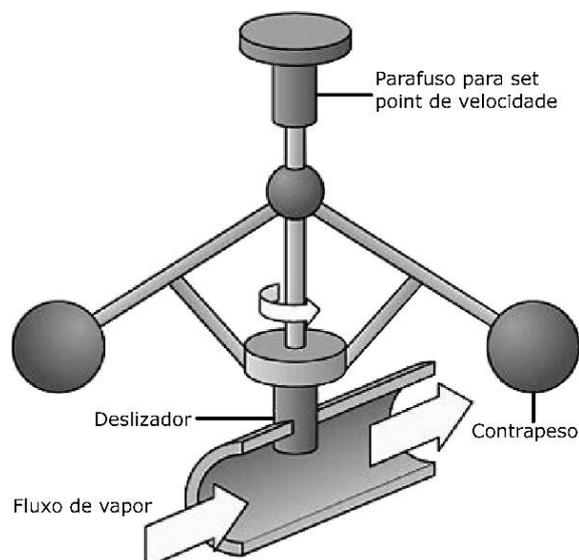


FIGURA 2.3 Exemplo de sistema mecânico ativo (Fonte: ROSÁRIO, 2005).

A realimentação compreende duas ações distintas: a primeira é o monitoramento da variável de controle, ou seja, a obtenção de um sinal que represente e descreva o estado atual da variável de controle. A segunda é o tratamento do sinal obtido pelo monitoramento, ou seja, a computação do erro (a diferença entre o estado atual e o estado desejado da variável de controle) e sua transformação de maneira adequada, de modo que, ao ser enviado para o elemento de regulação ou controlador, a saída desejada seja obtida.

O controle realizado por realimentação baseada em princípios mecânicos apresenta sérias limitações quanto à precisão do monitoramento do processo; à precisão no tratamento do sinal de controle e à complexidade do projeto, fabricação e montagem da malha de realimentação. Em contrapartida, os sistemas mecatrônicos, mediante a introdução de componentes eletrônicos e de processamento de dados, permitiram o aumento da precisão de controle dos parâmetros de projeto, uma maior rapidez de resposta e um aumento na capacidade de implementação de algoritmos de controle mais complexos, (ROSÁRIO, 2005).

Histand e Alciatore (2006, p.11) acrescentam o importante elemento de controle ao conceito de mecatrônica e a definem como:

“ Mecatrônica é um campo interdisciplinar da engenharia que lida com o projeto de produtos cujas funções são realizadas por uma integração sinérgica entre componentes mecânicos eletrônicos e elétricos conectados por uma arquitetura de controle”.

O conceito de interação funcional descrito por Buur (1990) é aqui identificado como “integração sinérgica” e ao invés de tecnologias os autores mencionam componentes. Segundo Dorf e Bishop (2001, p.2), “[...] um sistema de controle é uma interconexão de componentes formando uma configuração que provê uma resposta desejada”. Nesse contexto, a relação entre sistemas de controle e mecatrônica é discutida a seguir.

Pode-se considerar que todo produto mecatrônico comporta ao menos um sistema de controle. Entretanto, a teoria de controle não é suficiente para dar conta do projeto de equipamentos mecatrônicos, uma vez que é dedicada à identificação de parâmetros e valores que otimizem o funcionamento de um determinado sistema em regime permanente, e, portanto, não prescreve métodos para o projeto do sistema a ser controlado. Pode-se dizer que o projetista de equipamentos mecatrônicos deve ter formação sólida em sistemas de controle, sendo capaz de utilizar seus conhecimentos em mecânica, eletrônica e *software* para implementar os sistemas de controle necessários para o correto funcionamento do projeto. Por outro lado, há

um grande número de sistemas de controle que não são mecatrônicos, uma vez que utilizam apenas um tipo de tecnologia: mecânica, eletrônica, pneumática, etc.

Rizzoni e Grove (2001) apresentam uma definição de mecatrônica que engloba elementos básicos de sistemas de controle. Segundo o autor, a mecatrônica é:

“[...] a confluência de métodos de projeto tradicionais com sensores e tecnologias de instrumentação, atuadores e sistemas de alimentação, sistemas microprocessados embarcados e *software* de tempo real.”

Nessa definição, o foco da discussão sai do aspecto formal representado pelas disciplinas que caracterizam os produtos mecatrônicos e se fundamenta nas tecnologias relacionadas com as funções desempenhadas por esse tipo de produto: atuadores, sensores, instrumentação, microprocessadores, sistema de alimentação e *software* em tempo real.

Portanto, verifica-se que não existe um conceito universal sobre mecatrônica. Ao decorrer dos anos, foram criadas inúmeras definições em função da evolução tecnológica e do contexto e área nos quais estavam inseridas. Porém, todas consideram a integração entre as áreas e as funcionalidades multidisciplinares. No próximo tópico serão apresentados a topologia dos sistemas mecatrônicos.

### **2.1.2 Sistemas mecatrônicos**

Segundo Bradley (1991), os principais componentes dos sistemas mecatrônicos, exemplificados na FIG 2.4, são:

- Sensores e instrumentação: sistema de mensuração utilizado no produto para controlar as condições de operação e/ou ambientais. Os sensores são os componentes do sistema de medição que respondem a um parâmetro físico que se deseja medir.
- *Software* de processamento/controle: é o principal componente lógico do sistema. Nele são armazenadas e comandadas as principais funções do produto. As informações oriundas dos sensores e transdutores são processadas e rotinas são executadas de maneira a comandar a operação do sistema.
- Atuadores e *drives*: os atuadores são componentes robustos utilizados para corrigir o funcionamento do sistema. São comumente soluções mecânicas ou eletroeletrônicas que agem diretamente sobre o mecanismo que realiza a operação básica do produto. Os *drives* são tipos de circuitos eletrônicos que

realizam a interface entre os sinais de controle gerados pelo sistema microprocessado e a parte de potência responsável por fornecer energia aos atuadores.

- Projeto mecânico: é o projeto básico do mecanismo ou solução de engenharia para propósito ao qual o produto deve atender.
- Sistema de comunicação: são os meios físicos ou eletromagnéticos através dos quais os sinais produzidos e utilizados por sensores, microprocessadores e atuadores transitam.

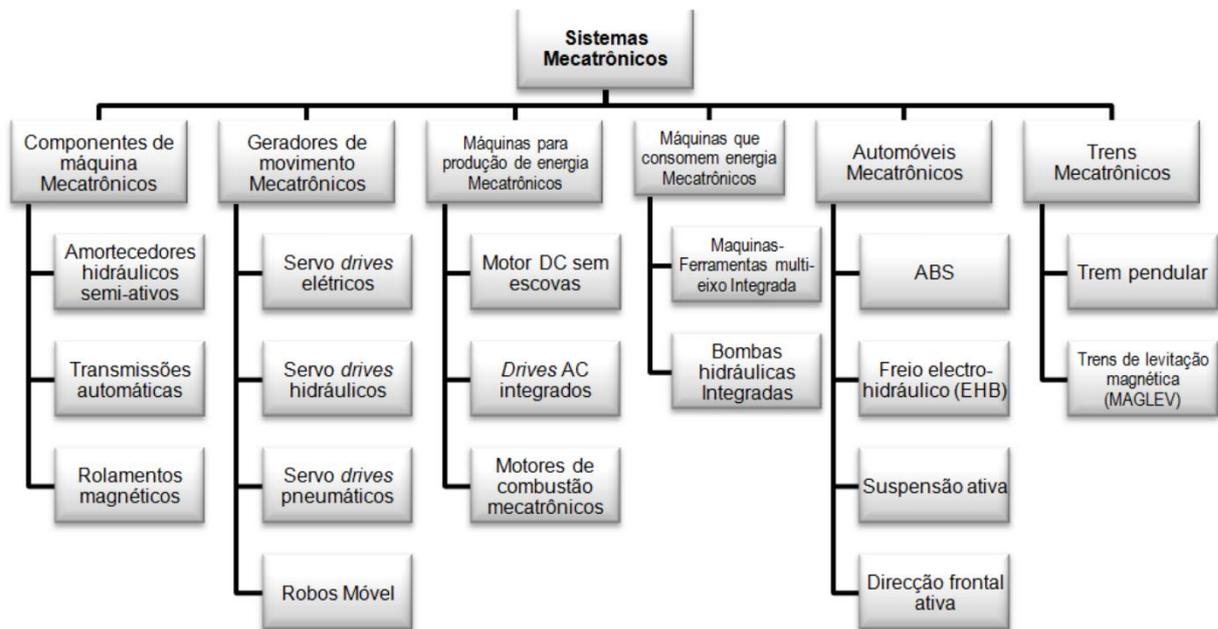


FIGURA 2.4 Exemplos de sistemas mecatrônicos (Fonte: Isermann, 2008).

Rzevski (2003) propõe a seguinte classificação para os produtos mecatrônicos:

- Sistemas mecatrônicos automáticos: são os sistemas mecatrônicos mais comuns que são capazes de manusear materiais e energia, comunicarem-se com seu ambiente e apresentar comportamentos de auto-regulação, ou seja, de resposta pré-programada a mudanças previstas em seu ambiente.
- Sistemas mecatrônicos inteligentes: sistemas capazes de atingir objetivos sob condições de incerteza. Esses sistemas são projetados para responderem a mudanças em seu ambiente de operação sem que seja necessário reprogramá-los. Esses sistemas são desenvolvidos através do uso de lógica fuzzy, redes neurais e inteligência artificial.

- Redes mecatrônicas inteligentes: são os sistemas mecatrônicos capazes de decidir seu próprio comportamento por meio de negociação entre suas unidades constituintes, cada uma das quais é um “sistema mecatrônico inteligente”. As mais interessantes características desse tipo de sistema é a capacidade de melhorar seu desempenho através da auto-organização.

## 2.2 Metodologia de projeto

Uma importante pergunta que pode ser realizada como introdução desta subseção é: por quê estudar o processo de desenvolvimento de um projeto? A resposta está relacionada com a contínua necessidade por novos produtos de melhor qualidade e custo-benefício, que, além disso, estão cada vez mais complexos e multidisciplinares. Desta forma, investigam-se meios de como projetar de forma eficiente de modo a lidar com essa crescente conjuntura. Outro ponto relevante é que, apesar do custo de projeto ser geralmente a menor parcela do gasto total da manufatura de um produto, o impacto do bom desempenho do projeto nas demais despesas do produto é muito significativo, podendo reduzir o custo total em até 75% em alguns casos, (ULLMAN, 2010).

O homem, geralmente, resolve seus problemas utilizando processos heurísticos, isto é, processos práticos ou simplificados, baseados em informações anteriores, que o ajudam a encontrar soluções satisfatórias para um determinado problema. Entretanto, tal forma de raciocínio se limita a resolver problemas mais simples. Quando se trata de problemas de maior complexidade, é importante o uso de procedimentos metodológicos e sistemáticos, devido ao grande número de informações a serem manuseadas e processadas.

Dentro deste contexto, os procedimentos sistemáticos seriam aqueles relacionados com a forma de desenvolver raciocínios mais lógicos, capazes de identificar o problema de projeto apresentado até chegar a uma solução satisfatória. A partir desses procedimentos, compila-se o máximo de informações, utilizando-se de todos os meios práticos disponíveis, para que o processo de concepção possa ser conduzido, operacionalizado e viabilizado da melhor forma possível. Dessa maneira, obtém-se a solução do problema apresentado.

Por sua vez, os procedimentos metodológicos seriam aqueles relacionados com a forma de desenvolver todo o projeto, desde a identificação do problema até a sua solução final. Através de estágios estruturados, os quais mapeariam os caminhos a serem percorridos por uma equipe de projeto, os erros seriam minimizados e as questões importantes seriam consideradas para o desenvolvimento do projeto, (MARIBONDO, 2000).

Nesse cenário, surge o campo de Metodologia de Projeto, também conhecido como DTM (sigla em inglês: *Design and Theory Methodology*), que tem atraído atenção de muitos pesquisadores acadêmicos e alcançou um considerável número de resultados, (TOMIYAMA, GU, *et al.*, 2009). Atualmente, essas teorias são ensinadas em muitas escolas de engenharia e estão sendo aplicadas industrialmente. Esta situação evidencia um forte contraste existente antes dos anos 70 quando projeto era considerado mais próximo de arte do que de engenharia devido ao insuficiente conhecimento sobre DTM.

Metodologia é uma expressão derivada dos seguintes vocábulos gregos: “*méthodos*” e “*logos*”, a qual designa a ciência que estuda os métodos. O conceito de “método” também deriva etimologicamente do grego e significa “caminho para alguma coisa”, “caminho para se chegar a um fim” ou “andar ao longo de um caminho”, (NETO e DEDINI, 2010). Metodologia pode também ser considerada como uma coleção de práticas, procedimentos e regras utilizadas por aqueles que trabalham em um ramo particular do conhecimento ou disciplina, (SHETTY e KOLK, 2011).

Segundo Bonfim (1984), “[...] no sentido comum, metodologia é o estudo de métodos, técnicas e ‘ferramentas’ e de suas aplicações à definição, organização e solução de problemas teóricos e práticos”. Para ele, o estudo de metodologia de projeto, propriamente dita, significa tratar da geração, adaptação e aplicação de conceitos de diversos campos da ciência na proposição de procedimentos lógicos.

Finkelstein e Finkelstein (1983), definem projeto como sendo “o processo criativo que inicia de um requisito e define uma invenção ou sistema e os métodos de sua realização ou implementação para satisfazer o requisito” ou ainda, “é a atividade humana primária e é central para a engenharia e artes aplicadas”.

Para Back (1983), projeto de engenharia é “uma atividade orientada para o entendimento das necessidades humanas, principalmente daquelas que podem ser satisfeitas por fatores tecnológicos de nossa cultura”.

Outros autores já mencionam que “projeto” “é o processo de estabelecimento dos requisitos baseado em necessidades humanas, transformando-os em especificações de desempenho e funções, as quais são mapeadas e convertidas (sujeitas a restrições) em soluções de projeto (usando criatividade, princípios científicos e conhecimentos técnicos) que podem ser economicamente fabricadas e produzidas, (EVBUOMWAN *et al.*, 1996).

Portanto, pode-se dizer que metodologia de projeto é a coleção de ferramentas e documentos de apoio ao processo de projeto, que tem por objetivo maior auxiliar os projetistas a tomarem as melhores decisões, valendo-se de mecanismos de avaliação e retroalimentação de

dados, que juntos terminam por dar suporte às tomadas de decisões, na busca pela melhor solução de um determinado problema de projeto, (MARIBONDO, 2000).

Segundo Tomiyama et al. (2009), a ideia básica do processo de projeto, no âmbito do conhecimento humano, é descrita como (FIG 2.5):

1. Primeiramente, o conhecimento sobre a entidade a ser projetada deve existir. Para isso, conceitos abstratos devem ser categorizados.
2. A região em que a nova solução de projeto exista pode ser definida como o resultado da interseção dos requisitos de projeto.
3. O projetista encontra uma entidade que pode preencher estes requisitos com os conceitos abstratos. Se nenhuma solução é encontrada (falta de conhecimento), o processo retorna ao núcleo de síntese. Nesta situação, um número de estratégias pode ser possível. É notório que o passo 2 é uma condição necessária para qualquer novo projeto, visto que sem tal combinação conceitual a necessidade de um novo projeto pode ser contestada.
4. Se a solução de projeto é obtida, é realizado o mapeamento das características do espaço abstrato para o espaço real, de atribuição. Sua vizinhança no espaço real é analisada de forma a se obter as informações necessárias para a efetivação, execução e produção do projeto.

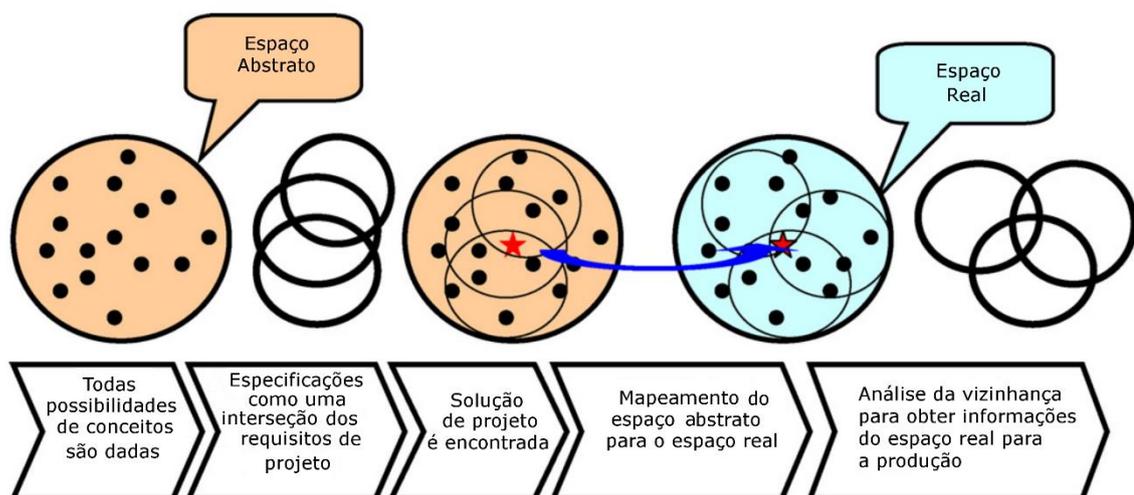


FIGURA 2.5 Processo de projeto ideal no âmbito do conhecimento humano (Fonte: Tomiyama, Gu, et al., 2009 - adaptado).

Em contexto mais prático, Pahl et al. (2007) diz que uma metodologia de projeto deve:

- Permitir uma abordagem que possa ser aplicável em todo tipo de atividade de projeto, independente do campo ou área envolvida;
- Acelerar a inventividade e o entendimento do projeto, ou seja, facilitar a busca por soluções ótimas;
- Ser compatível com conceitos, métodos e soluções de outras disciplinas;
- Não confiar em soluções encontradas por acaso;
- Ser compatível com o processamento eletrônico de dados;
- Ser facilmente ensinada e aprendida;
- Refletir as soluções da psicologia cognitiva e da ciência de gerenciamento moderno, ou seja, reduzir a carga de trabalho, economizar tempo, prevenir o erro humano e ajudar a manter o interesse ativo;
- Facilitar o planejamento e gestão das equipes de trabalho no processo de desenvolvimento integrado e multidisciplinar;
- Fornecer guias para os líderes de projeto.

Diante das várias possibilidades de pensamentos, com relação ao processo de projeto, tem-se a seguinte questão: como representar tais pensamentos? A forma encontrada foi através de modelos de projeto, ou seja, representações que descrevem o projeto e como ele pode ser feito. A forma mais usual encontrada na literatura é aquela que apresenta o processo de projeto na forma de um diagrama de fluxo. O primeiro autor que abordou de uma forma mais orientada as atividades desenvolvidas ao longo do processo de projeto de engenharia, foi Asimow em 1962, com a obra *Introduction to design: fundamentals of engineering design*, (NETO e DEDINI, 2010).

A metodologia proposta por Asimow (1968), procura determinar de forma extensiva e encadeada todos os passos do desenvolvimento de produtos. Apresenta grande importância histórica, por se tratar de um trabalho pioneiro no desenvolvimento de metodologias de projeto. O autor apresentou a morfologia para desenvolvimento de um projeto, como mostra a FIG 2.6. Segundo o modelo, o projeto irá se desenvolver através da série de fases apresentadas. Dentro do modelo proposto pelo autor uma nova fase não começará antes que a anterior esteja completa, mas esta determinação pode ser modificada para alguns casos.

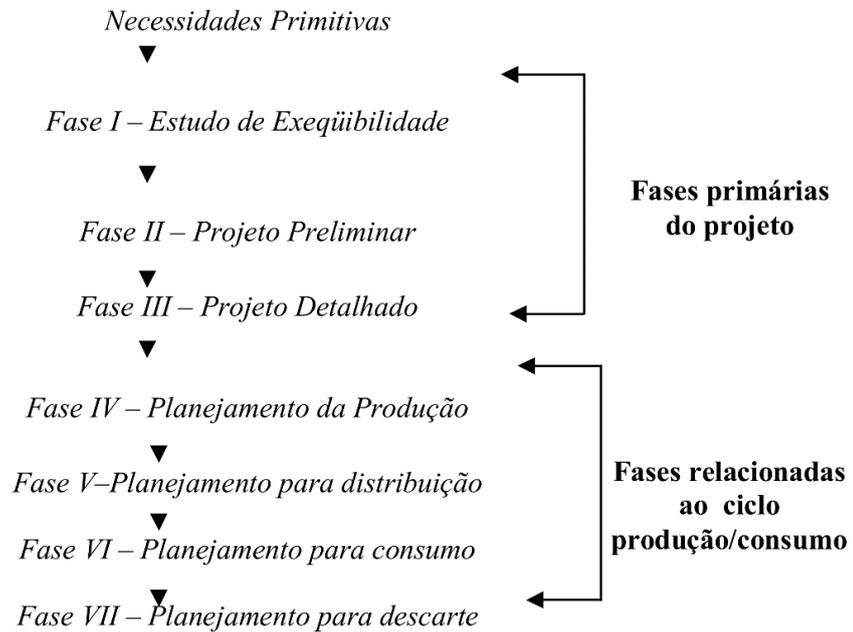


FIGURA 2.6 Fluxograma de projeto proposto por Asimov (1968)

No entanto, existem outros tipos de modelos destinados a este fim. A TABELA 2.1, por exemplo, apresenta as classificações dos tipos de modelos de representação de projeto. Baseados nesta classificação diversas propostas metodológicas foram apresentadas. Para um maior esclarecimento, apresentam-se nas TABELAS 2.2 e 2.3 alguns dos modelos de projeto descritivos e prescritivos, que mostram entre outros aspectos, o autor do modelo de processo de projeto; ano de publicação; forma de apresentação desse processo de projeto e algumas ferramentas e documentos de projeto que dão apoio a estes processos de projeto.

TABELA 2.1

Classificação para os modelos de projeto.

<b>Modelo</b>	<b>Comentários</b>
Prescritivos	São aqueles caracterizados por prescrever como o processo de projeto deve ocorrer, ou seja, são aqueles que enunciam maneiras de trabalhar durante o projeto, através de procedimentos algorítmicos e sistemáticos.
Descritivos	São caracterizados por descrever experiências anteriores mostrando como os projetos foram criados. Em outras palavras, são caracterizados por descrever quais foram os processos, as estratégias e os métodos de solução utilizados na solução de determinados problemas de projeto

Computacionais	São caracterizados por mapear funções dentro de uma estrutura e investigar quais delas são as mais indicadas para a implementação computacional. Além do mais, possuem dois aspectos importantes, a saber: 1) são considerados uma parte necessária no desenvolvimento de uma ferramenta mais efetiva; 2) se destinam a apoiar as pesquisas em teorias e metodologias de projeto.
----------------	---

FONTE - MARIBONDO, 2000.

TABELA 2.2

Modelos de projeto descritivos.

Autor (ano)	Forma de apresentação do processo de projeto	Número de estágios do processo de projeto	Ferramentas e documentos de projeto utilizados no apoio ao processo de projeto
March (1984)	Através de uma representação gráfica	<p><b>Três estágios.</b></p> <p><u>Dedutivo</u>: Responsável por avaliar as características de desempenho.</p> <p><u>Indutivo</u>: Responsável por prevê as noções habituais e de estabelecer valores.</p> <p><u>Abduativo</u>: Responsável por criar a nova composição.</p>	• Desenhos
Matchett e Briggs (1966)	Através de um texto	<p><b>Sete estágios.</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Estudar a situação de projeto.</li> <li>2) Identificar provisoriamente as necessidades que o projeto tem que satisfazer.</li> <li>3) Identificar a necessidade funcional.</li> <li>4) Explorar alternativas de princípios que satisfaçam as necessidades elementares.</li> <li>5) Apresentar uma proposta de projeto que seja capaz de satisfazer ambas as necessidades primárias e secundárias do projeto.</li> <li>6) Revisar a efetividade funcional desse projeto.</li> <li>7) Revisar o conteúdo de trabalho e material na produção</li> </ol>	Não mencionado
Hybs e Gero (1992)	Através de um fluxo	<p><b>Dez estágios.</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Formulação ou projeto resumido ou especificado.</li> <li>2) Análise.</li> <li>3) Síntese.</li> <li>4) Produção da descrição do projeto.</li> <li>5) Fabricação do produto.</li> <li>6) Interação com o mundo real.</li> <li>7) Avaliação.</li> <li>8) Reformulação.</li> <li>9) Simulação do desempenho da estrutura.</li> <li>10) Desempenho do produto atual.</li> </ol>	Não mencionado

TABELA 2.3

Modelos de projeto prescritivos.

Autor (ano)	Forma de apresentação do processo de projeto	Número de estágios do processo de projeto	Ferramentas e documentos de projeto utilizados no apoio ao processo de projeto
Asimov (1968)	Através de um diagrama de fluxo contendo fases e passos	<p><b>Seis estágios</b>, mas só detalha três.</p> <p>Fase I: <u>Estudo de exequibilidade</u>. Estabelecimento da necessidade; explora o problema de projeto; identificar parâmetros, principais restrições e critérios; gerar soluções plausíveis; analisar soluções quanto a possibilidade de realização física, econômica e financeira.</p> <p>Fase II: <u>Projeto Preliminar</u>. Seleção dos melhores conceitos entre os viáveis; análise das soluções (modelagem matemática, refinamento); seleção da melhor alternativa.</p> <p>Fase III: <u>Projeto detalhado</u>. Detalhamento completo da solução e de suas partes (desenhos técnicos de montagem e de componentes); construção e teste do protótipo; revisões do projeto.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informações de mercado;</li> <li>• Informações técnicas;</li> <li>• Fatores econômicos e financeiros;</li> <li>• Registros de experiências e de técnicas;</li> <li>• Análise matemática;</li> <li>• Resultados dos testes.</li> </ul>
Pahl e Beitz (1971)	Através de um diagrama de fluxo contendo fases e passos	<p><b>Quatro estágios</b>.</p> <p>Fase I: <u>Definição da tarefa</u>. Classificação da tarefa; elaboração das especificações de projeto.</p> <p>Fase II: <u>Projeto conceitual</u>. Identificar os problemas essenciais; estabelecer a estrutura de funções; pesquisar por princípios de solução; combinar e concretizar em variantes de concepções; avaliar segundo critérios técnicos e econômicos.</p> <p>Fase III: <u>Projeto preliminar</u>. Desenvolver <i>layouts</i> e formas preliminares; selecionar os melhores <i>layouts</i> preliminares; refinar e avaliar sob critérios técnicos e econômicos; otimizar e completar o projeto das formas; verificar erros e controlar custos; preparar lista das partes preliminares e os documentos de produção.</p> <p>Fase IV: <u>Projeto detalhado</u>. Finalizar os detalhes, completar os desenhos detalhados e os documentos de produção; verificar todos os documentos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informações de mercado;</li> <li>• Lista de requisitos de projeto;</li> <li>• Lista de especificações de projeto;</li> <li>• Síntese funcional;</li> <li>• Lista de princípios de solução;</li> <li>• Matriz morfológica;</li> <li>• Estabelecimento de critérios para a seleção de combinações;</li> <li>• Análise de valor;</li> <li>• <i>Layouts</i> preliminares;</li> <li>• Desenhos detalhados.</li> </ul>
VDI (Verein Deutscher Ingenieure) Guideline 2221 (1987)	Através de um diagrama de fluxo contendo fases e passos	<p><b>Sete estágios</b>.</p> <p>Passo 1: <u>Esclarecer e precisar a formulação da tarefa</u>.</p> <p>Passo 2: <u>Verificação das funções e de suas estruturas</u>.</p> <p>Passo 3: <u>Pesquisar os princípios de solução e sua estrutura</u>.</p> <p>Passo 4: <u>Dividir em módulos realizáveis</u>.</p> <p>Passo 5: <u>Configurar os módulos principais</u>.</p> <p>Passo 6: <u>Configurar o produto total</u>.</p> <p>Passo 7: <u>Preparar instruções de execução e de uso</u>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informações de mercado;</li> <li>• Questionários;</li> <li>• Entrevistas;</li> <li>• Lista de condições e restrições;</li> <li>• Lista de requisitos;</li> <li>• Especificações de projeto;</li> <li>• Síntese funcional;</li> <li>• Lista de princípios de solução;</li> <li>• Métodos intuitivos e discursivos;</li> <li>• Considerações técnicas e econômicas;</li> <li>• <i>Layouts</i> preliminares;</li> <li>• Desenhos detalhados.</li> </ul>

Hubka (1988)	Através de uma diagramação que mostra fases, passos e documentos de projeto	<p><b>Quatro estágios.</b></p> <p>Fase 1: <u>Elaboração do problema</u>. Elaborar ou clarificar as especificações.</p> <p>Fase 2: <u>Projeto conceitual</u>. Estabelecer as estruturas de funções; estabelecer concepções.</p> <p>Fase 3: <u>Layout</u>. Estabelecer o <i>layout</i> preliminar: estabelecer o <i>layout</i> dimensional.</p> <p>Fase 4: <u>Elaboração</u>. Detalhamento e elaboração.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Especificações de projeto;</li> <li>• Síntese funcional;</li> <li>• Matriz morfológica;</li> <li>• Concepções esquemáticas;</li> <li>• <i>Layouts</i> preliminares;</li> <li>• <i>Layouts</i> dimensionais;</li> <li>• Desenhos detalhados;</li> <li>• Desenhos de montagens.</li> </ul>
Fabrick e Blanchard (1990)	Através de um fluxo que mostra o ciclo de vida de um sistema	<p><b>Sete estágios.</b></p> <p><u>Definição da necessidade</u>: Identificação de faltas ou desejos por sistemas.</p> <p><u>Projeto conceitual</u>: Estudo da viabilidade: análise das necessidades; requisitos operacionais; concepção da manutenção; planejamento avançado do sistema.</p> <p><u>Projeto preliminar</u>: Análise funcional do sistema: síntese preliminar e alocação de critérios de projeto; otimização do sistema; definição e síntese do sistema.</p> <p><u>Projeto detalhado</u>: Projeto do produto do sistema: desenvolvimento do protótipo do sistema; teste e avaliação do protótipo do sistema.</p> <p><u>Produção e/ou construção</u>: Avaliação do sistema: modificações para ações corretivas.</p> <p><u>Utilização e suporte</u>: Avaliação do sistema: modificações para ações corretivas.</p> <p>Descarte.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclo de vida do produto;</li> <li>• Lista de questões;</li> <li>• Pesquisa de mercado;</li> <li>• Estudo da viabilidade;</li> <li>• Plano de suporte logístico;</li> <li>• Métodos de pesquisa;</li> <li>• Requisitos de projeto;</li> <li>• Requisitos de produção e/ou construção;</li> <li>• Requisitos de avaliação.</li> </ul>

## 2.2.1 Ferramentas de auxílio ao processo de projeto

Algumas atividades relacionadas na metodologia se referem a ferramentas e documentos amplamente utilizados nos processos de projeto. As principais ferramentas e documentos empregados são (Maribondo, 2000):

**Informações técnicas sobre o tema de projeto** – Compreendem documentos destinados a registrarem em si dados e demais aspectos ligados ao tema de estudo. Geralmente são utilizados no início do processo de projeto.

**Ciclo de vida dos produtos** – Corresponde a um documento que objetiva auxiliar a equipe de projeto a levantar informações sobre a produção, consumo e descarte de produtos iguais ou semelhantes ao produto em estudo. Estas informações permitem aos projetistas que conheçam melhor seus concorrentes, descobrindo seus pontos falhos para explorá-los, visando gerar um produto mais competitivo. Geralmente é aplicado no início do processo de projeto.

**Questionários estruturados e não estruturados** – Compreende uma lista de questões previamente estabelecidas, dirigidas a grupos diferentes de clientes do projeto, nas várias fases do ciclo de vida do produto, visando coletar desejos e necessidades para o

desenvolvimento e clarificação do problema de projeto. Geralmente são aplicados no início do processo de projeto.

**Aplicação de entrevistas** – São formas de coletar informações relativas aos desejos e necessidades junto a todos os clientes do projeto em estudo. Todas as pessoas que, de alguma forma, terão qualquer envolvimento com o projeto serão questionadas sobre suas necessidades individuais para compor uma base de informações essenciais de requisitos a serem atendidos pelo projeto, bastante completa. Geralmente são aplicadas no início do processo de projeto.

**Lista de requisitos dos clientes do projeto** – Corresponde a um documento que registra as interpretações dos desejos e necessidades dos clientes do projeto, apresentadas numa linguagem mais técnica e fácil de ser aplicada no desenvolvimento do projeto. Geralmente é aplicada no início do processo de projeto.

**Lista dos requisitos de projeto** – Corresponde a um documento que possui expressões mensuráveis que indicam como atender aos requisitos dos clientes do projeto. Corresponde à “voz de engenharia”. Geralmente é estabelecida no início do processo de projeto.

**Matriz da casa da qualidade** – É uma ferramenta que tem por objetivo assegurar a qualidade do produto em cada fase do seu ciclo de vida. Além de integrar os vários participantes do projeto, inclui nas decisões tomadas e nas soluções propostas os desejos e as necessidades dos vários clientes envolvidos, de forma direta ou indireta com o desenvolvimento do produto. Além disso, prevê uma comparação com produtos concorrentes, objetivando atender a todos os requisitos propostos pelos clientes da melhor maneira possível. Geralmente é aplicada no início do processo de projeto.

**Especificações de projeto** – É um documento onde são descritos com detalhes de que maneira cada um dos requisitos de projeto deve ser atendido para ser contemplado no desenvolvimento do projeto em estudo. Geralmente corresponde ao último documento utilizado no primeiro estágio do processo de projeto, o projeto informacional.

**Síntese funcional** – Compreende uma série de ações necessárias à formulação de uma função geral de um sistema técnico. Também compreende outras ações necessárias à substituição desta função geral formulada por outras estruturas de função de menor complexidade. Geralmente tais ações definem o início do segundo estágio do processo de projeto, o projeto conceitual.

**Matriz morfológica** – É um método destinado a estimular a criatividade da equipe de projeto através da exploração sistemática de um grande número de soluções possíveis que são organizadas com o auxílio de um quadro ou de uma matriz. Geralmente é utilizado no segundo estágio do processo de projeto.

**Análise técnica** – Ações destinadas à análise das soluções apresentadas na matriz morfológica, levando em consideração a disponibilidade de máquinas, equipamentos, ferramentas manuais, e pessoal existente na empresa para atuar no desenvolvimento do projeto. Objetiva verificar a possibilidade dessas soluções serem desenvolvidas por esta ou outras empresas. Geralmente é utilizado no segundo estágio do processo de projeto.

**Análise econômica** – Ações destinadas a analisar as soluções apresentadas a partir da matriz morfológica, com relação à viabilidade econômica e financeira junto à empresa responsável pelo projeto em estudo. Geralmente é utilizado no segundo estágio do processo de projeto.

**Ferramentas de otimização** – Compreendem todas as ferramentas de apoio ao processo de projeto que buscam, entre outros aspectos, melhorar a solução escolhida para o problema em estudo. Neste campo destacam-se as ferramentas que avalia a fabricabilidade, a montabilidade, a testabilidade, a manutenibilidade, a disponibilidade da solução escolhida, entre outros aspectos. Geralmente é utilizado no projeto preliminar. Atualmente, diversas ferramentas computacionais de CAD/ CAE são empregadas para o projeto em ambiente virtual, minimizando as chances de erros de projeto.

**Ferramentas de detalhamento** - Compreendem todas as ferramentas de apoio ao processo de projeto que buscam, entre outros aspectos, detalhar a solução escolhida para o problema em estudo. Dessas, destacam-se as ferramentas de CAD. Geralmente é utilizado no quarto estágio do processo de projeto, que é o projeto detalhado. O emprego adequado desses sistemas fornece informações para os modelos cinemático, dinâmico, estrutural, design, dimensional e até a simulação da fabricação.

**Ferramentas de DFX (*Design for X*)** – Compreende um conjunto de regras aplicadas para otimizar os projetos em cada abordagem escolhida. Algumas dessas ferramentas são:

- *Design for Manufacturing* – Projeto para manufatura – Compreende regras básicas de projeto para auxiliar e facilitar a usinagem dos componentes projetados;
- *Design for Assembly* – Projeto para montagem – Apresenta regras que asseguram a montabilidade dos componentes projetados;
- *Design for Disassembly* – Projeto para a desmontagem;

- *Design for Life Cycle* – Projeto para o ciclo de vida – As decisões de projeto serão tomadas levando em consideração o ciclo de vida do produto;
- *Design for Maintainability* – Projeto para a manutenção – Apresenta regras que facilitam a posterior manutenção do sistema projetado;
- *Design for Reliability* – Projeto para a confiabilidade - Neste caso, o enfoque é garantir que o produto tenha vida útil assegurada para todo o período que foi projetado para funcionar, com baixa ou inexistente manutenção;
- *Design for reuse* – Projeto para a reutilização – O projeto é direcionado para o aproveitamento do sistema depois de terminada a sua vida projetada;
- *Design for Cost* – Projeto para o custo – A preocupação passa a ser a diminuição dos custos envolvidos no projeto;
- *Design for Consumer* – Projeto para o consumidor – O projeto é direcionado especificamente para atender às necessidades do consumidor;

Como pode ser visto, o processo metodológico de projeto pode utilizar diversas ferramentas que auxiliam na busca das informações importantes para a condução e organização do projeto. Dessa forma, o processo de tomada de decisão será sempre embasado em informações concretas e coerentes com os objetivos de projeto, ou seja, sem negligenciar os seus requisitos principais.

As metodologias e as ferramentas de projeto apresentadas até aqui são gerais e podem ser aplicadas a qualquer tipo de produto e tecnologia, independente da área ou domínio do conhecimento predominante (mecânica, civil, elétrica, etc.). A seguir, serão apresentadas algumas metodologias específicas das áreas que compõem a mecatrônica.

### **2.2.2 Metodologia de projeto mecânico**

Pertence (2014) descreve o projeto mecânico em cinco fases sequenciais principais:

**Concepção geral:** Obtenção, avaliação, discussão e definição das capacidades, desempenhos e características básicas do projeto dos equipamentos e ou instalação. Observação dos equipamentos, instalações, componentes e estruturas existentes, que sejam iguais, equivalentes ou semelhantes.

**Proposição da ideia básica:** Avaliação e discussão da ideia básica quanto a funcionalidade, fabricabilidade (unitária ou em série, espectro de processos de fabricação), manutenção, durabilidade, viabilidade econômica, viabilidade de segurança do trabalho, viabilidade ambiental. Definição da filosofia diretora primordial para a efetivação do projeto do equipamento ou instalação, relativos a aspectos de resistência, desgaste (vida) e outras características tais como: conforto, aparência, acabamento, ergonomia, peso, insalubridade, ética, térmico, elétrico, acústico, de vibração, de higiene, de segurança do trabalho, ambiental.

**Sistematização do projeto:** Sistematização, divisão ou discretização de instalações ou equipamentos em sistemas, subconjuntos e partes, visando, o dimensionamento e fabricação própria ou terceirizada e/ou a especificação e aquisição de sistemas, subconjuntos, partes e/ou semiacabados.

**Dimensionamento Geral:** Desenvolvimento de memorial de cálculo (cálculos analíticos, normas, métodos numéricos), geração de desenhos de fabricação (desenhos de conjunto, desenhos de montagem, *layouts*, desenhos de sistemas, detalhamento de partes.), geração de lista de material e componentes. Especificação de elementos e subconjuntos padronizados. Quando se deseja projetar algum equipamento mecânico ou sistema estrutural é possível considerar 3 condições básicas para o dimensionamento:

- Cinemática: Considera as relações de movimento, relacionando distância, tempo, velocidade e aceleração.
- Estática: Considera a condição de equilíbrio entre os esforços aplicadas, estudando os elementos em repouso ou movimento uniforme.
- Dinâmica: Considera as forças envolvidas em sistemas em aceleração, tais como inércia e vibrações.

**Fabricação/Montagem/Teste/Monitoramento:** Geração de cronogramas de compra e recepção de material, sistemas, equipamentos, subconjuntos, partes e peças semiacabadas, cronogramas de fabricação, cronogramas de montagem, cronogramas de teste e entrega de equipamento ou instalação, relatórios e certificações de qualidade, segurança do trabalho, impacto ambiental.

A associação de engenheiros alemães, também conhecida como VDI (sigla em alemão: *Verein Deutscher Ingenieure*), desde da década de 70, elabora metodologias de projeto que contribuíram para o desenvolvimento da área. Em 1973, foi criada o guia VDI 2222, mostrado na FIG 2.7, com o título “Métodos de projeto de engenharia para a concepção de produtos industriais”. Em 1993, foi substituído pelo guia VDI 2221, mostrado na FIG 2.8, com

o título “Abordagem sistemática para o desenvolvimento e projeto de produtos e sistemas técnicos”. Ambos os guias atuavam principalmente no desenvolvimento de produtos mecânicos e foram utilizados como referência por muitas empresas e engenheiros.

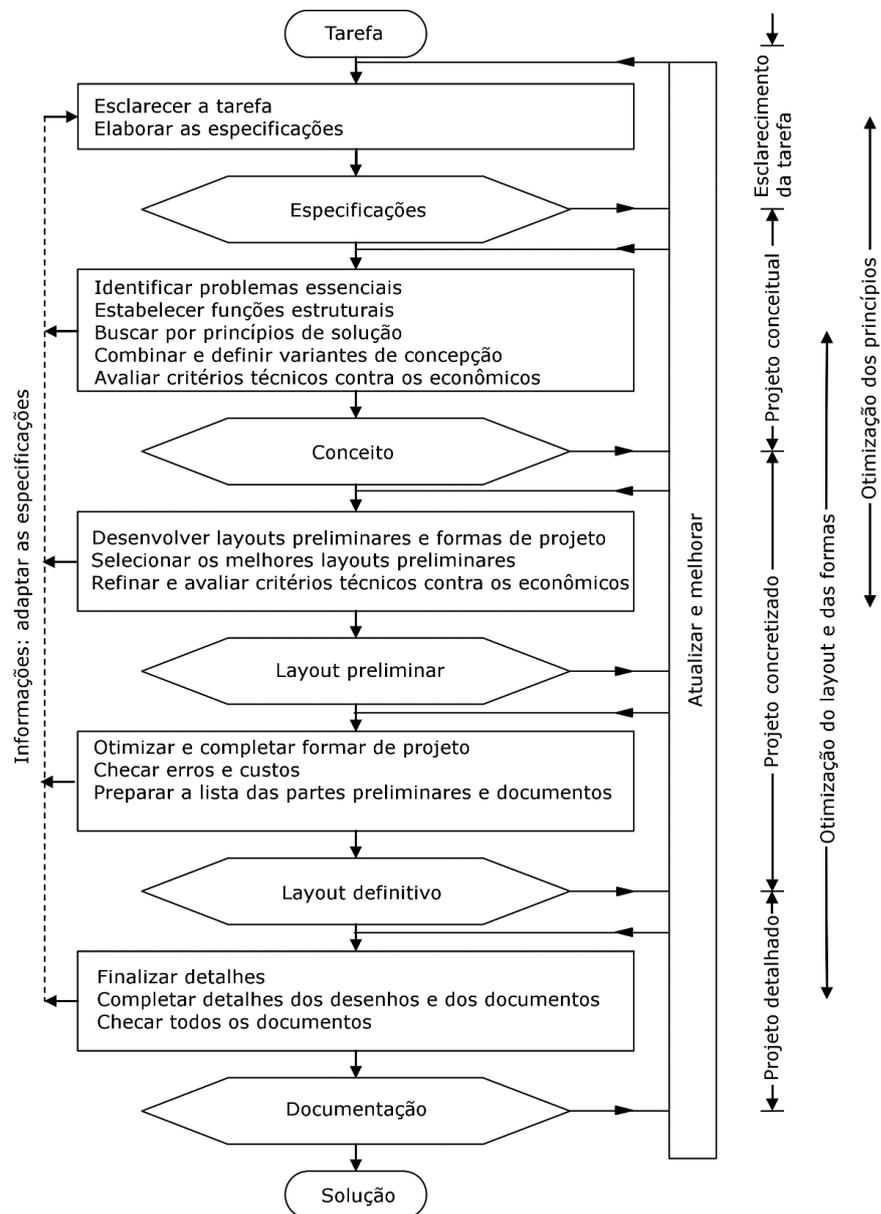


FIGURA 2.7 Guia VDI 2222 – Fonte: Birkhofer e Jansch (2006)

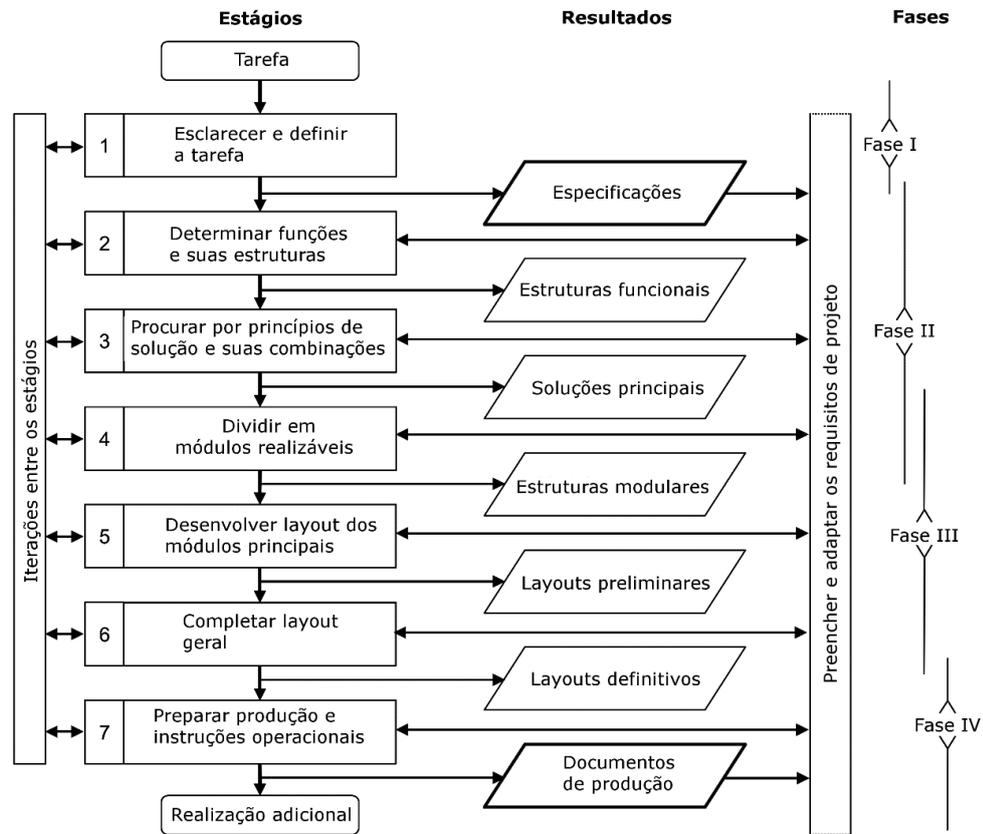


FIGURA 2.8 Guia VDI 2221 – Fonte: Birkhofer e Jansch (2006)

### 2.2.3 Metodologia de projeto de *hardware/software*

Nos projetos mecatrônicos, as áreas de eletroeletrônica e computação se fundem para formar sistemas de *hardware/software* que realizam a comunicação e a integração entre os componentes do projeto. *Hardware* (HW) é a parte física dos sistemas microprocessados, ou seja, é o conjunto de circuitos, componentes, e peças eletrônicas. Por outro lado, o *software* (SW) é a parte lógica do sistema, ou seja, manipulação, instrução, redirecionamento e execução das funções lógicas. Portanto, a partir da constatação da inseparabilidade desses dois conceitos, principalmente em projetos mecatrônicos, buscaram-se métodos, modelos e ferramentas de projeto voltados para o desenvolvimento simultâneo de HW/SW.

Com o crescimento da complexidade dos sistemas microprocessados (*Systems-on-Chip*), a comunidade de projeto tem pesquisado novas metodologias mais eficazes que permitam o aumento da produtividade e diminuição do tempo de projeto, (GAJSKI, PENG, *et al.*, 2003). A FIG 2.9 apresenta o histórico dos métodos de projeto de HW/SW.

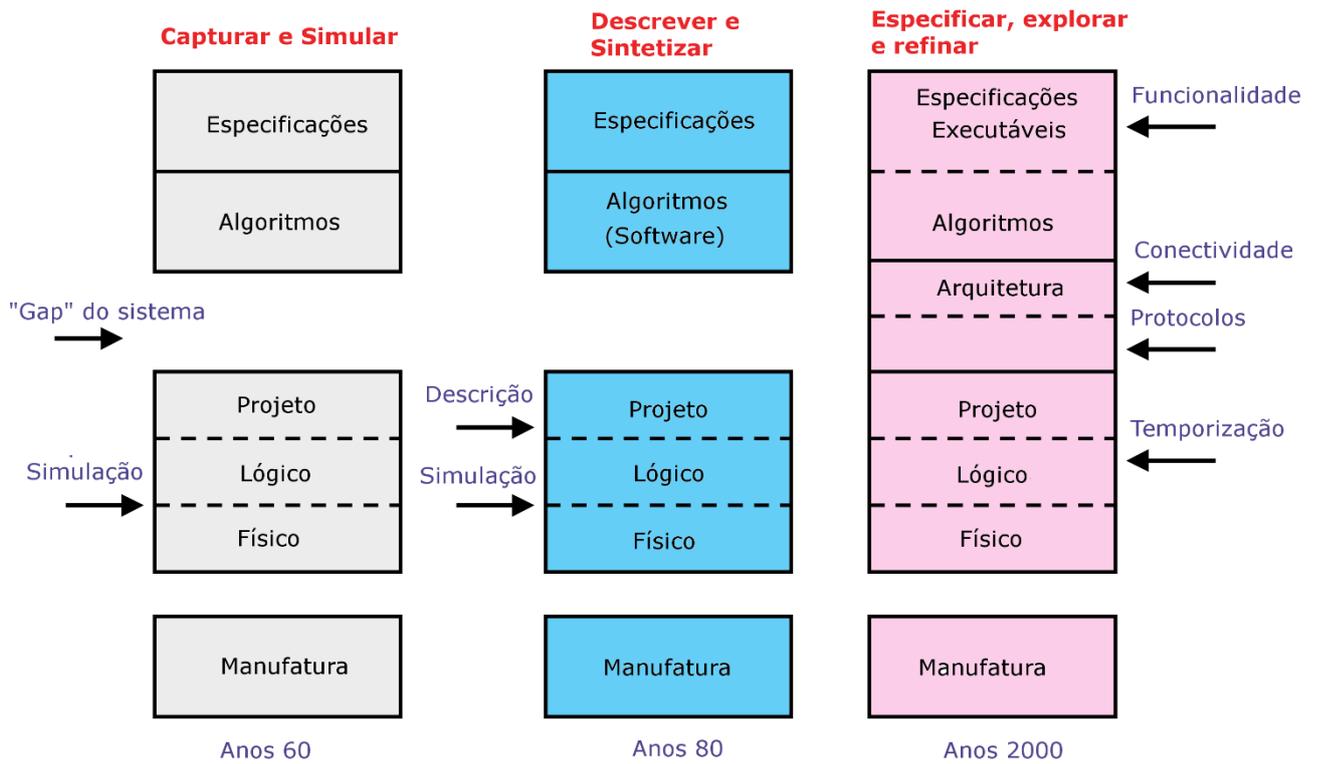


FIGURA 2.9 Histórico das metodologias de projeto de HW/SW – Fonte: Gajski et al. (2003)

O primeiro método apresentado é conhecido como *Capture-and-Simulate Methodology* e foi dominante entre os anos 60 e 80. Nesta metodologia, SW e HW são separados durante a concepção do projeto. Projetistas de SW testam alguns algoritmos e em seguida escrevem o documento de requisitos e especificações iniciais, que são passadas como informações para os projetistas de HW começarem a projetar com o diagrama de bloco. O problema é que os últimos não sabem se conseguiram satisfazer as especificações até que o nível lógico de projeto seja produzido. E apenas no final com a simulação, todos sabem se o sistema realmente está trabalhando conforme foi especificado, o que geralmente não ocorre. Dessa forma, a solução é alterar as especificações. O mito de que nunca é possível atender todas as especificações surgiu nos projetos dessa época. Levaram anos para perceberem que as especificações são independentes de suas implementações. O principal obstáculo para aproximar o indesejável “gap” entre HW e SW, responsável por essa situação, foi o próprio fluxo de desenvolvimento proposto pelo método.

O segundo modelo apresentado, conhecido como *Describe-and-Synthesize Methodology*, foi utilizado principalmente na década de 80, que trouxe a síntese lógica como novidade. A principal alteração no fluxo metodológico foi que os projetistas definiam inicialmente todas as especificações e as ferramentas de síntese e depois geravam a

implementação. Além disso, haviam dois modelos a serem simulados: de comportamento (funcional) e de portas lógicas (estrutural). Então, nesta metodologia, a especificação é definida antes da implementação e ambas podem ser simuladas. Adicionalmente, é possível verificar suas equivalências, pois elas podem ser reduzidas para a forma canônica. Na prática, os projetos atuais são muito grandes para esse tipo de conferência de equivalência.

O terceiro modelo apresentado, conhecido como *Specify, Explore-and-Refine Methodology*, foi utilizado nos anos 2000 e tentou diminuir o “*gap*” entre HW e SW descrito anteriormente. Inicia-se com as especificações executáveis que representam tanto o comportamento ou função do sistema quanto os modelos estruturais com ênfase em conectividade e protocolos de comunicação. Cada modelo é usado para provar alguma propriedade como, por exemplo, funcionalidade, conectividade e comunicação, e, quanto mais modelos forem considerados menor será o “*gap*”. Portanto, esta metodologia representa uma sequência de modelos em que cada um é um refinamento do anterior, por isso, pode ser vista como várias iterações da segunda metodologia apresentada. Logo, segue o processo natural de projeto onde projetistas especificam, primeiramente, a intenção e, em seguida, exploram as possibilidades e então refinam o modelo de acordo com suas decisões, (GAJSKI, PENG, *et al.*, 2003).

Entretanto, a dificuldade e a limitação na criação e simulação de modelos foram responsáveis pela investigação de outras metodologias de projeto. Nesse contexto, Gajski e Kuhn (1983) propuseram o Diagrama Y, também conhecido como Diagrama de Gajski-Kuhn, que assume que cada projeto, seja de qualquer complexidade, pode ser modelado em três óticas básicas: comportamental (funções, específica), estrutural (componentes, diagrama de blocos) e física (*layout*, placas, pacotes).

Neste diagrama, mostrado na FIG 2.10, é exibida uma representação composta por três eixos distintos centrados em uma origem, onde cada um dos eixos do gráfico representa uma diferente forma de visualização de um sistema microeletrônico. Ao longo dos eixos tem-se a representação do circuito em diferentes níveis de granularidade, ou seja, uma representação que varia de baixo nível de abstração, representado pela origem dos eixos, para alto nível, na medida que os eixos distanciam-se da origem. Neste diagrama, a origem dos eixos representa o sistema físico enquanto que os círculos concêntricos identificam pontos correspondentes de mesmo nível de abstração.

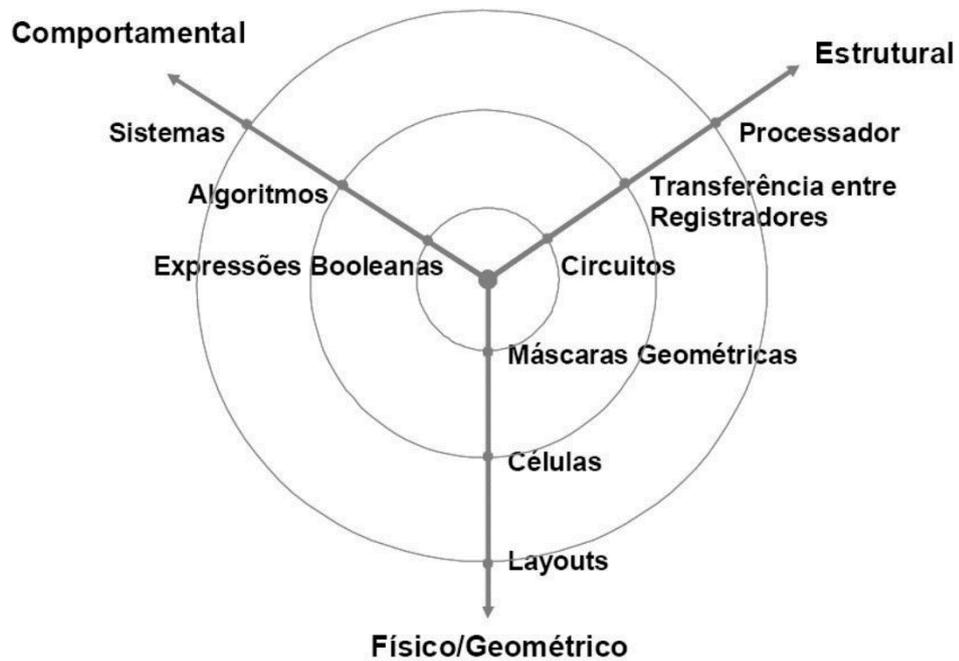


FIGURA 2.10 Diagrama Y proposto por Gajski e Kuhn (1983) – Fonte: Fernandes (2009)

Segundo Gajski e Kuhn (1983), cada uma das óticas possui características específicas e evidenciam aspectos distintos do projeto HW/SW em análise:

- **Representação Estrutural:** tem como foco a visualização dos componentes lógicos que constituem o sistema. Neste modo de visão tem-se a representação de componentes do circuito, tais quais, transistores, portas lógicas, registradores, memória, etc.
- **Representação Comportamental:** tem como foco a visualização das funções e especificações comportamentais, não sendo do interesse desta ótica nem a física geométrica nem os componentes lógicos que o implementam. Este modo pode ser visualizado, por exemplo, através de uma representação do sistema em forma de tabela verdade ou expressão booleana.
- **Representação Geométrica:** tem como objetivo representar a física geométrica do sistema. Neste modo de visão, tem-se comumente a representação do circuito em função de seus módulos que podem ser mapeados geometricamente no espaço, como células, *clusters*, partições físicas, *layout* de placas, etc.

Em projetos de *hardwares* eletrônicos há recente desenvolvimento de procedimentos prescritivos para o projeto, principalmente vinculados às técnicas de construção eletrônica como a utilização de *breadboards*, de protótipos em *wire-wrap*, ao processo de soldagem e defluxo, assim como à utilização de técnicas de roteamento e simulação de circuitos

através de sistemas CAD que permitem a produção de código CAM automaticamente, (HOROWITZ e HILL, 1999). Horowitz e Hill (1999) apresentam ainda uma série de elementos relacionados com segurança, resfriamento e proteção de circuitos impressos, os quais devem ser considerados quando da realização do projeto de equipamentos eletroeletrônicos.

Existem outros métodos de projeto utilizados principalmente no desenvolvimento de *software*. O modelo mais antigo foi conhecido como *stagewise* (BENNINGTON, 1956). Este modelo consiste em considerar que o *software* deve ser desenvolvido em estágios sucessivos (plano operacional, especificação operacional, especificação de codificação, codificação, testes paramétricos, testes de integração, organização e avaliação de sistemas).

O tratamento original do Modelo em Cascata sugere uma abordagem linear, sistemática e sequencial para o desenvolvimento de sistemas, acrescentando ao modelo *stagewise*, entre outras coisas, a possibilidade de voltar para a etapa precedente no caso de sistemas complexos, (ROYCE, 1970). A FIG 2.11 mostra o Modelo em Cascata proposto.

O *Vorgehensmodell*<sup>2</sup> (ou Modelo em “V”) proposto por Broehl e Droschel (1995) é uma variação do Modelo em Cascata, no qual a dependência entre as atividades de desenvolvimento e as atividades de verificação são mostradas explicitamente (FIG 2.12).

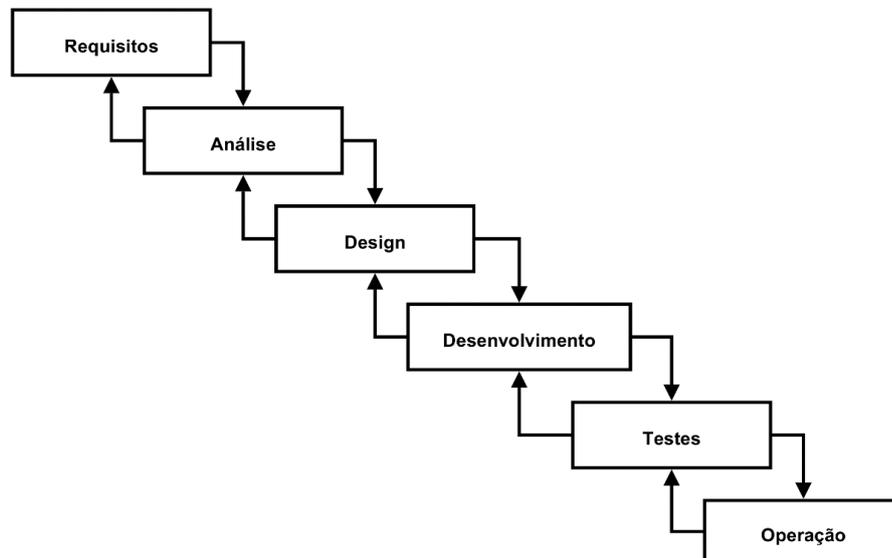


FIGURA 2.11 Método em Cascata ou “waterfall” proposto por Royce (1970).

A diferença entre o Modelo em Cascata e o Modelo em “V” é a noção de níveis de abstração. Todas as atividades, desde os requisitos até a implementação, consistem em ter uma representação cada vez mais detalhada do sistema, enquanto isso, paralelamente, cada nível de detalhe é verificado e testado, (FRANCO, 2007).

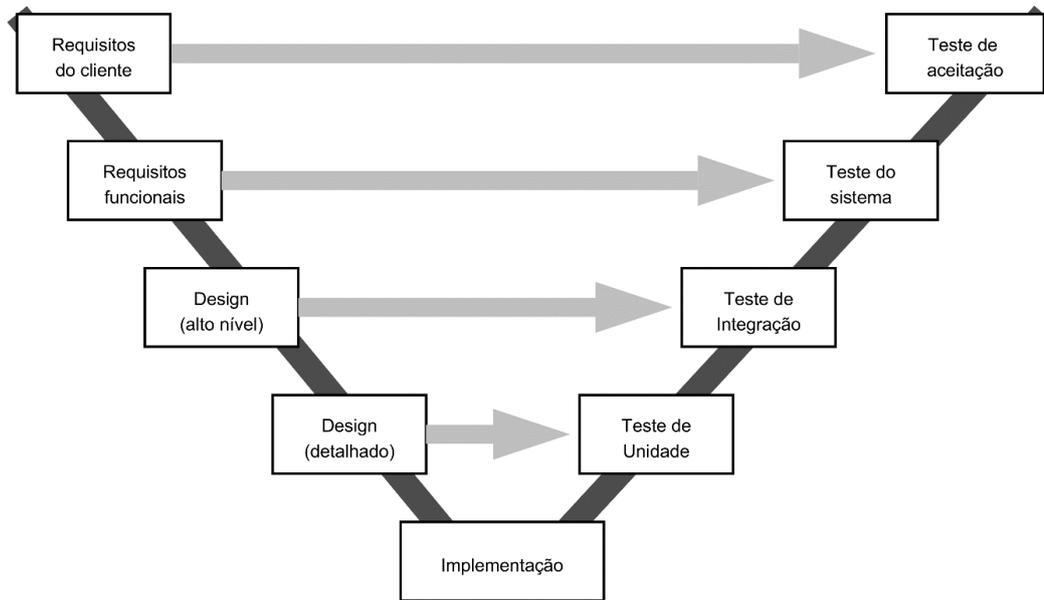


FIGURA 2.12 O *Vorgehensmodell*<sup>2</sup> (ou Modelo em “V”) proposto por Broehl e Droschel (1995).

O modelo Espiral proposto por Boehm (1986) é centralizado nas atividades que atacam a origem da falha do Modelo em Cascata, ou seja, resolve o problema de mudanças constantes do sistema. Este modelo é baseado nas mesmas atividades do Modelo em Cascata, incluindo algumas como análise de riscos, reutilização e prototipagem. Essas atividades extendidas são chamadas de ciclos. A representação deste modelo está na FIG 2.13, em que cada quadrante do modelo é uma fase a ser executada. Esta notação permite facilmente determinar a situação do projeto no tempo. A distância da origem é o custo acumulado pelo projeto, enquanto as coordenadas angulares indicam o progresso alcançado em cada fase.

A fase de requisitos no modelo Espiral é diferente de outros modelos de projeto, pois em cada fase, as atividades são identificadas explicitamente em alto nível. Estas fases incluem a comunicação com o cliente, o planejamento, a análise e a avaliação pelo cliente (verificação e validação). Um ponto positivo deste modelo é que na fase de requisitos está evidenciada a interatividade com o cliente durante todo o desenvolvimento do projeto e o artefato só será construído depois que foram feitas todas as análises possíveis (é claro que neste caso, o custo tende a aumentar). Este é o modelo mais robusto e adequado para sistemas em

larga escala e inspirou a criação dos modelos de desenvolvimento ágeis, que serão apresentados no subtópico de metodologias de gestão de projetos.

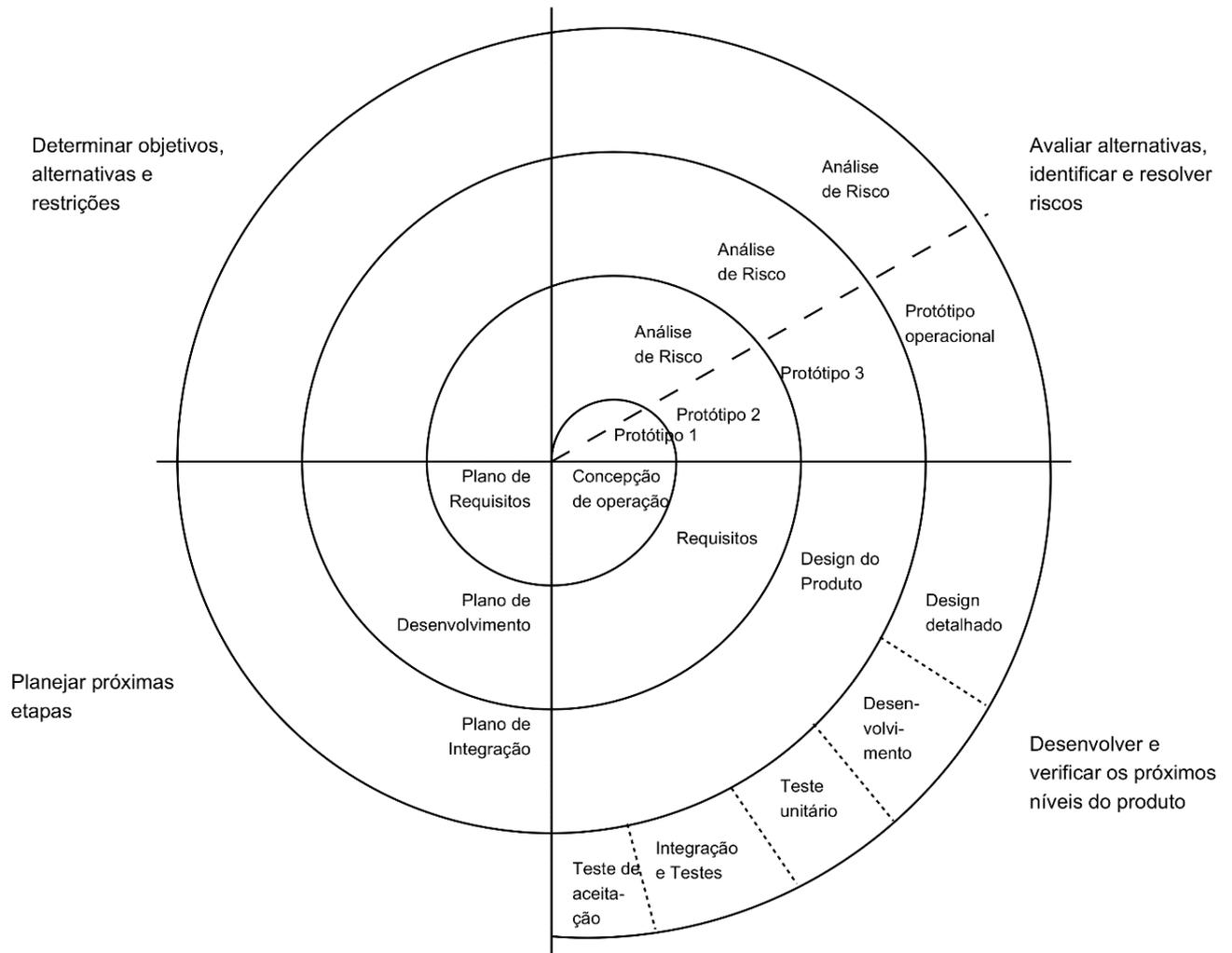


FIGURA 2.13 Representação do modelo Espiral proposto por Boehm (1986)

### 2.2.3 Metodologia de projeto de sistemas de controle

Segundo Dorf e Bishop (2009), sistema de controle é a interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada do sistema. Já Nise (2012) define como subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada. Ambas definições consideram como objetivo principal alterar a saída ou resposta do sistema a ser controlado de forma a satisfazer os requisitos do projeto. A própria definição semântica do verbo controlar é aplicada, pois controlar variáveis do processo é garantir que as mesmas irão possuir os valores e os comportamentos transitórios desejados. Dessa maneira, o

projeto de sistemas de controle é um exemplo específico de projeto de engenharia. O objetivo do projeto de engenharia de controle é obter a configuração, as especificações e a identificação dos parâmetros-chave de um sistema proposto a atender uma necessidade real. Portanto, assim como demais domínios da mecatrônica, para alcançar satisfatoriamente esse objetivo, será necessário projetá-los de forma eficiente.

Dorf e Bishop (2009) descrevem uma metodologia mostrada de projeto na FIG 2.14. A primeira etapa no processo de projeto consiste no estabelecimento dos objetivos do sistema. Por exemplo, pode-se definir que o objetivo é controlar a velocidade do motor de modo exato. A segunda é a identificação das variáveis que se deseja controlar (por exemplo, a velocidade do motor). A terceira etapa é escrever as especificações em termos da exatidão que deve ser conseguida. A exatidão de controle necessária leva então à identificação de um sensor para medir a variável controlada. As especificações de desempenho vão descrever como o sistema em malha fechada deve se comportar e irão incluir (1) boa regulação contra distúrbios, (2) resposta desejada aos comandos, (3) sinais de atuação realistas, (4) sensibilidade baixa e (5) robustez.

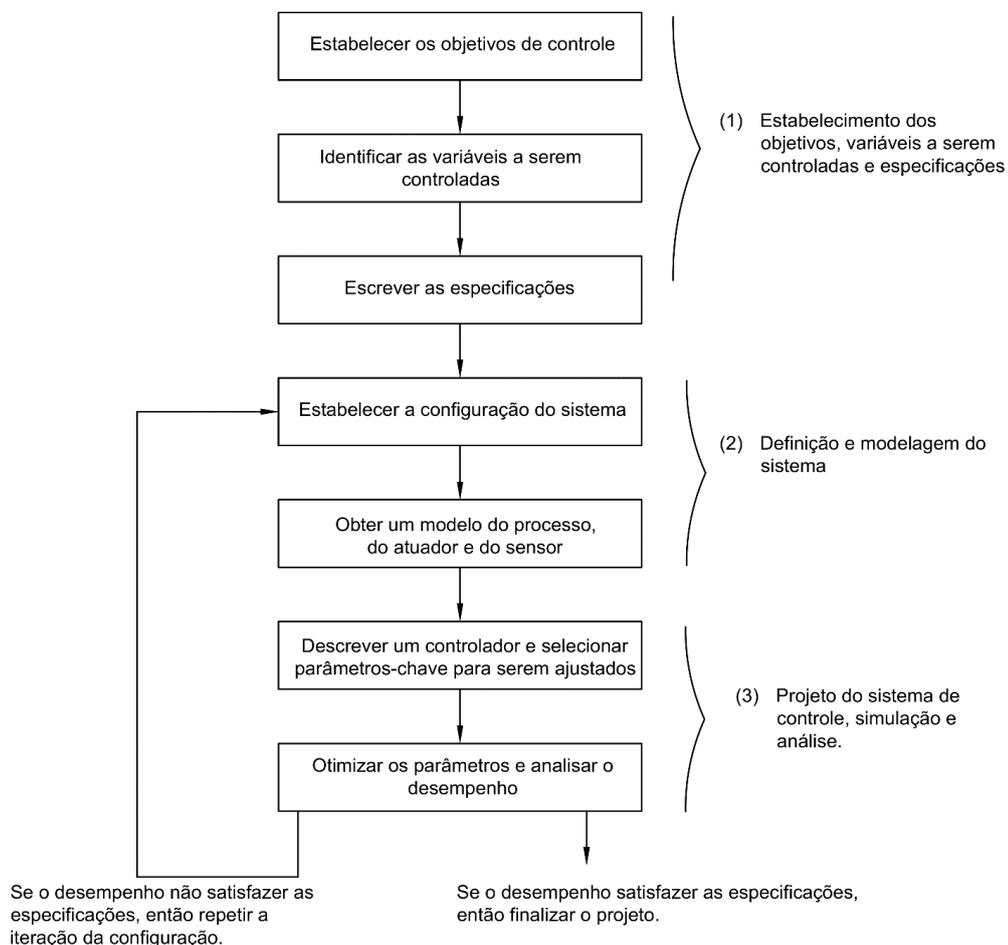


FIGURA 2.14 Metodologia de projeto de sistemas de controle proposto por Dorf e Bishop (2009).

Prossegue-se então em uma primeira tentativa para configurar um sistema que resultará no desempenho de controle desejado. Essa configuração de sistema irá consistir normalmente em um sensor, o processo a ser controlado, um atuador e um controlador. A etapa seguinte consiste em definir o atuador. Isto irá depender do processo a ser controlado, mas, a atuação escolhida precisa ser capaz de ajustar efetivamente o desempenho do processo. Então se obtém o modelo matemático do atuador e do sensor.

A etapa seguinte é a escolha de um controlador que será definido de acordo com a análise do sistema global em malha fechada, o qual frequentemente é modelado por uma função de transferência. A etapa final é o ajuste dos parâmetros do controlador para atingir o desempenho desejado. Caso não seja possível apenas pelo ajuste, será necessário o estabelecimento de uma configuração melhorada do sistema e provavelmente a escolha de um sensor e de um atuador melhores, (DORF e BISHOP, 2009).

Em resumo, o problema de projeto de controlador é: dado um modelo do sistema a ser controlado (incluindo seus sensores e atuadores) e um conjunto de objetivos de projeto, encontrar um controlador adequado. Idealmente, o projetista precisa considerar a física por trás da planta sob controle, a estratégia de controle, a arquitetura de projeto do controlador (ou seja, que tipo de controlador será empregado) e estratégias efetivas de sintonia do controlador. Além disso, uma vez que o projeto esteja completo, o controlador é frequentemente implementado em *hardware*, que, por sua vez, também deverá ser considerado no projeto, tornando o problema ainda mais desafiador.

Outra metodologia de projeto de sistemas de controle relevante é apresentada por Nise (2012), que consiste em 6 passos descritos a seguir.

- 1) Transformar requisitos em um sistema físico: Inicia-se pela interpretação do problema de controle, ou seja, determina qual serão os sistemas físicos envolvidos para atender os requisitos e especificações do projeto.
- 2) Desenhar um diagrama de blocos funcional: Traduz-se a descrição qualitativa do sistema em um diagrama de blocos funcional que descreve as partes constituintes do sistema (isto é, função e/ou dispositivo) e mostra suas interconexões.
- 3) Criar um esquema: Após produzir a descrição do sistema físico, o projetista o transforma em um diagrama esquemático. Nessa fase são realizadas as aproximações e simplificações, ou seja, despreza-se alguns fenômenos e peculiaridades do sistema de forma a torná-lo menos complexo. As decisões

tomadas no desenvolvimento do esquema se baseiam no conhecimento do sistema físico, nas leis físicas que governam o comportamento do sistema e na experiência prática.

- 4) Desenvolver um modelo matemático: Uma vez que o sistema esteja pronto, utiliza-se leis físicas, em conjunto com hipóteses simplificadoras, para modelar o sistema matematicamente. Além da equação diferencial, a função de transferência é outra maneira de se modelar matematicamente um sistema. O modelo é obtido a partir da equação diferencial linear invariante no tempo, utilizando-se a chamada transformada de Laplace. Embora a função de transferência possa ser utilizada apenas para sistemas lineares, ela fornece informações mais intuitivas do que a equação diferencial. Outro modelo é a “representação no espaço de estados”. Uma vantagem desse método é que ele pode ser utilizado em sistemas que não podem ser descritos por equações diferenciais.
- 5) Reduzir o diagrama de blocos: Para avaliar a resposta do sistema, realiza-se a sua redução para um único bloco que represente o sistema da sua entrada para sua saída. Uma vez reduzido, inicia-se o processo de análise e projeto.
- 6) Analisar e Projetar: Nesta etapa, analisa-se o sistema para verificar se as especificações de resposta e os requisitos de desempenho podem ser atendidos por simples ajustes nos parâmetros do controlador. Pode ser utilizado plataformas CAE (*Computer Aided Engineering*) para realizar a simulação das respostas do sistema. Além disso, de acordo com as características do problema, são selecionadas técnicas e métodos de projeto e sintonia de controlador.

### **2.3 Metodologia de gerenciamento de projetos**

Um projeto é definido como uma série de atividades relacionadas que visam gerar uma saída principal e necessitam de um período para sua realização, (DAVIS, AQUILANO e CHASE, 2001). Cada projeto é único, temporário, necessita de recursos e visa atender a um cliente com determinada entrega, (MATTOS e GUIMARÃES, 2005). O projeto pode ser dividido em qualquer número de fases, sendo que cada fase é um conjunto de atividades relacionadas com o intuito de concluir uma entrega. As fases podem ser relacionadas entre si de diferentes formas, conforme exposto abaixo (PMI, 2013):

- Relação sequencial: Indica que uma fase é seguida por outra, sendo que a primeira deve ser totalmente concluída antes do início da próxima.
- Relação sobreposta: Indica que a atividade iniciada mais tarde pode iniciar antes do término da atividade anterior, criando uma sobreposição nas fases.

Quando relacionadas, as fases formam uma cadeia de processos a serem seguidos para o andamento do projeto. Este conjunto de fases é conhecido como ciclo de vida de projeto e existem diferentes tipos, conforme segue:

- a) Preditivos: São aqueles nos quais o escopo, o tempo e o custo exigidos para a entrega do projeto são definidos o mais cedo possível. Este ciclo de vida é preferível quando o produto a ser entregue é bem compreendido e só é efetivo quando completo.
- b) Iterativos e incrementais: São aqueles em que fases do projeto repetem atividades do projeto, conforme evolução do entendimento do produto. Cada iteração (repetição de atividade) adiciona funcionalidades ao produto final do projeto e durante cada uma delas todas as atividades do gerenciamento de projetos são executadas, concluindo uma entrega ao final. Entre cada iteração há a incorporação de lições aprendidas na iteração anterior e há um detalhamento maior do produto a ser entregue, de forma a adicionar funcionalidades significativas em cada uma das iterações. Esta abordagem traz vantagens em casos nos quais o escopo não é totalmente conhecido desde o início do projeto ou quando entregas parciais representem retornos.
- c) Adaptativos: São projetados para reagir a altos níveis de mudança e envolvimento contínuo das partes interessadas. Estes ciclos são iterativos e incrementais, mas com iterações muito rápidas (normalmente levam de 2 a 4 semanas), mantendo-se fixos os recursos e o tempo. Todas as características esperadas do produto a ser entregue são listadas em um documento, utilizado como base para priorizar o que deverá ser entregue a cada iteração. Ao final de cada iteração, o usuário deve validar a entrega (não necessariamente aceita-la) para conduzir a próxima iteração, informando quais são as próximas funcionalidades a serem incluídas, sempre baseado no que está documentado.

O gerenciamento de projetos é o conjunto de ações para estabelecer um plano que guiará o andamento do projeto e, em seguida, executá-lo, (CLEMENTS e GIDO, 2007). Sua

utilização em empresas proporciona melhores resultados e custos reduzidos, (AMARAL e CONFORTO, 2007).

O planejamento adequado do escopo do projeto permite definir as fronteiras do projeto e o documento de escopo deve estar bem definido, claro e objetivo, (IPMA, 2006). Ainda segundo o IPMA (2006), caso as adições e subtrações de atividades ou entregas no escopo não estiverem documentados adequadamente, os resultados tendem a fugir do controle, não atendendo os requisitos de sucesso do projeto.

Segundo Kerzner (1984), o planejamento do projeto inclui a definição do trabalho a ser desenvolvido, da quantidade de trabalho e dos recursos necessários para executá-lo. Adicionalmente, inclui a definição de objetivos e metas por meio do planejamento e controle das ações, atividades e tarefas necessárias para concluir o projeto com êxito. Essa relação entre definição, planejamento e controle é ilustrada na FIG 2.15, (VERZUH, 2000). A seguir serão apresentados os principais métodos e guias de gerenciamento de projetos utilizados atualmente.

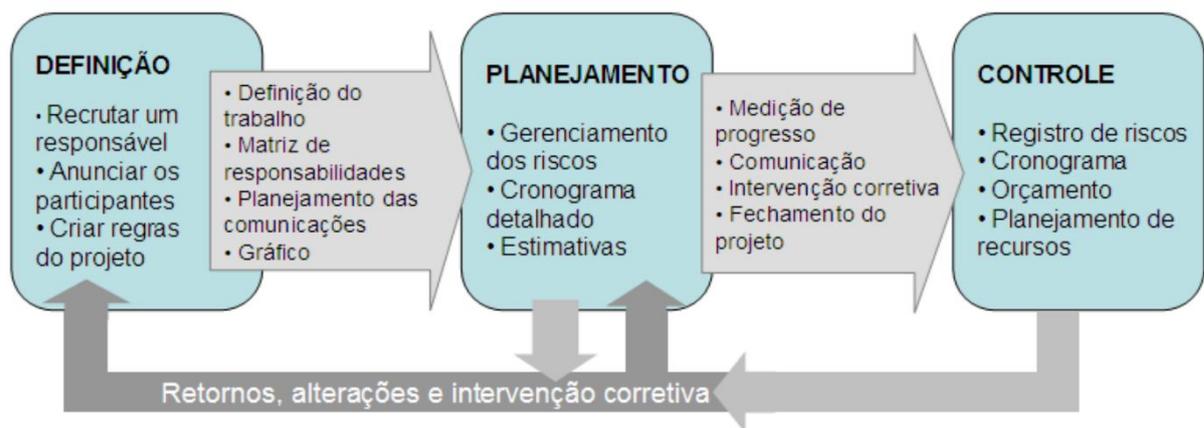


FIGURA 2.15 As três funções da gestão de projetos – Fonte: Verzuh (2000)

### 2.3.1 PMBOK

O PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*) é um guia que apresenta uma série de práticas recomendadas na área de gerenciamento de projetos. Foi apresentado em 1981 pelo PMI (*Project Management Institute*), uma entidade internacional sem fins lucrativos, que reúne diversos profissionais da área de gerenciamento de projetos em todo o mundo. No PMBOK encontra-se as principais diretrizes para o gerenciamento de projetos, sendo este constantemente atualizado. É importante salientar que o PMBOK não apresenta um modelo para realizar o gerenciamento de projetos, como o faz, mas sim práticas gerais que podem ser aplicadas em qualquer modelo (PMI, 2013).

O PMBOK é dividido em dez áreas de conhecimento que são necessárias no gerenciamento de projetos. Cada uma das áreas trata do gerenciamento de:

- a) Integração: é a área do conhecimento responsável pela conexão de todos os elementos do projeto de forma que tudo se desenvolva de forma organizada e conforme planejado.
- b) Escopo: é a área de conhecimento que garante que todo o trabalho exigido, e somente este, seja aplicado para a completude do projeto.
- c) Tempo: trata do cumprimento de atividades para atendimento do prazo estipulado para o projeto. É importante definir atividades, sequenciá-las, estimar recursos para executá-las, estimar duração de cada uma das atividades, desenvolver e controlar o cronograma.
- d) Custos: agrega processos de planejamento, estimativa, orçamento e controle de custos, de modo que o projeto possa ser terminado dentro do orçamento aprovado. O gerenciamento de custos é possibilitado através de planejamento, estimação dos custos, determinação do orçamento e controle.
- e) Qualidade: é importante para garantir que as expectativas em relação ao projeto sejam atendidas e pode utilizar diversas normas para estabelecer um padrão. Deve haver um planejamento de qualidade, além de garantia e controle da qualidade.
- f) Comunicação: garante que todos os principais envolvidos e processos troquem informações de forma a garantir a integração e esclarecimentos necessários para o sucesso do projeto.
- g) Riscos: podem representar ameaças ou oportunidades que, quando ocorrem, influenciam de forma negativa ou positiva o projeto. Para lidar com os riscos há o gerenciamento de riscos, que envolve planejamento, identificação de quais são esses riscos, análise quantitativa e qualitativa destes, planejamento de resposta, monitoramento e controle. Riscos podem se repetir em um mesmo projeto ou aparecerem igualmente em projetos diferentes.
- h) Aquisições: descreve a área de conhecimento que trata de compras e aquisições de produtos, serviços ou resultados importantes para a realização do projeto. Deve haver um planejamento de compras, aquisições e contratações, seleção de fornecedores, administração e encerramento de contratos.

- i) Partes interessadas: garante que sejam mapeadas todos as pessoas que possuam interesse no projeto e seus resultados.

Para cada uma das áreas de conhecimento apresentadas, o PMBOK estabelece alguns grupos de processos padronizados através dos quais o projeto pode evoluir em cada uma das áreas de conhecimento. Os grupos de processos são:

- Iniciação: preparação para andamento da fase do projeto em questão.
- Planejamento: definição e refinamento de objetivos, definindo como o projeto deve seguir.
- Execução: garantia de que o planejamento realizado na fase anterior ocorra conforme esperado, integrando os recursos necessários para tal.
- Monitoramento e controle: identificação de variações do gerenciamento, providenciando ações corretivas ou replanejamentos conforme necessário.
- Encerramento: formalização da aceitação, concluindo uma fase, iniciando uma próxima, caso exista, ou até mesmo concluindo o projeto como um todo.

Essa abordagem para o gerenciamento de projetos ficou conhecida como “tradicional”, por ter sido amplamente utilizada em diversas áreas e tipos de projetos, durante muito tempo. É baseada em uma visão processual e propõe grande enfoque em planejamento, sendo uma abordagem preditiva na qual se espera algum conhecimento prévio do que virá a acontecer ao longo do projeto.

### **2.3.2 PRINCE2®**

O PRINCE2® (ACCT) é um modelo para o gerenciamento de projetos, que apresenta planejamento, delegação, acompanhamento e controle de todos os aspectos do projeto e da motivação das pessoas envolvidas, a fim de atingir objetivos de desempenho esperado para o tempo, custo, qualidade, escopo, riscos e benefícios. Esse modelo surgiu em 1996, como evolução do PRINCE (*Projects in controlled environments*), apresentado em 1989 pela ACCT (Agência de Computação Central e Telecomunicações) do governo do Reino Unido e rapidamente foi disseminado, o qual contribuiu com mais de 150 organizações europeias, (OCG, 1996).

Esta metodologia de gerenciamento de projeto é adaptável a qualquer tipo ou tamanho de projeto e cobre gerenciamento, controle e organização. Um projeto PRINCE2® tem as seguintes características, (CARVALHO, 2015):

- Controle e organização do início ao fim;
- Revisão de Progressos baseados nos planos e no *business case*;
- Pontos de decisão flexíveis;
- Gerenciamento efetivo de qualquer desvio do plano;
- Envolvimento da gerência e das partes interessadas em momentos-chave durante toda execução do projeto;
- Um bom canal de comunicação entre o time do projeto e o restante da organização.

A estrutura do PRINCE2®, mostrada na FIG 2.16, aborda o gerenciamento de projetos com quatro elementos integrados:

1. **Princípios:** São as obrigações de orientação e boas práticas que determinam se o projeto realmente deve ser gerido utilizando a metodologia. Os princípios são:
  - Justificativa contínua do negócio (*Business Case*).
  - Aprender com a experiência.
  - Papéis e responsabilidades definidos.
  - Gerenciamento por estágios.
  - Gerenciamento por exceção.
  - Foco no produto.
  - Adequação ao ambiente do projeto.
2. **Temas:** Descrevem aspectos do gerenciamento de projetos que devem ser abordados de forma contínua e em paralelo ao longo do projeto. Os temas são:
  - Business Case: Forma de avaliar e apresentar viabilidade e vantagens do projeto, visando apoiar decisões de investimentos.
  - Organização: Estrutura organizacional para o projeto, definindo papéis e responsabilidades aos participantes do projeto.
  - Qualidade: Certificação de que os produtos entregues pelo projeto estão de acordo com a solicitação inicial.
  - Plano: Facilitação do controle e comunicação no projeto. Define o produto a ser entregue, atividades relacionadas e como devem ser realizadas. Define ainda os recursos, tempo e envolvidos em cada atividade. Identifica sinergia entre diferentes atividades e indica pontos de monitoramento e controle.

- Risco: Controle dos riscos que podem influenciar negativa ou positivamente o projeto.
  - Mudança: Análise e avaliação de impactos causados por mudanças no decorrer do projeto.
  - Progresso: Acompanhamento de todo o progresso do projeto, com previsão de alterações e controle de desvios.
- 3. Processos:** Descrevem uma progressão passo a passo através do ciclo de vida do projeto, do início ao fim. Cada processo fornece listas de verificação de atividades recomendadas, produtos e responsabilidades relacionadas. Os processos são:
- *Starting Up a Project (SU)* – Iniciando o projeto: prevenção do início de projetos mal concebidos e garantia de início de projetos com bom retorno de investimento.
  - *Directing a Project (DP)* – Dirigindo o projeto: delegação das atividades e autorizações para a evolução do projeto. Atividades relacionadas a este processo são: autorizar o início do projeto, o projeto em si, o plano de estágio e execução e autorizar o fechamento do projeto
  - *Initiating a Project (IP)* – Iniciando o projeto: estabelecimento da estrutura do projeto, deixando claro qual trabalho tem de ser realizado para que seja concluído. As atividades relacionadas são: preparar a estratégia de gerenciamento da qualidade e gerenciamento de comunicação, configurar o controle de projetos e criar o plano do projeto.
  - *Managing a Stage Boundary (SB)* – Gerenciando o estágio limite: comunicação do andamento do projeto, identificando o término e início de fases para todos os envolvidos.
  - *Controlling a Stage (CS)* – Controlando o estágio: distribuição e divisão do trabalho, monitoramento do projeto e tomada de ações corretivas conforme necessário. As atividades são: autorizar pacotes de trabalho, rever o estado destes pacotes periodicamente, receber pacotes concluídos e emitir relatórios a respeito.
  - *Managing Product Delivery (MP)* – Gerenciando a entrega de produtos: controle da ligação entre o gerente de projetos e o gerenciamento das equipes envolvidas no projeto

- *Closing a Project (CP)* – Encerrando o projeto: reconhecimento dos resultados, identificando se as solicitações iniciais do projeto foram atendidas. É o ponto final de confirmação da aceitação do projeto. As atividades relacionadas são: avaliar o projeto, entregar os produtos e preparar o encerramento do projeto.
4. **Adaptação ao Meio Ambiente:** Este capítulo aborda a necessidade de adequar o PRINCE2® ao contexto específico do projeto. PRINCE® não é uma solução “one size fits all” e sim uma estrutura flexível que pode ser facilmente adaptada a qualquer tipo ou tamanho de projeto

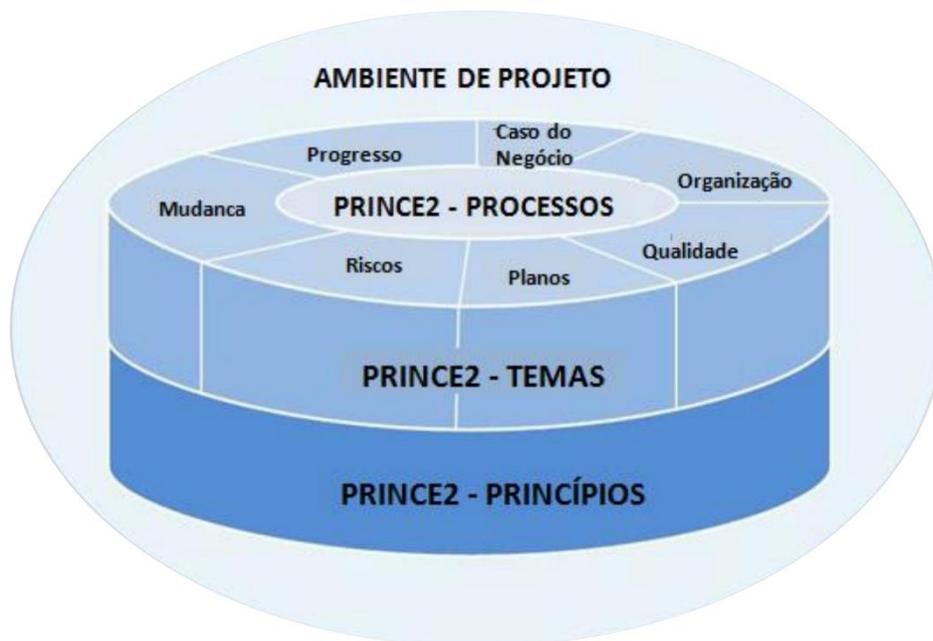


FIGURA 2.16 Estrutura do método PRINCE2® – Fonte: Carvalho (2015)

### 2.3.3 Gerenciamento ágil de projetos - Método SCRUM

A evolução da gestão de projetos encontra-se em um novo estágio, em que as técnicas e métodos, ditos tradicionais, começaram a ser questionados. Em especial quando aplicadas no contexto atual de empresas que desenvolvem projetos que envolvem inovação, elevados níveis de complexidade e dinamismo, (PERMINOVA, GUSTAFSSON e WIKSTRÖM, 2008).

De acordo com o estudo de Collyer (2008), o dinamismo é uma das muitas dimensões de um projeto. Sua importância deve-se ao seu significado, onde, em um projeto, descreve-se como o elevado nível de incerteza e quantidade de mudanças no ambiente de

projetos, levando a mudanças constantes de escopo, por exemplo. O autor argumenta que sua importância é exponencialmente crescente, pois é comum em projetos que envolvem novas tecnologias ou desenvolvimento de produtos inovadores.

A partir dessa constatação, começa a surgir na literatura propostas de abordagens de gerenciamento de projetos, alternativas ao modelo tradicional, para o desenvolvimento de produtos inovadores em ambientes dinâmicos de projeto. São várias as denominações utilizadas pelos autores: “*Flexible*” (SMITH, 2007); “*Adaptative*” (SHENHAR e DVIR, 2007); “*Iterative*” e “*Extreme*” (WYSOCKI e MCGARY, 2003); “*Lean*” (LEACH, 2005); “*Agile*” (HIGHSMITH, 2004). Neste texto, emprega-se o termo “abordagem ágil” (*Agile Project Management*) para se referir a essas diferentes abordagens.

Chin (2004) ilustra as limitações da abordagem tradicional frente à abordagem ágil por meio da FIG 2.17. A figura foi adaptada para mostrar que a plataforma de gestão tradicional de projetos apresenta uma redução na sua eficiência quando aplicados em projetos com elevado número de incertezas, com equipes pequenas e co-localizadas, e elevado nível de interação entre os membros da equipe de projeto e clientes. Ela representa a plataforma tradicional, isto é, aquela que atende aos requisitos de projetos em ambientes cujas variáveis relacionadas ao desenvolvimento de projeto são conhecidas e podem ser antecipadas ou, ao menos, previstas.

Na plataforma ágil, representada no lado direito da FIG 2.17, a menor quantidade de “tijolos” significa uma quantidade reduzida de padrões e de pessoas envolvidas no projeto. O autor argumenta que o envolvimento da equipe e utilização de técnicas simplificadas com enfoque no desenvolvimento da auto-gestão, melhor se adequam a esses ambientes onde incertezas e mudanças predominam.

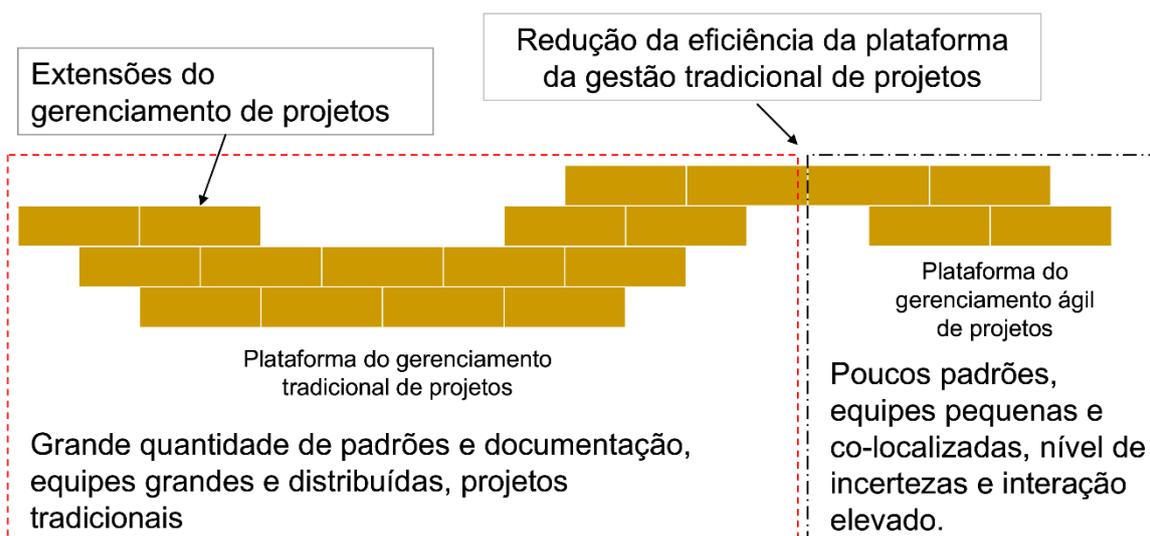


FIGURA 2.17 Relação entre a plataforma de gerenciamento de projeto tradicional e ágil – Fonte: Chin (2004)

A definição, a seguir, foi elaborada por Conforto (2009) que se baseou na literatura existente sobre o tema:

O gerenciamento ágil de projetos é uma abordagem fundamentada em um conjunto de princípios, cujo objetivo é tornar o processo de gestão de projetos simples, flexível e iterativo. Busca adaptar as práticas de gestão de projetos existentes para aplicação em ambientes dinâmicos de projetos com especificidades regidas pela inovação, elevados níveis de incertezas e complexidade.

Como exemplo de um modelo de gerenciamento ágil amplamente utilizado, principalmente na área de *software*, pode-se destacar o SCRUM, que se concentra em descrever como os membros da equipe devem trabalhar para produzir um sistema flexível, num ambiente de mudanças constantes. Assim, é indicado para projetos que envolvam complexidade e inovação, em que é impossível prever tudo o que vai ocorrer, características estas comuns no desenvolvimento de sistemas mecatrônicos, com diversas variáveis (ambientais e técnicas) que possuem grande probabilidade de mudar durante a execução do projeto.

O método oferece um *framework* (caixa de ferramentas) e um conjunto de práticas que tenta contornar essa situação de imprevisibilidade. Isso permite aos praticantes do SCRUM, ilustrado na FIG 2.18, saber exatamente o que está acontecendo ao longo do projeto e fazer os devidos ajustes para mantê-lo se movendo ao longo do tempo, visando atender seus objetivos, (SCHWABER, 2004).

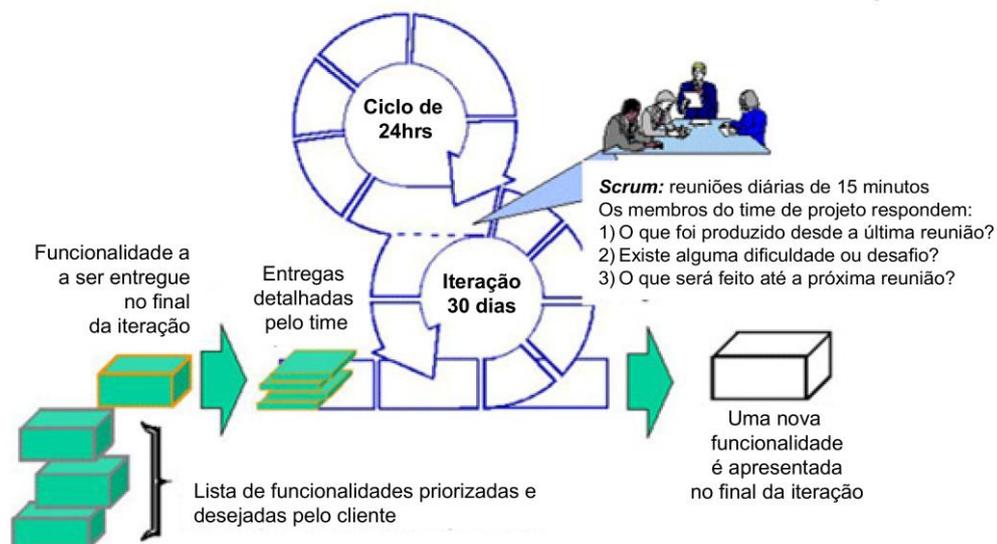


FIGURA 2.18 Ilustração do método SCRUM – Fonte: Schwaber (2004) (adaptado)

As iterações segundo essa metodologia contemplam ciclos de desenvolvimento com duração média de 30 dias, com a existência de reuniões rápidas a cada 24 horas para acompanhamento do que foi realizado. Normalmente são discutidos o progresso do trabalho e as dificuldades, os desafios encontrados e o que se espera como resultado para a próxima reunião. A cada término de uma iteração, é preciso entregar um resultado, podendo ser uma nova funcionalidade, um documento, resultados de testes, etc.

Schwaber (2004) descreve algumas das etapas de um projeto que utiliza como guia o método SCRUM. O projeto tem início com uma visão do sistema a ser desenvolvido, seguido da formulação de um plano de entregas que inclui uma lista de itens a serem trabalhados. A lista é priorizada segundo os requisitos que são prioritários ao cliente e conseqüentemente irão agregar maior valor. Após a priorização, todo o trabalho é dividido em *sprints* (podendo ser chamado de iterações) com duração prevista de 2 a 4 semanas. São realizadas reuniões diárias de curta duração (em média 15 minutos) chamadas de “*daily Scrum*”, a cada término de um *sprint*. Nessas reuniões diárias são apresentados os resultados do *sprint* finalizado para o responsável do produto, equipe de projeto e cliente. Em seguida, um novo *sprint* é planejado e o processo se reinicia.

## **2.4 Processo de desenvolvimento de produtos (PDP)**

Foram apresentadas nas seções anteriores a metodologia de projeto sob dois aspectos: da engenharia de desenvolvimento e gerencial. Conforme foi mostrado, o primeiro aspecto varia de acordo com a área do conhecimento no qual o projeto está inserido, apesar de conter pontos comuns relacionados com a DTM (teoria geral de projeto). Por outro lado, o segundo aspecto, por possuir uma visão mais macro e global, é considerado mais generalista e pode ser aplicado a qualquer tipo de projeto, com foco na administração dos recursos. Ambos aspectos, em situações e momentos diferentes, são aplicados no processo de desenvolvimento de produtos.

### **2.4.1 Definições do PDP**

Pugh (1991) apresenta a seguinte definição para o PDP:

“[...] É atividade sistemática necessária, da identificação de necessidades de mercado/usuário até a venda do produto que atenda com êxito àquela necessidade – uma atividade que abrange produto, processo, pessoas e organização.”

O autor discute em seu trabalho as diferenças entre projeto parcial (*partial design*) e projeto total (*total design*), este último sendo o próprio processo de desenvolvimento de produtos. O projeto parcial tem foco no desenvolvimento técnico de um novo produto. Por outro lado, o projeto total seria um processo vinculado à identificação, projeto e atendimento das necessidades de mercado.

Clark e Fujimoto (1991) ampliaram o conceito de Pugh (1991), ao analisarem a variável tecnológica, e definiram PDP como:

“[...] é o processo pelo qual uma organização transforma dados sobre oportunidades de mercado e possibilidades técnicas em informações de valor para a produção comercial.”

Percebe-se que essa definição trata o resultado do desenvolvimento como um conjunto de informações a serem utilizadas na produção do produto. Adicionalmente, afirma implicitamente que oportunidades de mercado vão ocorrer pelo monitoramento das tecnologias existentes.

Com um escopo temporal para o PDP, Cooper (1993), apresenta a seguinte definição:

“[...] um modelo formal, mapa, template ou processo pensado para orientar um projeto de novo produto do estágio de ideias até depois do seu lançamento.”

Além disso, Cooper (1993) introduziu o conceito *stage-gate*, no qual defende que o PDP deve ser entendido como um balanceamento adequado de atividades realizadas nos estágios (fases) com decisões efetivas realizadas entre eles (*gates*). A seguir serão apresentados alguns dos principais modelos de PDP existentes na literatura.

Segundo Barbalho (2006), em suma, o PDP pode ser entendido como um processo definido como um processo:

- cujo cerne é definido pela identificação, projeto e atendimento das necessidades do mercado;
- que transforma informações de mercado e tecnologia em produtos que atendam às demandas dos consumidores;
- cujo resultado é constituído por informações importantes para a produção comercial do produto;

- no qual há fases interligas por decisões que direcionam o fluxo de atividades a serem realizadas em cada projeto;
- cujo escopo temporal é delimitado pelo ciclo de vida de um produto;
- no qual um grande conjunto de atores organizacionais interage para a realização das atividades que o caracterizam;
- operacionalizado através de projetos;
- que comporta um conjunto de atividades centrais sem as quais não é possível projetar um novo produto;
- no qual ocorrem ciclos de interação entre atividades de fluxos distintos.

## 2.4.2 Modelos PDP

### 2.4.2.1 Modelo proposto por Prasad (1996)

Prasad (1996) entende o PDP como um processo de fluxos e ciclos (*tracks and loops*) interativos. O autor identifica no PDP uma série de fluxos paralelos cuja interatividade seria função da aplicação do conceito de engenharia simultânea. Os fluxos essenciais seriam: missão, planejamento, projeto, processo, produção, manufatura/montagem e entrega/serviços. Segundo o autor:

“[...] em situações reais, interações entre dois ou mais destes fluxos paralelos ocorrem... Um ciclo com designação 1-T indica interações que ocorrem dentro de um mesmo fluxo. Uma designação 2-T indica que ciclos e interações ocorrem entre dois fluxos paralelos. Similarmente, uma designação 3-T significa que existem interações entre ao menos três fluxos paralelos. Dependendo do tipo de produto, sua complexidade e a condição organizacional da empresa, uma série destes ciclos 2T e 3T podem ser executados para que se chegue ao produto final.”

A FIG 2.19 ilustra o conceito discutido por Prasad (1996) no trecho acima. Os fluxos são as barras horizontais no centro da figura. Os ciclos 2T são ilustrados como círculos ovais que englobam conjuntos de duas barras horizontais paralelas, enquanto os ciclos 3T são representados por círculos maiores que abrangem conjuntos de três barras paralelas. Por exemplo, o ciclo de “engenharia” ocorre quando há interação entre atividades relacionadas com os fluxos de “projeto” e de “processo”. De maneira similar, o “ciclo de projeto” ocorre nas interações entre planejamento, projeto e processo.

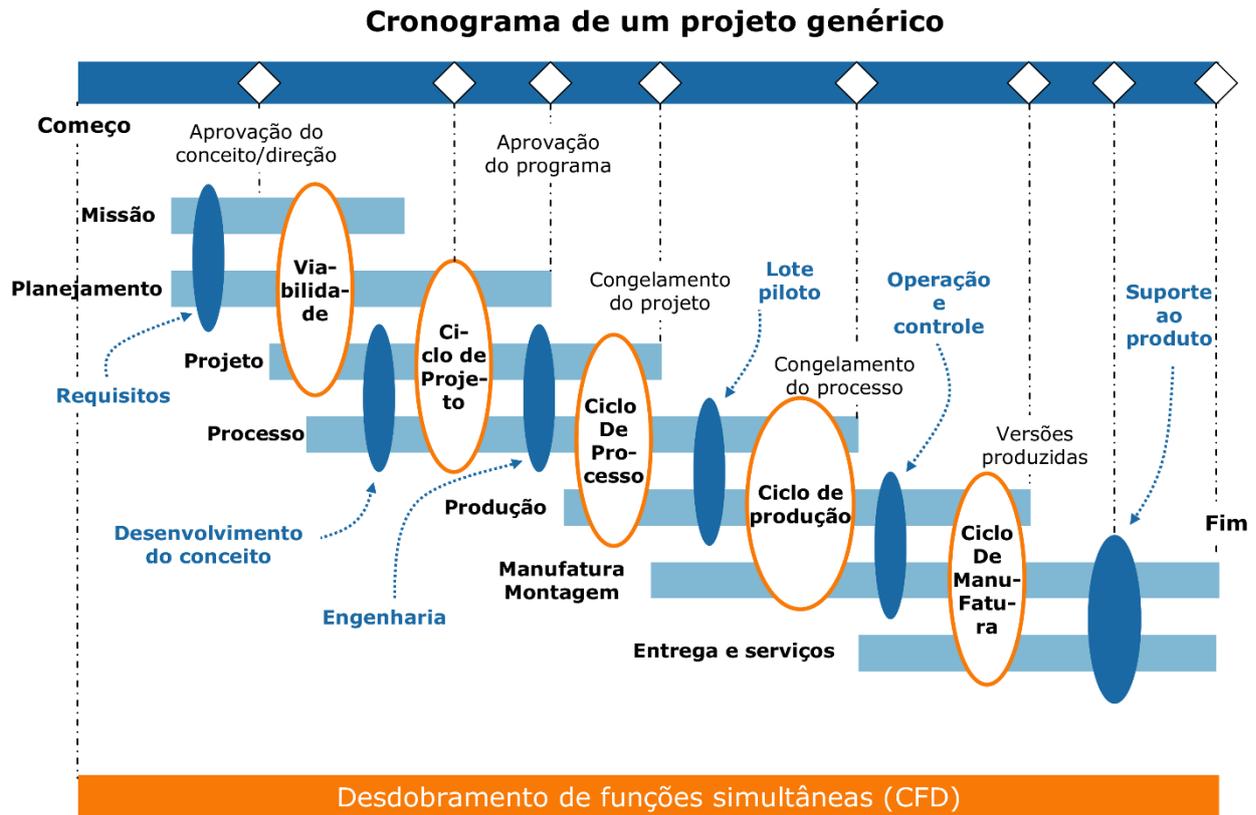


FIGURA 2.19 Modelo PDP proposto por Prasad (1996) – Fonte: Prasad (1996)

#### 2.4.2.2 Modelo proposto por Rozenfeld et al. (2006)

Rozenfeld et al. (2006) dividem o processo de desenvolvimento de produtos em três macro fases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. A macro fase de desenvolvimento enfatiza os aspectos tecnológicos correspondentes à definição do produto em si, suas características e forma de produção, domínio de conhecimento da engenharia. Ela é dividida em Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Detalhado, Preparação da Produção e Lançamento de Produto. Na FIG 2.20 é apresentada a visão geral do modelo proposto.

No 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.

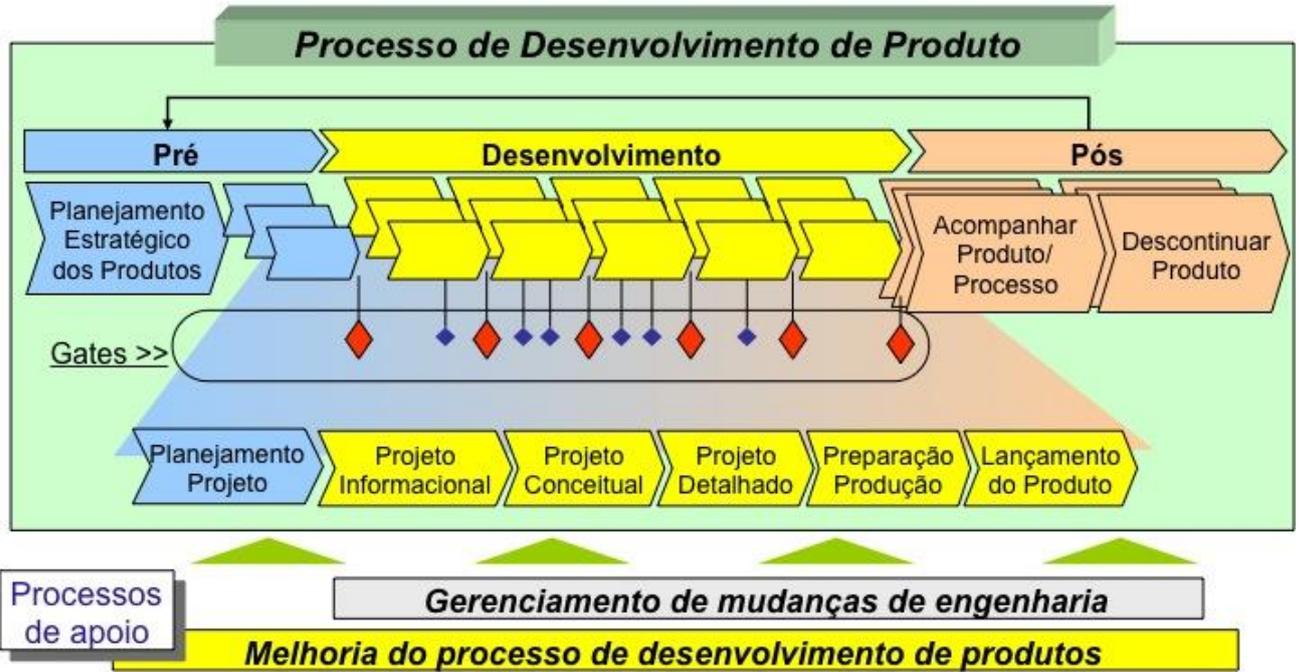


FIGURA 2.20 Modelo PDP proposto por Rozenfeld et al. (2006) – Fonte: Rozenfeld et al. (2006)

Na fase de 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 representação das soluções pode ser feita por meio de esquemas, croquis e desenhos que podem ser manuais ou computacionais, e é muitas vezes realizada em conjunto com a criação. A seleção de soluções é feita com base em métodos apropriados que se apoiam nas necessidades ou requisitos previamente definidos.

No 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.

A fase de Preparação da Produção 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, o que culmina sua liberação.

O objetivo da fase de Lançamento de Produto 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.

#### **2.4.2.3 Modelo proposto por Back et al. (2008)**

Back et al. (2008) definem o processo de desenvolvimento de produtos baseado na metodologia de engenharia simultânea, visando à integração de diferentes recursos internos e externos da organização num objetivo único, para aperfeiçoar tempo, custo e assegurar a qualidade do projeto.

Os autores propuseram um modelo integrado para o desenvolvimento de produto composto de três macros fases decompostas da seguinte forma:

1. Planejamento do projeto, que envolve a elaboração do plano do projeto.
2. Elaboração do projeto do produto, decomposta em projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Tem como resultados principais respectivamente, as especificações de projeto, a concepção do produto, a viabilidade técnica e econômica e a documentação do produto.
3. Implementação do lote piloto: fase decomposta em preparação da produção, lançamento e validação do produto. Tem como resultados principais respectivamente, a liberação do produto, a liberação do lote piloto e a validação do produto.

#### **2.4.2.4 Modelo Axiomático proposto por Suh (1990)**

Existem autores que aplicam o conceito de Projeto Axiomático para tratar as relações entre as variáveis de projetos de diversos domínios, (HEHENBERGER, F., *et al.*, 2010). Esta abordagem pode ser aplicada para sistematizar e estruturar o projeto e avaliação de produtos que podem ser definidos como uma montagem de sub-sistemas.

As pesquisas em projeto axiomático foram iniciadas em 1977, pelo professor Nam P. Suh, do MIT - *Massachusetts Institute of Technology*. Para Lee (2003), o projeto axiomático é centrado em torno do conceito de requisito funcional (RF), parâmetros de projeto (PP) e suas interrelações quantitativas / qualitativas representado por a matriz do projeto (A). Está matriz é apresentada conforme a equação (2.1):

$$RF = A . PP \tag{2.1}$$

Suh (1990) define dois axiomas de projeto, conhecidos como o axioma da independência e o axioma da informação:

1. Primeiro axioma (axioma da independência): “Manter a independência dos Requisitos Funcionais”. Em um projeto aceitável, os parâmetros do produto e os requisitos funcionais são relacionados de tal forma que um determinado parâmetro de produto pode ser ajustado para satisfazer seu correspondente requisito funcional, sem afetar os demais.
2. Segundo axioma (axioma da informação): “Minimizar o conteúdo de informações”. Entre todos os projetos que satisfaçam o primeiro axioma, aquele com menor conteúdo de informação é o melhor.

O processo de projeto axiomático proposto por Suh (1990) é sistematizado pelo uso de quatro domínios, apresentados na FIG 2.21:

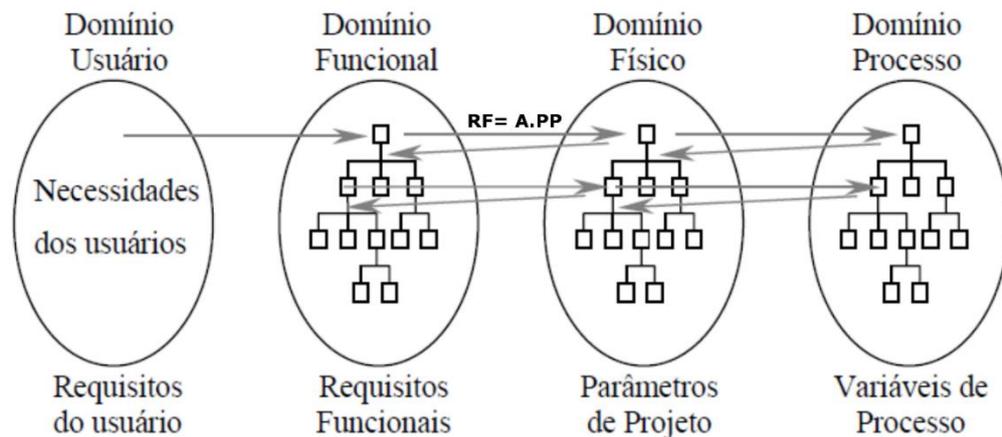


FIGURA 2.21 Modelo Axiomático– Fonte: Hehenberger, F., et al. (2010), adaptado.

- O domínio do usuário: indicando as necessidades do cliente.
- O domínio funcional: expressando as funções desejadas do projeto de produto.
- O domínio físico: representando as propriedades físicas do projeto de produto.
- O domínio de processo: ilustrando como conseguir o produzir o projeto de produto.

## 2.5 Modelos de desenvolvimento de sistemas mecatrônicos

Claramente, desenvolvedores de sistemas mecatrônicos necessitam de apoio em suas tarefas cada vez mais complexas e multidisciplinares a fim de rapidamente encontrar

soluções alternativas e facilitar a tomada de decisão durante o processo de projeto, (HEHENBERGER, 2014). Nesse contexto, serão apresentadas nesta subseção os principais métodos, metodologias e ferramentas para projeto de sistemas mecatrônicos.

### 2.5.1 Modelo V

A Associação de Engenheiros Alemães, conhecida como VDI (sigla em alemão: *Verein Deutscher Ingenieure*), propôs em 2004 uma solução para o projeto de sistemas mecatrônicos por meio do guia VDI 2206 – *Design methodology for mechatronic systems*. O objetivo principal do Modelo V, como também é conhecido, não era substituir os outros métodos de projetos já consagrados, mas integrá-los holisticamente dentro de uma metodologia para produtos mecânicos complexos. Além disso, promove a Engenharia Simultânea e consiste em três partes principais: microciclo, macro ciclo e módulo de processo, (VASIC e LAZAREVIC, 2008).

O microciclo está relacionado com o processo individual de projeto, ou seja, com o dimensionamento ou determinação de uma parte ou componente do sistema, seguindo linhas tradicionais de análise e avaliação.

O macro ciclo, que realmente foi a proposta inovadora, foi responsável pela denominação do Modelo V, conforme é possível verificar na FIG 2.20 (a), que consiste nos seguintes passos: primeiro analisam-se todos os requisitos do sistema global de modo que as subfunções, e subsistemas estejam definidos (parte esquerda do Modelo V). Em seguida, as subpartes são desenvolvidas simultaneamente pelas equipes colaborativas de projeto. Segundo verificam-se as subfunções e testam-se os subsistemas, que são integrados passo a passo (parte direita do Modelo V). Por fim, o desempenho do sistema integrado é verificado, caso haja necessidade de ser melhorada, a operação é novamente iniciada, tornando-se assim um processo interativo.

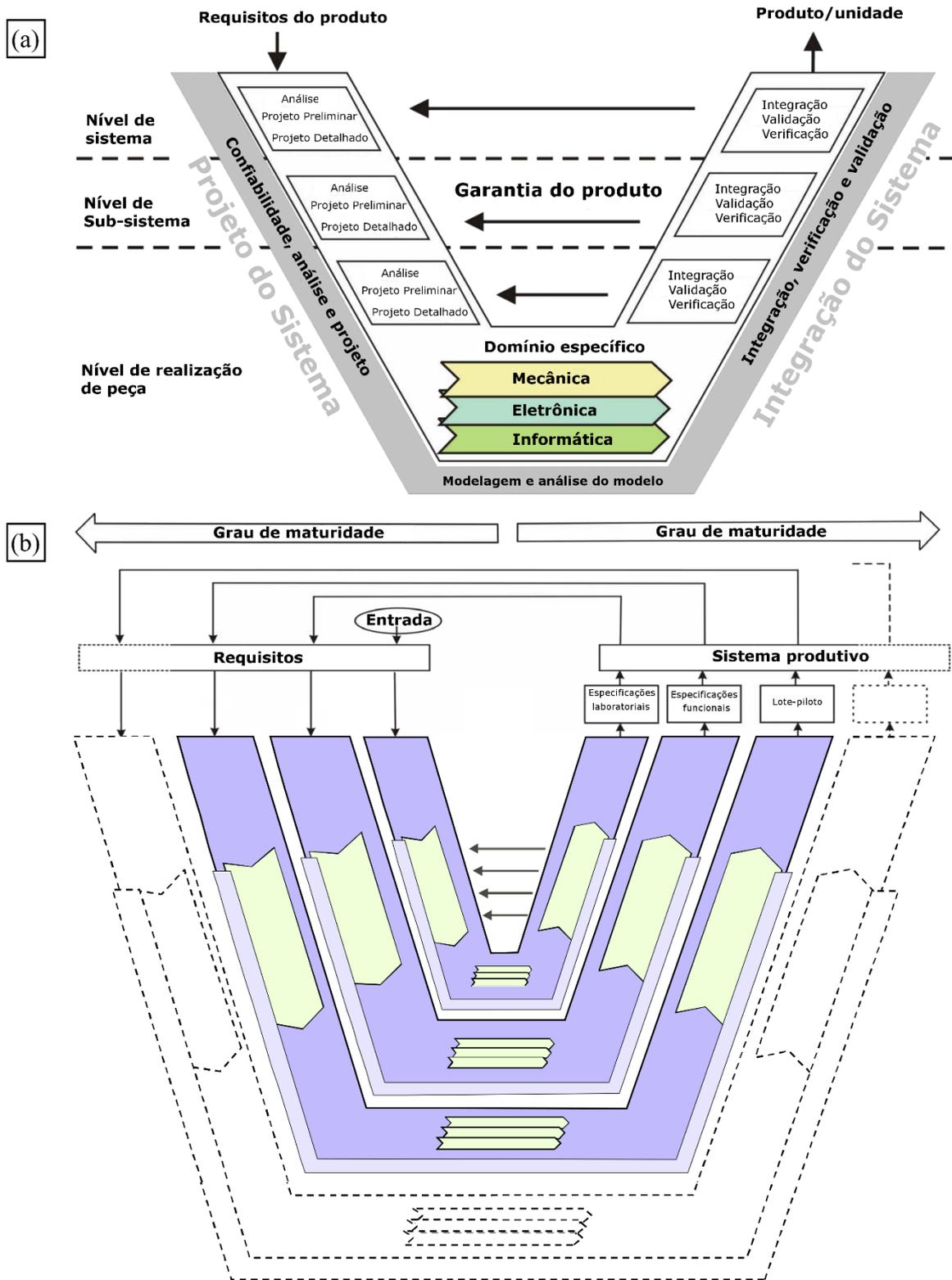


FIGURA 2.22 Modelo V proposto por VDI 2206 – Fonte: Vasic e Lazarevic (2008), adaptado.

Um produto mecatrônico complexo, normalmente, não será finalizado apenas com um macro ciclo, ou seja, podem ser necessários vários deles, conforme a FIG 2.20 (b). O resultado de cada fase do projeto, definido por um macro ciclo V, é utilizado como requisito do próximo macro ciclo. Isso é feito sucessivamente, iniciando pela caracterização mais simples do problema até a finalização do produto, de forma a aumentar a complexidade investigada a cada iteração.

### 2.5.2 Modelo Hierárquico

Hehenberger et al. (2010) propôs o modelo de projeto hierárquico para sistemas mecatrônicos, baseado no Modelo Axiomático de Suh (1990). O modelo deles foi desenvolvido para auxiliar os engenheiros e projetistas por meio da estruturação do processo de projeto e aumento da transparência entre as relações das áreas envolvidas. O método é dividido em três passos:

1. Definição dos módulos: o sistema mecatrônico pode ser descomposto em módulos de acordo a seus diferentes domínios (mecânico, elétrico, computação e controle) o pilar de cada módulo é estruturado em vários níveis hierárquicos correspondentes ao grau de detalhamento do processo. Conforme é possível verificar na FIG 2.22, apenas o primeiro nível, o mais alto, possui interface com os outros módulos, por meio do nível de acoplamento mecatrônico.
2. Utilização de modelos hierárquicos para o projeto conceitual: Os modelos consistem em um conjunto de parâmetros assim como um conjunto de relações lógicas e quantitativas entre as variáveis do sistema. Quando se estabelece um modelo, algum tipo de idealização é necessária, isto significa que intrinsicamente existirão premissas que não representam a realidade de forma completa e perfeita.
3. Definição hierárquica dos parâmetros de projeto: A hierarquia dos parâmetros de projeto é investigada separadamente para cada domínio. Existem parâmetros que não são essenciais para a solução, mas outros, ao contrário estão diretamente relacionados com a otimização do projeto. Dessa maneira, ao defini-los hierarquicamente, os menos importantes, níveis mais baixos, terão menos influência na solução.

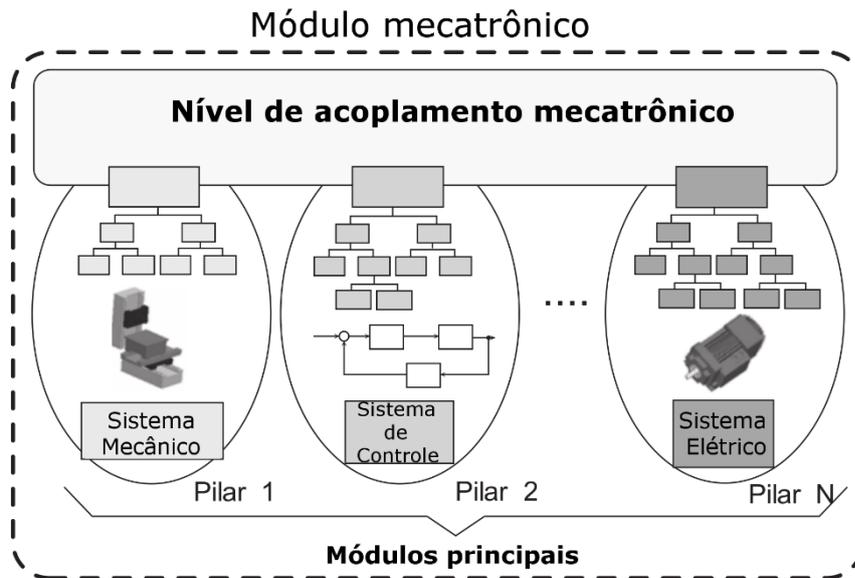


FIGURA 2.23 Modelo Hierárquico– Fonte: Hehenberger et al. (2010), adaptado.

### 2.5.3 Modelo 3-Ciclos

O modelo 3-ciclo apresentado por Gausemeier et al. (2011), mostrado na FIG 2.23, consiste em três tarefas principais: planejamento estratégico do produto, desenvolvimento de produto e desenvolvimento de sistemas de produção. Para o autor, estas tarefas não podem ser consideradas como uma sequência rigorosa de fases e etapas, devem interagir entre si.

Como indicado na figura, o primeiro ciclo (superior esquerdo) é responsável pelo planejamento estratégico do produto, desde a prospecção e identificação de oportunidades, relacionando o produto a ser desenvolvido ou em desenvolvimento com o portfólio da empresa.

O segundo ciclo (inferior esquerdo) é o ciclo responsável pelo desenvolvimento do produto em si, e, neste ciclo, os autores sugerem empregar o modelo em V apresentado anteriormente para o desenvolvimento de produtos.

E, o terceiro ciclo (inferior direito) é pensado para o projeto e desenvolvimento do processo produtivo, desde o planejamento da linha de produção até a interação com fornecedores e a logística de distribuição.

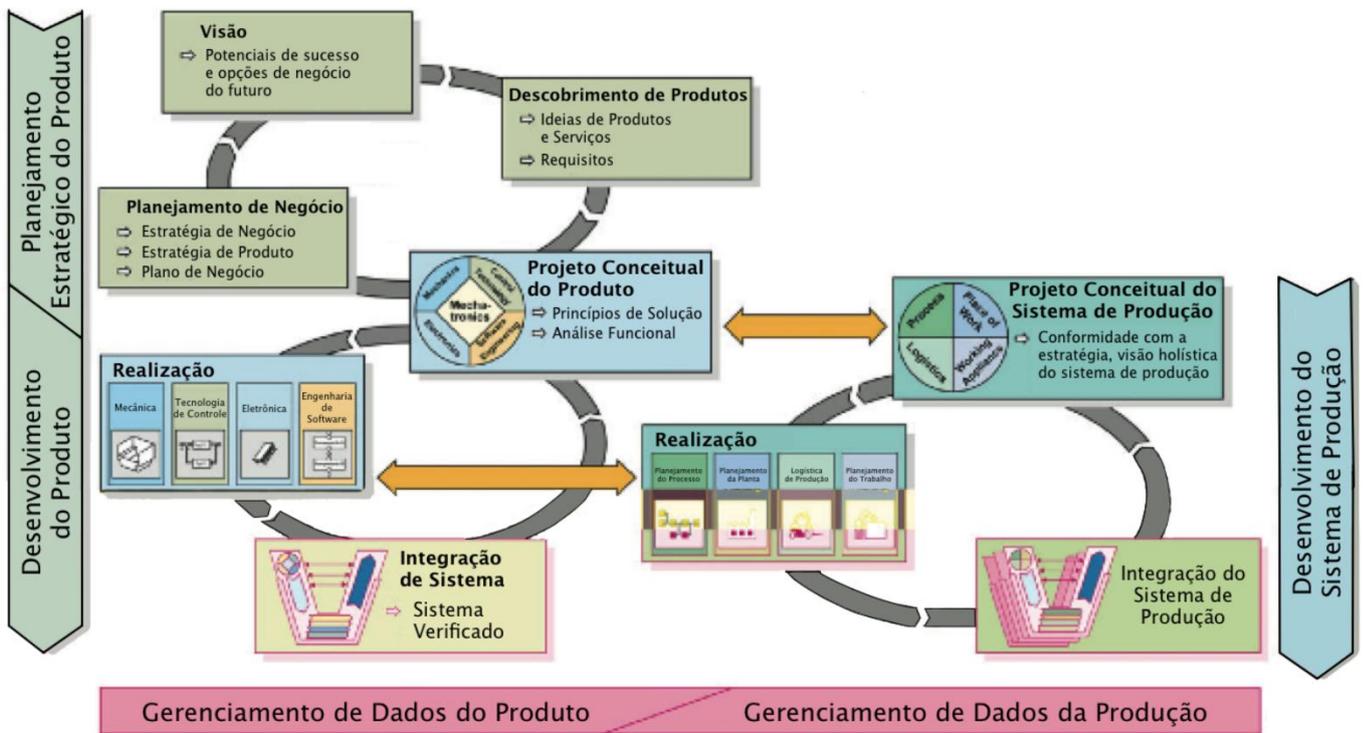


FIGURA 2.24 Modelo 3-Ciclos – Fonte: Gausemeier et al. (2011), adaptado.

A partir do modelo 3-Ciclos o autor citado desenvolve um modelo detalhado para o projeto conceitual integrado do produto e do sistema de produção de sistemas mecatrônicos, em que suas principais fases são combinadas e sincronizadas, como mostrado na FIG 2.24. Possui as seguintes fases:

- **Planejamento e esclarecimento da tarefa (Produto):** é identificada a tarefa central de desenvolvimento. Em seguida, analisa-se o ambiente, em que se investigam as mais importantes condições limites e influências do sistema. O resultado desta fase é a lista de requisitos.
- **Projeto conceitual ao nível de sistema:** a entrada é a lista de requisitos da qual são extraídas as principais funções do produto e são configuradas dentro de uma hierarquia de funções. Os princípios de solução ao nível de sistema são os resultados desta fase.
- **Projeto conceitual ao nível de módulos:** é preciso ter uma visão mais aprofundada para a solução do sistema, de forma a permitir uma análise mais técnica e econômica do princípio de solução. Para esse efeito, o sistema é

modularizado e é desenvolvido um princípio de solução para cada módulo. O resultado é o princípio de solução ao nível de módulo.

- Planejamento e esclarecimento da tarefa (sistema de produção): o objetivo é identificar os requisitos do projeto do sistema produtivo. Além disso, identificam-se todos os elementos do sistema que precisam ser fabricados assim como a conexão estrutural entre eles.
- Projeto conceitual ao nível de processo: o objetivo desta fase consiste em preparar a sequência do processo produtivo, incluindo todas as partes, montagem, processos de montagem e processos de manufatura, que serão necessários para a produção.
- Integração do conceito: os princípios de solução dos módulos do produto serão integrados a um princípio de solução detalhado de todo o sistema. Este é o ponto de partida para a subsequente concretização do produto.
- Projeto conceitual ao nível de recursos: nesta fase os recursos do sistema de produção são determinados.

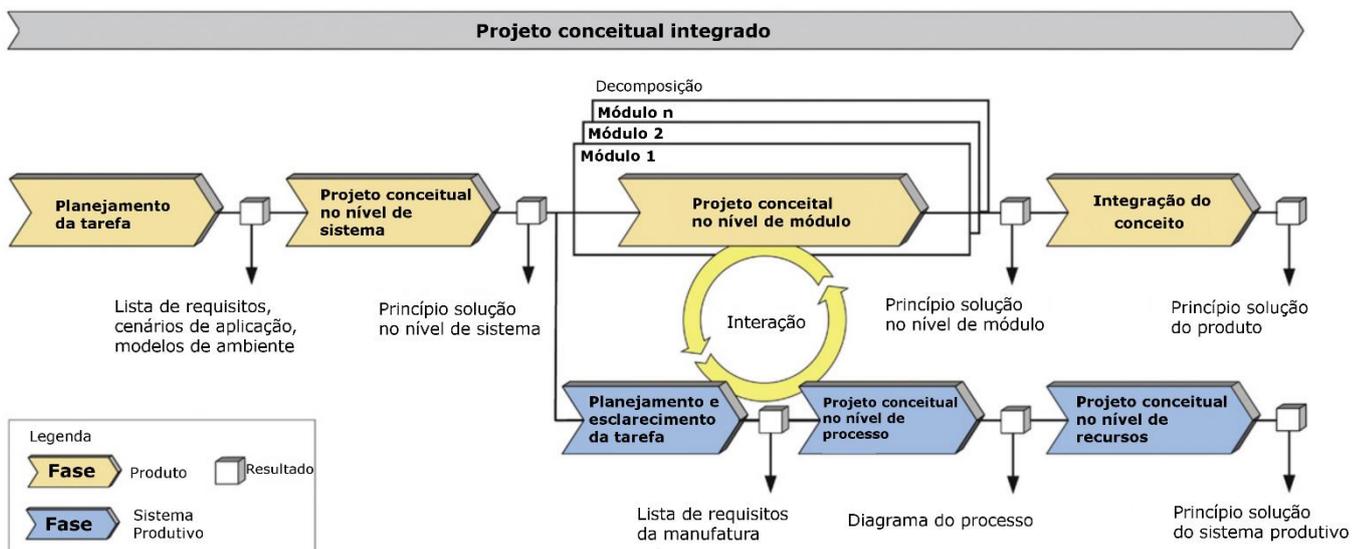


FIGURA 2.25 Modelo de projeto genérico integrativo – Fonte: Gausemeier et al. (2011), adaptado.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, a metodologia de pesquisa será abordada por meio de uma discussão dos caminhos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente será discutido sobre a classificação da pesquisa, em seguida, será descrito as estratégias de pesquisa adotadas ao longo do trabalho.

#### 3.1 Classificação da pesquisa

Quanto ao gênero, pode-se classificar a pesquisa desenvolvida neste trabalho como empírica, ou seja, produz e analisa dados, precedendo sempre pela via do controle empírico e fatorial, (DEMO, 1994). Portanto, é baseada na busca de dados relevantes e convenientes obtidos através da experiência e da vivência do pesquisador. Porém, segundo Demo (1994), nenhum tipo de pesquisa é autossuficiente, pois “na prática mesclamos todos acentuando mais este ou aquele tipo de pesquisa”.

Sob o ponto de vista dos objetivos, uma pesquisa pode ser classificada como exploratória, descritiva e explicativa, (DEMO, 1994). Como o objetivo geral do trabalho foi propor e descrever um método de projeto para o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos, considera-se que a tipologia básica do trabalho é descritiva. Entretanto, ao considerar que o método confeccionado é baseado em uma extensa pesquisa bibliográfica na qual é realizada uma investigação dos conceitos e aplicações de metodologia de projeto nos diversos segmentos e domínios do conhecimento, o caráter exploratório não pode deixar de ser mencionado.

#### 3.2 Estratégia de pesquisa bibliográfica

Conforme já foi descrito, a principal estratégia do trabalho foi realizar uma extensa revisão bibliográfica a fim de verificar os conceitos de metodologia de projeto sob as diversas óticas envolvidas no desenvolvimento de sistemas mecatrônicos (mecânica, eletroeletrônica, computação, controle, desenvolvimento de produtos e gestão). Dessa maneira, definiu-se que, antes de propor o Modelo X, seria necessário o entendimento dos conceitos de metodologia de projeto e como cada área trata e aplica esse assunto. Além disso, foram investigadas as principais áreas que podem ser usuárias do modelo proposto como, por exemplo, gestão de projetos e desenvolvimento de produtos, com o objetivo de aproximar e contextualizar a

pesquisa com as aplicações industriais. A FIG 3.1 ilustra a metodologia de pesquisa utilizada, evidenciando as contribuições do presente trabalho.

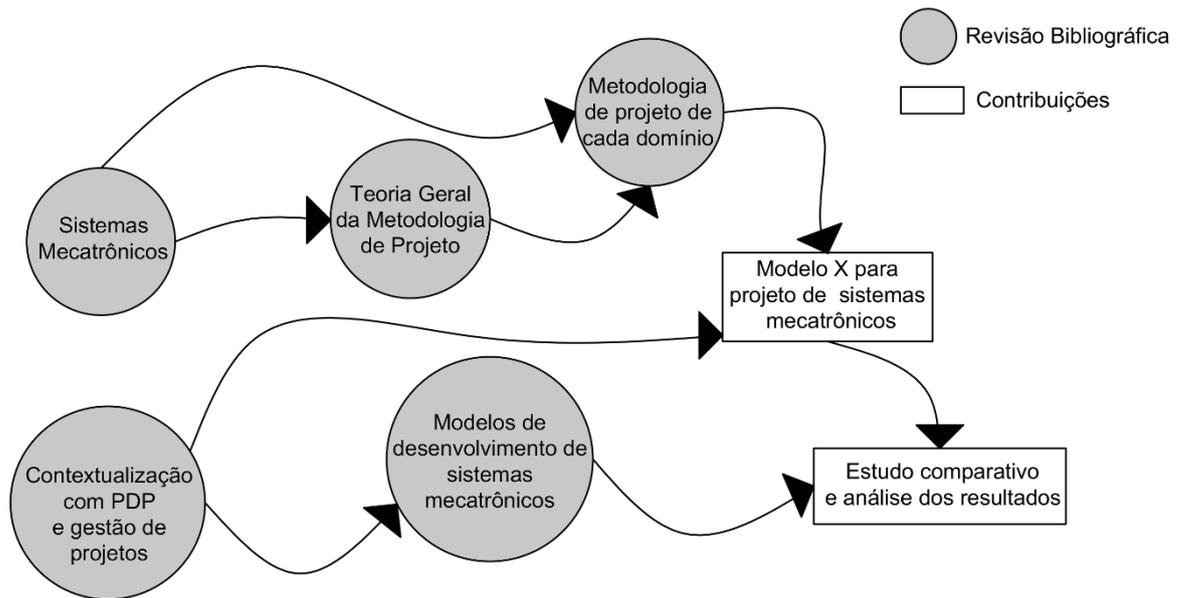


FIGURA 3.1 Metodologia de pesquisa.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada o modelo descritivo de projeto proposto para o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos. Espera-se que, por meio dele, engenheiros, estudantes e profissionais da área possam, durante o processo de projeto, integrar as áreas de forma completa e consistente, considerando o entendimento e o planejamento das interações entre os seus componentes. Dessa maneira, permitirá avaliar os impactos das decisões de projeto e alcançar os requisitos e as funções principais do sistema de forma otimizada.

Diferentemente das metodologias, dos métodos e das ferramentas encontrados na literatura em que os projetos dos diversos domínios são realizados separadamente e ao final são apenas somados e montados, pretende-se propor um modelo de desenvolvimento no qual, desde a concepção, as definições de projeto sejam realizadas sinergicamente, ou seja, sem separação das áreas que compõem a mecatrônica.

É importante ressaltar que se objetivou o desenvolvimento de um trabalho cujo o foco é o projeto técnico do sistema. Dessa maneira, o cenário macro da gestão de projetos e do desenvolvimento de produtos no qual a dissertação pode ser aplicada serão utilizados apenas como contexto, isto é, limitando-se em não aprofundar nos aspectos do mundo dos negócios e gerenciamento administrativo.

Portanto, após a realização dessas considerações, será apresentado o Modelo X para projeto de sistemas mecatrônicos cujas fases serão descritas e comentadas a seguir.

### 4.1 Modelo X para projeto de sistemas mecatrônicos

Propõe-se o desenvolvimento do projeto mecatrônico em seis fases principais. Conforme é possível observar na FIG 4.1, que ilustra o modelo proposto, cada aresta do “X” representa uma das áreas que compõem a mecatrônica e os círculos representam as fases. Os círculos, ao entrarem em contato com as arestas do “X”, se fundem com estas, justamente para mostrar e enfatizar a sinergia no desenvolvimento, ou seja, sem separação das áreas em nenhuma etapa.

Outro ponto relevante do diagrama proposto é o afastamento progressivo das arestas, praticamente fundidas no início, com o decorrer das fases do projeto. Esse comportamento é defendido, pois nas fases iniciais são realizadas as principais análises, estudos, definições e decisões de projeto. Ao contrário do tradicional desenvolvimento

sequencial, no qual o projeto de cada área é realizado de forma independente e apenas ao final são integrados e testados, todas as áreas sempre estarão envolvidas, principalmente nas etapas iniciais. Adicionalmente, mesmo com o natural distanciamento que ocorre nas fases posteriores, nas quais existem desenvolvimentos mais específicos dos subsistemas, sempre existirá algum nível de interligação entre elas, logo, em nenhum momento estarão isoladas.

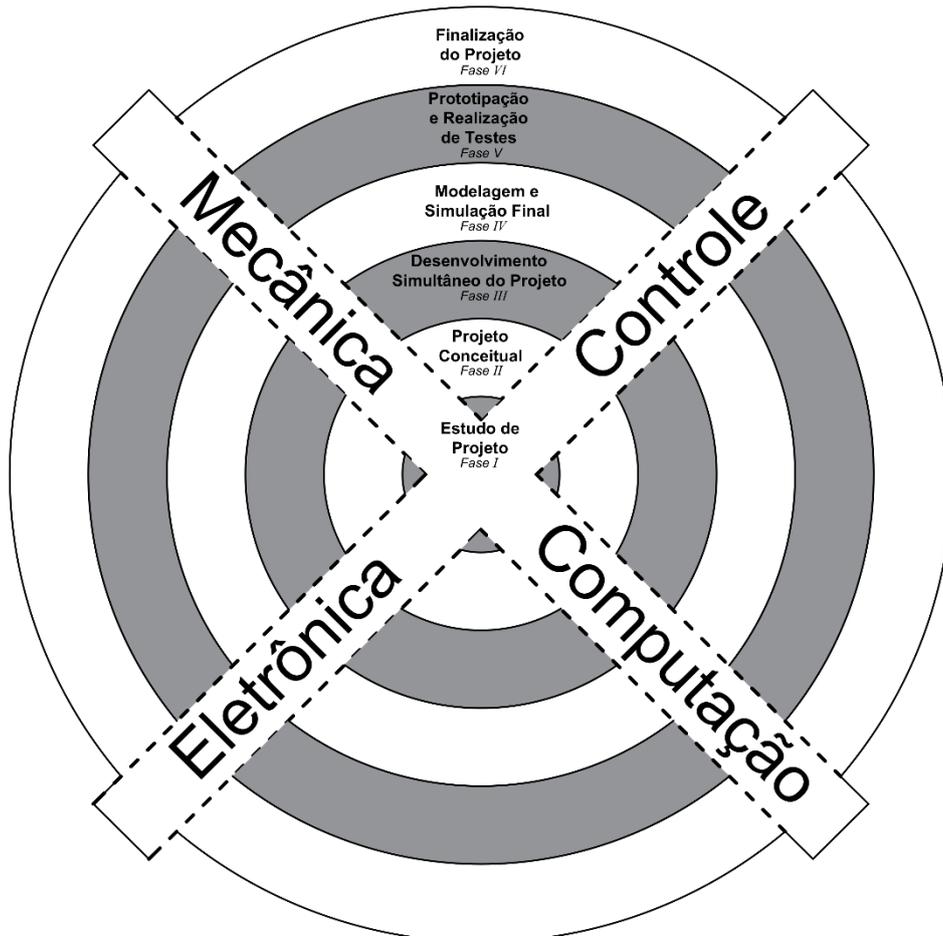


FIGURA 4.1 Ilustração do Modelo X para desenvolvimento de sistemas mecatrônicos.

## 4.2 Descrição das fases do Modelo X

A seguir, serão descritas as fases que compõem o método de projeto proposto. O objetivo é apresentá-las de forma simples e clara a fim de permitir o fácil entendimento por parte dos futuros usuários da metodologia.

#### 4.2.1 Estudo de Projeto – Fase I

A primeira fase é responsável pela busca das principais informações para o desenvolvimento do projeto, como as condições de operação, as características do sistema físico envolvido e as especificações de projeto. Ao contextualizar com a área de desenvolvimento de produto, é preciso também identificar, estudar, definir e analisar os objetivos de mercado, o público-alvo e as necessidades e os interesses dos usuários. Dessa forma, serão definidas as especificações de projeto preliminares que serão atualizadas a medida em que for obtidas mais informações ao longo do desenvolvimento.

A identificação dos requisitos dos usuários do produto será realizada pela resposta das seguintes questões:

- a. Quais são as principais funcionalidades e funções que o sistema deve desempenhar? O que o sistema deve fazer? (**Requisitos funcionais**)
- b. Quão bem o sistema deve alcançar tais funções? (**Requisitos de desempenho**)
- c. Sob quais condições o sistema trabalhará para alcançar tais objetivos? (**Requisitos ambientais**)

A resposta das perguntas envolverá a análise e a definição, dentre outras, das seguintes características:

- *Budget* (recurso financeiro) disponível para o projeto;
- Desempenho;
- Usabilidade ou simplicidade de uso;
- Segurança;
- Confiabilidade;
- Consumo de energia;
- Manutenção;
- Estética (*design*, cor, geometria, tamanho, peso, etc.);
- Processo de fabricação;

O sucesso do projeto final é extremamente dependente desse processo inicial de identificação de requisitos e da correta transformação dos mesmos em especificações, que descreverão as principais capacidades e objetivos a serem alcançados. Conhecer bem o problema antes de tentar resolvê-lo é uma importante estratégia de desenvolvimento. Portanto,

o resultado final, dessa primeira fase, é a identificação, o entendimento e a descrição do problema que será resolvido pelo projeto que será na forma de:

- Descrição verbal do que se trata o problema;
- Identificação dos requisitos e das consequentes especificações de projeto;
- Identificação dos principais objetivos;
- Descrição das principais funções do sistema;
- Definição das principais variáveis do sistema relacionadas com as especificações de projeto;

#### **4.2.2 Projeto Conceitual – Fase II**

Nesta fase, propõe-se o projeto conceitual, em que é realizado o esboço do sistema em termos de um conjunto de ideias e conceitos multidisciplinares, sem se preocupar com os detalhes de dimensionamento e desenvolvimento. O foco, além de defini-los, é decidir como os mesmos estarão interligados dentro de uma arquitetura apropriada.

No cenário da mecatrônica, a primeira estratégia é verificar o nível de complexidade do sistema necessário para atender os requisitos e especificações definidas na primeira fase. O principal objetivo dessa verificação é introduzir a análise de custo-benefício, que será recorrente durante todo processo de projeto. Isto se dá por meio do questionamento sobre a real necessidade do sistema mecatrônico, que possui o maior nível de complexidade, como solução de projeto. Portanto, a partir das definições e conceitos descritos no segundo capítulo, é proposta, conforme FIG. 4.2, a definição de três níveis de complexidade:

Nível de complexidade 1 – Sistema puramente mecânico: Para alguns problemas a solução puramente mecânica é suficiente. Apesar de cada vez menos frequente, é importante sempre verificar essa possibilidade, pois, geralmente, são soluções mais simples e de menor custo. Caso seja detectado que o sistema possui esse nível, não é necessário seguir a metodologia proposta por este trabalho. O projetista pode aplicar as tradicionais metodologias de projetos mecânicos como, por exemplo, as descritas no capítulo 2 desta dissertação.

Nível de complexidade 2 – Sistema malha aberta: Nesse nível, é acrescentado à solução mecânica atuadores e comandos eletroeletrônicos, a partir dos quais é possível modificar características do sistema de acordo com os interesses do projeto. São também conhecidas como soluções eletromecânicas e a definição dos sinais dos atuadores é realizada em função de modelos matemáticos que preveem o comportamento das variáveis do sistema.

Recomenda-se o uso de soluções com esse nível de complexidade em problemas de baixa ou média precisão e que possuem modelos matemáticos consolidados.

Nível de complexidade 3 – Sistema malha fechada: Esse nível caracteriza-se por soluções mecatrônicas propriamente ditas. Apesar de serem mais complexas, a incorporação do conceito de retroalimentação, pela adição dos sensores, é responsável por aumentar a precisão e a eficiência dos projetos. Além da previsão do comportamento do sistema por meio dos modelos matemáticos, o comando eletroeletrônico recebe em tempo real as informações das variáveis e consegue definir de forma mais eficiente o sinal que deve ser enviado aos atuadores.

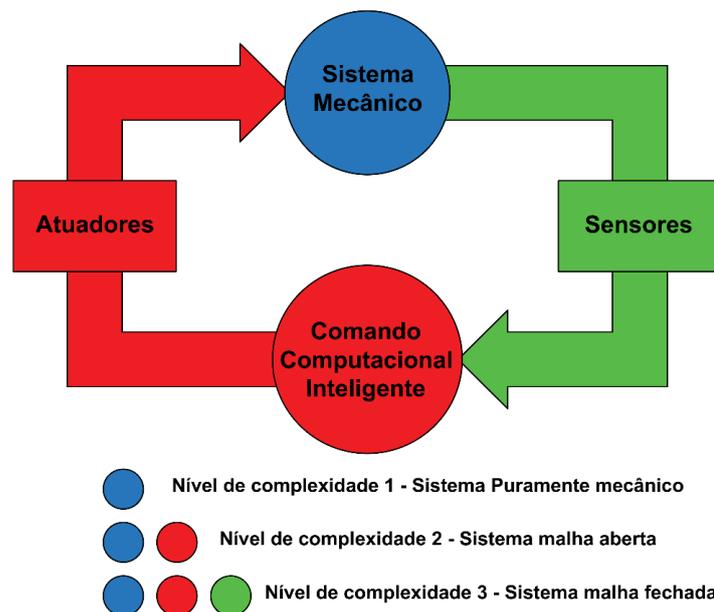


FIGURA 4.2 Níveis de complexidade das soluções.

Após a verificação do nível de complexidade, a continuidade do desenvolvimento do projeto conceitual é a tradução das especificações e dos requisitos definidos na etapa inicial em características básicas do sistema solução. Para isso, propõe-se:

1. Identificar, conhecer e estudar o sistema mecânico que será “mecatronizado”. Definir quais são as propriedades e variáveis mecânicas dominantes (por exemplo, geometria, *layout*, volume, tamanho, graus de liberdade, dinâmica do sistema no tempo em malha aberta, etc.).
2. Identificar quais serão os principais subsistemas do projeto: IHM, alimentação elétrica, *hardware*, comunicação eletroeletrônica, *drives*, subsistemas mecânicos, sistema de controle, etc.

3. Desenvolver o esqueleto ou diagrama funcional do projeto. Nesse diagrama, que pode ser em forma de blocos, uma estrutura qualitativa preliminar dos subsistemas e de seus componentes será construída de forma a permitir uma rápida avaliação da relação entre eles e de suas principais funções.
4. Verificar a existência de sistemas e subsistemas similares na literatura ou na indústria. Se possível, após analisá-los, aproveitar soluções já existentes.
5. Ao final, a partir das necessidades, requisitos e especificações de projeto, realizar um estudo de viabilidade e finalizar o projeto conceitual. Para isso, espera-se que as melhores soluções para cada subsistema estejam identificadas e o *layout* qualitativo do sistema esteja definido.

#### **4.2.3 Desenvolvimento Simultâneo do Projeto – Fase III**

Nesta fase, inicia-se efetivamente o desenvolvimento do sistema mecatrônico. Conforme já foi dissertado nos capítulos anteriores, o grande desafio no projeto desse tipo de sistema multidisciplinar está em como avaliar, dimensionar e definir seus componentes e subsistemas de forma integrada e simultânea. A solução proposta por este trabalho foi elaborada a partir da constatação de um ponto comum nos projetos: todos são constituídos de sistemas mecânicos controlados eletronicamente e computacionalmente. Dessa maneira, é possível inferir que o projeto de controle é o elo de ligação entre os subsistemas, atuando no subsistema mecânico e utilizando como ferramenta os subsistemas eletroeletrônicos e computacionais.

Diante disso, propõem-se a estrutura de desenvolvimento mostrada na FIG 4.3. O projeto mecânico e o projeto de controle, a partir das informações das fases I e II, são definidos de forma interativa por meio da análise das principais variáveis mecânicas que serão controladas, monitoradas e atuadas. O objetivo é encontrar uma arquitetura de controle do sistema otimizada, ou seja, sem estratégias complexas no âmbito de sensoriamento, atuação, processamento de dados, algoritmos de controle e conectividade, conforme os passos a seguir:

1. Transformar os requisitos de projeto em especificações do projeto mecânico.
2. Sistematizá-lo em subsistemas.
3. Realizar a análise estática, cinemática e dinâmica de cada subsistema.
4. Definir quais variáveis de cada subsistema estão relacionadas com o sistema de controle, isto é, quais serão atuadas, monitoradas e controladas.
5. Investigar o modelo topológico, físico e matemático (analítico ou numérico) que relacione as variáveis definidas na etapa anterior.

6. Verificar a classificação do sistema perante as suas características, matemáticas e físicas, determinantes para a estratégia de controle (linear ou não linear, invariante ou variante no tempo). Sendo que, o sistema ideal deve ser linear e invariante no tempo. Caso não seja, é preciso verificar a possibilidade de transformá-lo nesse tipo pela alteração de alguma propriedade mecânica e, então, retomar a etapa 4 (atentar ao custo dessa alteração).
7. Transformar os requisitos de projeto em especificações do projeto de controle.
8. A partir da classificação do sistema realizada na etapa 6 e das especificações da etapa 7, é necessário definir a melhor estratégia de controle, isto é, aquela que alcançará as especificações satisfatoriamente, necessitando a menor quantidade de sensores, atuadores, energia e processamento computacional.
9. Finalizar a arquitetura de controle pela escolha da estratégia de controle e pela configuração do sistema a ser controlado, definindo quais variáveis serão monitoradas, atuadas e controladas e sob quais condições.

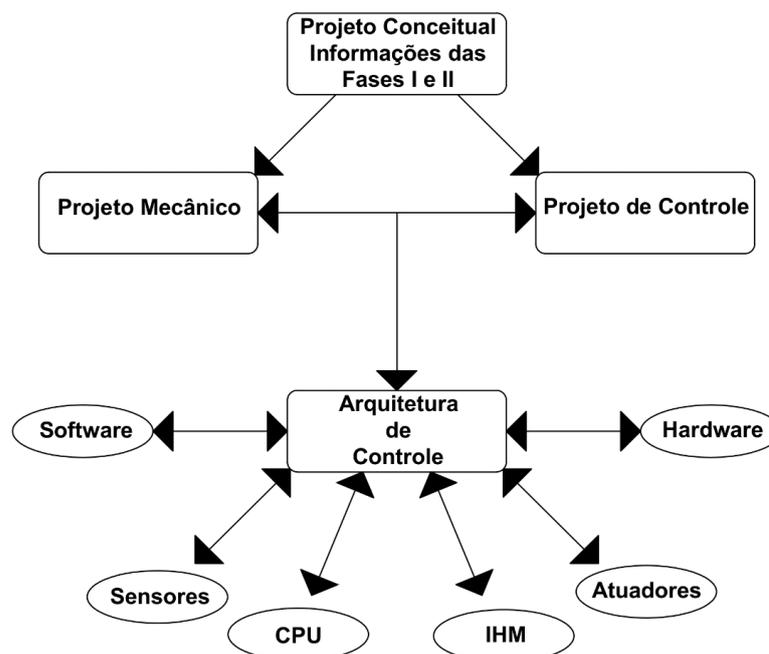


FIGURA 4.3 Estrutura de desenvolvimento simultâneo.

Como resultado, a partir da arquitetura de controle definida, é esperado o desenvolvimento simultâneo dos demais subsistemas, descrito a seguir, de forma a alcançar as especificações de maneira eficiente e com baixo custo:

Sensores: A partir da análise das características físicas das variáveis que serão medidas, é realizada a definição dos sensores que serão utilizados. Caso não exista solução de mercado, é necessário desenvolver o sistema de medição. Em ambas situações é preciso

verificar a sua integração com o sistema e a dinâmica, estabilidade, resolução, precisão e a robustez que são ideais para o projeto.

Atuadores: São responsáveis por converter o sinal de controle em energia, agindo diretamente no sistema. São os equipamentos que efetivamente e fisicamente executam as ações de controle. Para dimensioná-los o primeiro passo é analisar as propriedades mecânicas das variáveis do sistema que deseja alterar como, por exemplo, posição, velocidade, aceleração, temperatura, pressão, vazão, força, torque, dentre outras ou alguma combinação das mesmas. O próximo passo é definir a quantidade e o tipo de atuador (elétrico, eletromagnético, eletromecânico, hidráulico, pneumático, piezoelétrico, etc.) que será capaz de alterar a propriedade mecânica de forma eficaz, baseando-se no comportamento desejado, custo efetivo, disponibilidade e manutenção do equipamento.

CPU: A escolha da unidade central de processamento de dados está em função da quantidade de sensores e atuadores (entrada e saída de dados), das características elétricas dos dados (analógico ou digital) e das condições operacionais do processamento (memória, *clock* do processor, portas de comunicação, etc.). Considerado o cérebro do projeto, a CPU receberá os sinais dos sensores e definirá, em função da estratégia de controle, os sinais que deverão ser enviados aos atuadores. Exemplos de CPU: microcontroladores, microprocessadores, PLC e sistemas eletrônicos embarcados. Para defini-la deve verificar os seguintes fatores: operacionalidade (como o sistema irá trabalhar e como as operações serão processadas), ambiente de trabalho, manutenção, programabilidade (ambiente e linguagem de programação que estão relacionados com o tempo de desenvolvimento), custo, disponibilidade, energia e potência de trabalho.

Hardware: Após a seleção dos sensores, atuadores e CPU e da análise de suas respectivas especificações eletroeletrônicas, são avaliadas e desenvolvidas fontes de energia, *drives* de comando e circuitos de condicionamento, proteção, processamento e aquisição de dados elétricos com o objetivo de criar a interface/comunicação entre os componentes da arquitetura de controle estabelecida.

Software: É o conjunto de comandos, linhas de código e parâmetros que definem o comportamento do sistema em função das medições realizadas pelos sensores e dos requisitos do projeto. É o local em que, efetivamente, a arquitetura de controle é implantada por meio do desenvolvimento do algoritmo de comando.

IHM: Em alguns casos, existe a necessidade de permitir a interação entre o projeto e seu usuário. Nessas situações, o projeto da IHM deverá estar previsto tanto no aspecto da programação do algoritmo (*software*) quanto no aspecto físico (*hardware*).

Projeto Mecânico: Por fim, é necessário finalizar o projeto mecânico, realizando o dimensionamento geral dos subsistemas mecânicos definidos na etapa 2. Para isso, consideram-se, além das especificações definidas nas fases iniciais do projeto, as características mecânicas dos atuadores, sensores, CPU, *hardware* e IHM. Em seguida:

- Dimensionam-se os componentes cinematicamente, estaticamente e dinamicamente e se desenvolve o memorial de cálculo (cálculos analíticos, normas e métodos numéricos).
- Realiza-se a montagem dos subsistemas utilizando as plataformas CAD/CAE e verificam-se problemas de interferência.
- Confere-se o dimensionamento pela simulação computacional em elementos finitos.
- Geram-se os desenhos de fabricação, lista de material e componentes.

#### **4.2.4 Modelagem e Simulação Final – Fase IV**

Conforme foi possível observar na etapa 5 da fase anterior, o modelo matemático, topológico e físico da planta é investigado de forma a permitir a definição da melhor estratégia de controle. Entretanto, o modelo não é desenvolvido, pois isso apenas seria possível após a finalização do desenvolvimento simultâneo e da definição de todos os componentes e subsistemas. Por isso, apesar da arquitetura de controle estar definida, o projeto do controlador, que é dependente do processo de modelagem, também não é realizado. Portanto, nesta fase propõe-se modelar e analisar o sistema a fim de desenvolver o controlador e avaliar seu desempenho, perante as especificações e requisitos do projeto, por meio de simulações computacionais.

O modelo é uma representação simplificada do sistema real com o objetivo de promover o seu entendimento e prever seu comportamento em função da modificação de suas variáveis. Existem duas formas principais de modelagem: analítica e a experimental (também conhecida como modelagem caixa preta). A primeira forma utiliza equações matemáticas para representar o sistema a partir de modelos físicos consolidados. Na ausência dos mesmos ou na dificuldade em obtê-los, utiliza-se a segunda forma. Nesse tipo de modelagem, o sistema é excitado experimentalmente e apenas a resposta a essa excitação é modelada, não se preocupando com o entendimento aprofundado do comportamento encontrado. Diante disso, são propostos os seguintes passos nesta fase:

1. Desenvolver o modelo de cada subsistema relacionado com o projeto de controle.
2. Realizar a construção virtual do sistema utilizando as plataformas CAD/CAE.
3. Encontrar o modelo global do sistema que relacione as variáveis de entrada com as variáveis de saída. Caso não seja possível encontrá-lo analiticamente, passar para a próxima fase de prototipação e levantar o modelo experimentalmente. Em seguida, retomar a próxima etapa.
4. Utilizar as plataformas computacionais CAD/CAE para simular o modelo encontrado e verificar sua coerência.
5. Aplicar algum método de projeto de controle em função do tipo de sistema encontrado na etapa 6 da fase anterior. A maioria dos métodos são iterativos, combinando a seleção dos parâmetros e ganhos do controlador com a simulação e análise da resposta temporal do sistema.
6. Avaliar o desempenho do sistema integrado por meio da simulação CAD/CAE (prototipação virtual) e realizar modificações de projeto quando necessário.

#### **4.2.5 Prototipação e Realização de Testes – Fase V**

Mesmo com a evolução das ferramentas CAD/CAE, pelas quais é possível desenvolver protótipos virtuais de excelente qualidade, é inevitável encontrar divergências e erros nas características e nos comportamentos do sistema real. Por isso, a fase de prototipação é importante para finalizar a análise de desempenho, verificando se as especificações e requisitos definidos nas primeiras fases foram de fato alcançados, a partir da realização de testes de funcionamento, inicialmente, em cada subsistema e, posteriormente, no sistema integrado. É esperado que ocorram mínimas alterações do sistema, fato principal que justificará a utilização da metodologia de projeto.

Além disso, outra importante função dessa fase é a otimização do projeto de controle. O primeiro passo é desenvolver a validação do modelo matemático definido nas fases anteriores. Para isso, o sistema real é excitado (pela energização dos atuadores) e os sinais medidos pelos sensores são comparados com a resposta encontrada pela simulação. Se for verificada grande divergência ou quando não for possível encontrar o modelo analiticamente, o mesmo deverá ser encontrado diretamente no sistema real.

O segundo passo é realizar a sintonia dos controladores. Nos casos em que o modelo matemático não foi condizente, o projeto do controlador deverá ser realizado novamente

utilizando ferramentas computacionais. Em seguida, após análise dos testes reais, são realizados ajustes finos nos ganhos e parâmetros do controlador até obter o resultado desejado.

#### **4.2.6 Finalização do Projeto – Fase VI**

Após o projeto ser testado, ajustado e confirmado, a última fase se concentra na concretização do mesmo, isto é, em como será sua execução e produção. No âmbito de PDP, a descrição do projeto do produto mecatrônico finalizado será realizada pela formalização da documentação que definirá todos os componentes, materiais, desenhos, circuitos, programas e *layouts* necessários para a sua fabricação. Essas informações são passadas para os outros setores da empresa que darão continuidade ao ciclo de vida do produto como, a engenharia de processo, produção, logística, suprimentos e qualidade.

É importante ressaltar que a documentação bem desenvolvida diminuirá o inevitável *gap* entre o projeto e o sistema produzido, ou seja, diminuirá as divergências entre as características idealizadas no projeto e as encontradas após a execução do mesmo. Por isso, no caso de sistemas mecatrônicos, deve-se atentar às normas específicas de documentação e fabricação de cada subsistema e desenvolver o *layout* do sistema integrado de forma completa e eficaz.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme foi discutido anteriormente, a interação entre os desenvolvedores de sistemas mecatrônicos, que são de diferentes áreas, não é satisfatória devido ao entendimento insuficiente entre os assuntos envolvidos, principalmente em como seus componentes se relacionam, e à falta de plataformas comuns de desenvolvimento nas quais contemplem as variáveis de projeto de forma sinérgica. A histórica abordagem sequencial é reponsável por duas desvantagens principais. A primeira está relacionada com a idealização das partes separadamente. Dessa maneira, pode existir falta de compatibilidade entre os subsistemas, que resultará em esforços e custos adicionais para alcançar as especificações do sistema geral. A segunda desvantagem está relacionada com a dificuldade de tomada de decisão durante o processo de projeto, ou seja, diante de um problema como determinar quais domínios serão revistos.

Nesse cenário, desde de 2004, algumas metodologias de projeto estão sendo desenvolvidas e investigadas a fim inovar a forma de desenvolver um sistema mecatrônico, conforme foi mostrado na seção 2.5 do capítulo 2. Entretanto, além de serem poucos trabalhos, apresentam algumas deficiências que serão analisadas e discutidas neste capítulo. A TABELA 5.1 apresenta um quadro comparativo entre o Modelo X proposto por este trabalho e os modelos existentes na literatura.

TABELA 5.1

Quadro comparativo entre o modelo proposto e os modelos existentes na literatura

	MODELO V (V.D.I, 2004)	MODELO HIERÁQUICO (HEHENBERGER, F., ET AL., 2010)	MODELO 3-CICLO (GAUSEMEIER, DUMITRESCU, ET AL., 2011)	MODELO X
Considera a integração de áreas de forma completa e consistente				X
Possui efetividade na comunicação e cooperação entre os diferentes domínios				X
Entendimento e planejamento das interações		X		X
Avaliação dos impactos das decisões de projeto	X	X		X
Contextualização com PDP e gestão de projetos	X		X	X

O Modelo V proposto pela Associação de Engenheiros Alemães em 2004, apesar de ter bastante aceitação na área, é incompleto e superficial. A solução dessa abordagem para lidar com as inerentes relações entre os componentes do sistema mecatrônico foi dividi-lo de forma iterativa até que fosse possível aplicar as metodologias de projeto tradicionais. Dessa forma, o modelo ignora a premissa de indissolubilidade da multidisciplinaridade, pois caso contrário não seria mecatrônico. Adicionalmente, é consensual que as principais vantagens do projeto são alcançadas justamente pela interação entre as áreas que o compõe em todos os níveis de desenvolvimento. Portanto, o modelo possuiu mérito ao ser pioneiro e inovador em como tratar os projetos mecatrônicos. Entretanto, pecou em não considerar a integração de forma completa e consistente.

O Modelo Hierárquico proposto por Hehenberger et al. (2010) é uma extensão do Modelo Axiomático proposto por Suh (1990), que é aplicado para tentar encontrar matematicamente as relações entre os requisitos funcionais e os parâmetros do projeto por meio de uma matriz. Esse tipo de abordagem possui como principal contribuição a possibilidade do rastreamento das consequências das mudanças durante o processo de projeto e pode auxiliar na tomada de decisão.

Hehenberger et al. (2010) tentaram, através da definição hierárquica dos parâmetros de projeto e da divisão em módulos do sistema, tratar de forma mais efetiva as relações entre os domínios da mecatrônica. Contudo, continuou com as mesmas limitações apresentadas pelo Modelo Axiomático como, por exemplo, não ser possível equacionar todas as relações ou, por outro lado, encontrar desdobramentos matemáticos complexos de difícil solução. Adicionalmente, consideraram que as áreas, que chamaram de pilares, estariam relacionadas apenas pelo parâmetro de maior hierarquia. Isso significa dizer que a integração ocorre apenas em quatro variáveis, o que não observamos na prática. Diante disso, o método não alcançou o objetivo principal de direcionar a um modo de pensamento interativo e sinérgico que, realmente, auxiliasse na tratativa das relações multidisciplinares existentes em todos os níveis de projeto.

O Modelo 3-Ciclos apresentado por Gausemeier et al. (2011) não objetivou descrever como projetar o sistema mecatrônico, isto é, como determinar as características de seus componentes e subsistemas. Os autores focaram no contexto externo do processo de desenvolvimento de produtos. Definiram três ciclos: planejamento estratégico, desenvolvimento do produto e desenvolvimento do processo produtivo. Os próprios autores sugeriram utilizar o Modelo V na fase de desenvolvimento do produto. Logo, o trabalho

contribuiu apenas com a contextualização do problema investigado com o ambiente de PDP e gestão de projetos.

## 6 CONCLUSÕES

Em parte dos centros de engenharia integrada, os profissionais geralmente não se preocupam com o processo de projeto de seus sistemas e com as consequentes estratégias de desenvolvimento. Focam, na maioria das vezes, apenas nos aspectos técnicos, científicos e tecnológicos das soluções dos problemas que lhes são apresentados. Entretanto, a crescente necessidade por resultados de melhor qualidade e custo-benefício, que estão cada vez mais complexos e multidisciplinares, tem motivado a alteração dessa tradicional tratativa. Diante disso, evidencia-se o campo de metodologia de projeto no qual são estudadas formas e métodos de raciocínio mais lógicos, que auxiliam na identificação do problema, compilação do grande número de informações e na escolha das melhores decisões de projeto.

No âmbito da mecatrônica, o cenário é ainda mais agravante. O sucesso nos resultados é extremamente dependente desse modo de como foi conduzido o projeto, principalmente no aspecto sinérgico entre seus domínios. Entretanto, devido ao baixo entendimento de como as áreas, subsistemas e componentes se relacionam, se interagem e se comunicam durante as fases de desenvolvimento, a maior parte dos projetos mecatrônicos seguem a abordagem sequencial. Nesse modo de pensamento, as partes são idealizadas separadamente e, ao final, são apenas unidas. Contudo, os projetos que são conduzidos dessa maneira, muita das vezes, possuem seu desempenho limitado ou até ineficiente.

Diante disso, este trabalho propôs uma metodologia de projeto aplicada à concepção de sistemas mecatrônicos a partir da elaboração de um modelo prescritivo de desenvolvimento. O Modelo X proposto prescreve estágios estruturados, os quais mapeiam os caminhos a serem percorridos pela equipe de projeto, com o objetivo minimizar os problemas acima citados e alcançar os principais requisitos e funções do sistema de forma eficiente e otimizada.

O primeiro passo para alcançar o objetivo proposto foi construir a alfabetização sobre o tema por meio da revisão bibliográfica. Essa estratégia já era prevista visto que os problemas metodológicos são caracterizados pelo estudo de métodos, técnicas e ferramentas e de suas aplicações à definição, organização e solução de problemas teóricos e práticos. Além disso, como a mecatrônica é composta por quatro engenharias, seria muito estratégico investigar também como cada área trata o processo de projeto para compreender as relações entre seus componentes e variáveis. Por outro lado, era necessário também contextualizar a pesquisa com

as metodologias de gestão de projetos e desenvolvimento de produtos a fim de fortalecer a alfabetização no aspecto da aplicabilidade do problema investigado.

A fim de verificar o resultado encontrado, foram elencadas as principais características que o modelo deveria possuir, de acordo com as deficiências geralmente encontradas durante o processo de desenvolvimento de sistemas mecatrônicos. Após análise dos principais trabalhos relacionados com o tema, verificou-se pela TABELA 5.1 que o Modelo X foi o único a tratar de forma efetiva todos os atributos. Portanto, foi possível concluir que o objetivo deste trabalho foi alcançado de forma satisfatória.

Como perspectiva, pretende-se validar o modelo desenvolvido a partir de sua aplicação em um projeto real de engenharia. Assim como, é esperado que o mesmo seja aprimorado à medida que for testado. Além disso, será fundamental corroborar e legitimar sua eficiência perante os outros modelos a partir de dados estatísticos.

Por fim, é importante ressaltar que o presente trabalho foi muito importante para o aperfeiçoamento profissional do autor que vivenciou, como muitos alunos da engenharia, o problema de como conduzir um determinado processo de projeto, principalmente de sistemas mecatrônicos. Infelizmente, isso é uma realidade na maioria das universidades brasileiras nas quais não são ofertados conteúdos sobre metodologia de projeto nas estruturas curriculares dos cursos. Diante disso, o autor espera que a presente dissertação seja fonte de informação para auxiliar profissionais e estudantes de engenharia no desenvolvimento de sistemas mecatrônicos e também lhes despertar o interesse pela área

## REFERÊNCIAS

ABERDEEN GROUP. **System design: new product development for mechatronics**. Boston, MA. 2008. (www.aberdeen.com).

AMARAL, D. C.; CONFORTO, E. C. Escritório de projetos e gerenciamento ágil: um novo enfoque para a estrutura de apoio à gestão de projetos ágeis. **6º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**, Belo Horizonte, UFMG, 2007. 415-452.

ASIMOW, M. **Introdução ao projeto de engenharia**. São Paulo: Mestre Jou, 1968.

BACK, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983.

BACK, N. et al. **Projeto integrado de Produtos - Planejamento, Concepção e Modelagem**. São Paulo: Manole, 2008.

BARBALHO, S. C. M. **Modelo de referência para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos**: proposta e aplicações. São Carlos: Tese de doutorado, USP, 2006.

BARBERI, G.; FANTUZZI, C.; BORSARI, R. A model-based design methodology for the development of mechatronic system. **Mechatronics**, v. 24, p. 833-843, 2014.

BENNINGTON, H. D. Production of large computer programs. **Symposium on Advanced Programming Methods for Digital Computers**, 1956. 15-27.

BIRKHOFER, H.; JÄNSCH, J. The Development of the Guideline VDI 2221 - The Change of Direction. **International Design Conference**, Dubrovnik - Croatia, 2006.

BOEHM, B. A. A spiral model of software development and enhancement. **SIGSOFT Softw. Eng. Notes**, New York, v. 11, n. 4, p. 14-24, 1986.

BONFIM, G. A. **Metodologia de Projeto**. Recife: Setor de publicações da Universidade Federal de Pernambuco, 1984.

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

BROEHL, A. P.; DROESCHEL, W. **Das V-model**: Der Standard fuer die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. 2ª. ed. München: Oldenbourg Verlag, 1995.

BUUR, J. **A theoretical approach to mechatronical design**. Institute for Engineering Design. Technical University of Denmark: Doctoral Thesis, 1990.

CARVALHO, L. F. **Análise da Cultura Organizacional no Gerenciamento de Projetos**. USP, São Paulo: Dissertação de Mestrado, 2015.

CHIN, G. **Agile Project Management: how to succeed in the face of changing project requirements**. New York: Amacom, 2004.

CLARK, K. B.; FUGIMOTO, T. **Product development performance: strategy, organization and management in the world auto industry**. Boston, United States: Harvard Business School Press, 1991.

CLEMENTS, J. P.; GIDO, J. **Gestão de projetos**. São Paulo: Thomson, 2007.

COLLYER, S. Project management approaches for dynamic environments. **International Journal of Project Management**, 2008.

CONFORTO, E. C. **Gerenciamento ágil de projetos: proposta e avaliação de método para gestão de escopo e tempo**. São Paulo, USP: Dissertação de Mestrado, 2009.

COOPER, R. **Winning at New Product: acceleranting the process from idea to launch**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1993.

COUTURIER, P. et al. Tracking the consequences of design decisions in Mechatronic Systems Engineering. **Mechatronics**, v. 24, p. 763-774, 2014.

DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentos da administração da produção**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

DEMO, P. **Pesquisa e construção do conhecimento: metodologia científica no caminho de Habermas**. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1994.

DIXON, J.; POLI, C. **Engineering design and design manufacturing: A structured approach**. Conway, MA: Field Stone Publishers, 1995.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. 11<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

DORF, R.; BISHOP, R. **Modern Control Systems**. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

EVBUOMWAN, N. F. O.; SIVALOGANATHAN, S.; JEBB, A. A Survey of Design Philosophies, Models, Methods and Systems. **Proc. Instn. Mech. Engers**, 1996. 301-320.

FERNANDES, D. S. F. **Análise de Similaridades de Modelagem no Emprego de Técnicas Conexionistas e Evolutivas da Inteligência Computacional Visando à Resolução de Problemas de Otimização Combinacional Estudo de Caso - Problema do Caixeiro Viajante**. São Paulo, USP: Dissertação de Mestrado, 2009.

FINKELSTEIN, L.; FINKELSTEIN, A. C. W. Review of Design Methodology. **IEE Proceedings**, v. 130, 1983.

FÖLLINGER, O. **Regelungstechnik—Einführung in die Methoden und ihre Anwendung**. Heidelberg: Hüthig, 2008.

FRANCO, M. A. P. **Uma abordagem baseada em atividades para gestão e determinação de custos do processo na engenharia de requisitos**. USP, São Paulo: Dissertação de Mestrado, 2007.

GAJSKI, D. D.; KUHN, R. New VLSI tools. **IEEE Computer**, p. 11-14, 1983.

GAJSKI, D. et al. **System Design Methodology and Tools**. Center for Embedded Computer Systems, University of California. Irvine, CA. 2003. (CECS-0302).

GAJSKI, D. et al. **Embedded systems design - modeling, synthesis and verification**. Dordrecht: Springer, 2009.

GAUSEMEIER, J. et al. Integrative development of product and production system for mecatronic products. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 27, p. 772-778, 2011.

GRIMHEDEN, M.; HANSON, M. Mechatronics - the evolution of an academic discipline in engineering education. **Mechatronics**, v. 15, p. 179-192, 2005.

HARASHIMA, F.; TOMIZUKA, M.; FUKUDA, T. Mechatronics: what is it, why and how? **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 1, p. 1-4, 1996.

HEHENBERGER, P. Perspectives on hierarchical modeling in mechatronic design. **Advanced Engineering Informatics**, v. 28, p. 188-197, 2014.

HEHENBERGER, P. et al. Hierarchical design models in the mechatronic product development process of synchronous machines. **Mechatronics**, v. 20, p. 864-875, 2010.

HIGHSMITH, J. **Agile Project Management: creating innovative products**. Boston: Addison-Wesley, 2004.

HISTANDM, M.; ALCIATORE, D. **Introduction to Mechatronics and Measurement Systems**. Colorado: McGraw-Hill, 2006.

HORIKAWA, O. **Características de projeto de sistemas mecatrônicos**. Tese de Livre Docência. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **The art of electronics**. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1999.

HUBKA, V. **Theory of Thechnical Systems**. London: Spring-Verlag, 1988.

HUNT, V. D. **Mechatronics: Japan's Newest Threat**. New York, United States: Chapman and Hall, 1988.

HYBS, I.; GERO, J. S. **An Evolutionary Process Model of Design**. [S.l.]: Des. Stud., 1992.

IPMA. **Association International Project Management**. Netherlands: IPMA, 2006.

ISERMANN, R. Mechatronic systems-innovative products with embedded control. **Control Engineering Practice**, v. 16, p. 14-29, 2008.

KERZNER, H. **Project Management a System Approach to Planning, Scheduling and Controlling**. Ney York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984.

LEACH, L. **Lean project management: eight principals for success**. Idaho: Advanced Projects Boise, 2005.

LEE, T. **Complexity Theory in Axiomatic Design**. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT): Tese de Doutorado, 2003.

LIMA II, E. J. et al. Development of a robot for orbital welding. **Industrial Robot: An International Journal**, Belo Horizonte, Minas Gerais, p. 321-325, 2005.

MARCH, L. The logic of Design. **Developments in designing methodology**, London, 1984. 265-276.

MARCHETT, E.; BRIGGS, A. H. **Practical Design Based on Method (Fundamental Design Method)**. London: Ed. S. A. Gregory, Butterworth, 1966.

MARIBONDO, J. D. F. **Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de sistemas modulares, aplicada a unidade de processamento de resíduos sólidos domiciliares**. Florianópolis: Tese de Doutorado. UFSC, 2000.

MATTOS, J. L.; GUIMARÃES, L. S. **Gestão da tecnologia e inovação: uma abordagem prática**. São Paulo: Saraiva, 2005.

MHENNI, F. et al. A SysML-based methodology for mechatronic system architectural design. **Advanced Engineering Informatics**, v. 28, p. 218-231, 2014.

NETO, G. G. D.; DEDINI, F. G. Sistemática e Metodologia de Projeto: uma abordagem para o desenvolvimento de produtos. **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Capina Grande, Paraíba, 2010.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

OCG. **PRINCE2 - Projects in Controlled Enviroments**. Londres: Office of Government Commerce, 1996.

PAHL, G. et al. **Engineering design - a systematic approach**. 3ª. ed. Berlin: Springer, 2007.

PAHL, G. et al. **Engineering design - a systematic approach**. Londres: Springer, 2007.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering Design**. [S.l.]: Original German Edition, 1971.

PERMINOVA, O.; GUSTAFSSON, M.; WIKSTRÖM, K. Defining uncertainty in projects - a new perspective. **International Journal of Project Management**, v. 26, p. 73-79, 2008.

PERTENCE, A. E. D. M. **Metodologia Básica de Projetos Mecânicos Industriais**. UFMG. Belo Horizonte. 2014. Notas de Aula.

PMI. **A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide)**. Newton Square: Project Management Institute, 2013.

PRASAD, B. **Concurrent engineering fundamentals: integrated product and process organization**. New Jersey, United States: Prentice Hall, 1996.

PUGH, S. **Total design: Integrated Methods for Successful Product Engineering**. New York: Prentice Hall, 1991.

QAMAR, A.; WIKANDER, J.; DURING, C. Managing dependencies in mechatronic design: a case study on dependency management between mechanical design and system design. **Engineering with computers**, v. 31, p. 631-646, 2015.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

ROYCE, W. W. Managing the development of large software systems - Concepts and techniques. **WESCON Technical Papers**, Los Angeles, 1970.

ROZENFELD, H. E. A. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. São Paulo: Saraiva, 2006.

RZEVSKI, G. On Conceptual Design of Intelligent Mechatronics Systems. **Mechatronics**, v. 13, p. 1029-1044, 2003.

SALÉN, A. F.; MAHFOUZ, A. A. A Proposed Approach to Mechatronics Design and Implementation Education-Oriented Methodology. **Innovative Systems Design and Engineering**, v. 4, 2013.

SCHWABER, K. **Agile Project Management with Scrum**. Washington: Microsoft Press, 2004.

SHENHAR, A.; DVIR, D. **Reinventing Project Management: the diamond approach to successful growth and innovation**. Boston: Harvard Business School Press, 2007.

SHETTY, D.; KOLK, R. A. **Mechatronics System Design**. 2ª. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

- SMITH, P. G. **Flexible Product Development - building agility for changing markets**. San Francisco: Jossey-Brass, 2007. 369-376 p.
- SOMMERVILLE, I. **Software Engineering**. München: Pearson Studium, 2007.
- SUH, N. **The Principles of Design**. New York: Oxford Press, 1990.
- TOMIYAMA, T. et al. Design Methodologies: Industrial and educational applications. **Manufacturing Technology**, v. 58, p. 543-565, 2009.
- TÖRNGREN, M. et al. Integrating viewpoints in the development of mechatronic products. **Mechatronics**, v. 24, p. 745-762, 2014.
- ULLMAN, D. G. **The Mechanical Design Process**. 4<sup>a</sup>. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2010.
- ULRICH, K. T. **Product Design and Development**. New York: McGraw-Hill, 2007.
- VASIC, V. S.; LAZAREVIC, M. P. Standard Industrial Guideline for Mechatronic Product Design. **FME Transactions**, 2008. 103-108.
- VEREIN-DEUTSCHER-INGENIEURE. **VDI-guideline 2221 - a systematic approach to the development and design of technical systems and products**. Duesseldorf: VDI Press, 1993.
- VEREIN-DEUTSCHER-INGENIEURE. **VDI-guideline 2206 - design methodology for mechatronic systems**. Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- VERZUH, E. **Mba Compacto, Gestão de Projetos**. São Paulo: Campus, 2000.
- WANG, Y. et al. A proposed approach to mechatronics design education: Integrating design methodology, simulation with projects. **Mechatronics**, v. 23, p. 942-948, 2013.
- WYSOCKI, R.; MCGARY, R. **Effective Project Management: tradicional, adaptative, extreme**. Indiana: Wiley Publishing, 2003.