



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.17.14.38-TDI

**TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA PARA O
PLANEJAMENTO DE CRONOGRAMAS,
ORÇAMENTOS E QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DOS
PROJETOS**

Giuliani Paulineli Garbi

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Geilson Loureiro, e Luiz Gonzaga Trabasso, aprovada em 24 de fevereiro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KK9J35>>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID) **BIBLIO-**

TECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.17.14.38-TDI

**TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA PARA O
PLANEJAMENTO DE CRONOGRAMAS,
ORÇAMENTOS E QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DOS
PROJETOS**

Giuliani Paulineli Garbi

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Geilson Loureiro, e Luiz Gonzaga Trabasso, aprovada em 24 de fevereiro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KK9J35>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Garbi, Giuliani Paulineli.

G163t Técnica da estimativa conjugada para o planejamento de cronogramas, orçamentos e quantificação dos riscos dos projetos / Giuliani Paulineli Garbi. – São José dos Campos : INPE, 2016.

xxxvi + 261 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/11.17.14.38-TDI)

Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadores : Drs. Geilson Loureiro, e Luiz Gonzaga Trabasso.

1. Cronograma. 2. Orçamento. 3. Quantificação dos riscos.
4. Técnica da estimativa conjugada. 5. CBERS. I.Título.

CDU 658.511.4-047.74



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

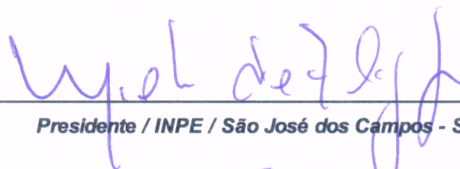
Aluno (a): **Giuliani Paulinei Garbi**

Título: " TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA PARA O PLANEJAMENTO DE CRONOGRAMAS, ORÇAMENTOS E QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DOS PROJETOS".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em


**Engenharia e Tecnologia
Espaciais/Gerenciamento de Sistemas
Espaciais**

Dr. Milton de Freitas Chagas Junior




Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Geilson Loureiro



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Luiz Gonzaga Trabasso




Orientador(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Dr. Fabiano Luis de Sousa



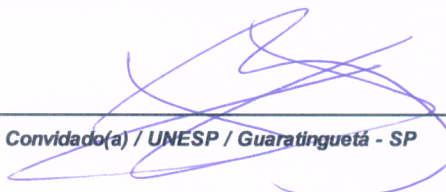
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Luis Eduardo Vergueiro Loures da Costa




Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Dr. Jorge Muniz Junior



Convidado(a) / UNESP / Guaratinguetá - SP

Dr. Ernesto Cordeiro Marujo



Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 24 de Fevereiro de 2016

Lado de Luz

As provas na Terra apresentam sempre o lado de luz de que são mensageiras. Entretanto, para observá-lo, urge reconhecer os sinônimos espirituais de que essas mesmas provas se revestem, como sejam:

encargo difícil - privilégio;
dever cumprido - senda libertadora;
rotina - conquista de competência;
solidão - tempo de pensar;
contratempo - aviso benéfico;
contrariedades no cotidiano - treino de paciência;
tribulação de improviso - socorro específico;
moléstia súbita - apoio de emergência;
lesão congênita - corrigenda no espírito;
adversários - fiscais proveitosos;
crítica - apelo a burilamento;
censura - convite a reajuste;
ofensa - invocação à tolerância;
menosprezo - teste de amor;
tentação - curso de resistência;
fracasso - necessidade de revisão;
lar em discórdia - área de resgate;
parente complexo - dívida em cobrança;
obstáculo social - ensino de humildade;
deserção de afetos - renovação compulsória;
golpes - aulas para discernimento;
desilusão - visita da verdade;
prejuízo - identificação de pessoas;
decepções - informes claros;
renúncia - rumo certo;
crise - aferição de valor;
sacrifício - crescimento espiritual;

Meditemos na significação oculta dos problemas com que somos defrontados no mundo e saibamos aproveitar, enquanto no Plano Físico, a vossa abençoada escola de elevação.

Texto extraído do livro "Busca e Acharás", escrito por Emmanuel e psicografado por Chico Xavier

Dedico esta tese a meu filho Benício Bianco Lima Garbi, na esperança de que meu esforço para a finalização com sucesso deste trabalho seja um exemplo e motivação para que meu filho possa aproveitar as chances de evolução proporcionadas por este mundo.

Também dedico esta tese a minha amada companheira Débora Bianco Lima Garbi que, sempre me apoiou em meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Para Deus que, em sua imensa generosidade, guiou-me para finalizar mais esta etapa, de tantas outras que virão de minha humilde missão neste plano.

Ao Prof. Dr. Geilson Loureiro que, proporcionou as orientações adequadas para a finalização desta tese, bem como também mediou com a equipe do LIT o acesso das informações relacionadas às durações e aos custos planejados e executados da etapa de AIT dos satélites CBERS-3 e 4 no centro espacial chinês.

Ao Prof. Dr. Luís Gonzaga Trabasso que, como segundo orientador, conduziu-me de forma relevante na formatação da colaboração inédita desta tese.

Ao Prof. Dr. Milton de Freitas Chagas Júnior que, dentre muitas colaborações, destaco aqui a sugestão do nome técnica da estimativa conjugada para a formulação matemática desta tese.

E por fim, a todos os demais membros das bancas, colaboradores do INPE e alunos do programa da Pós-Graduação que, de alguma maneira colaboraram no desenvolvimento desta tese.

RESUMO

Esta tese apresenta o desenvolvimento, a implementação e a verificação da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada para o planejamento dos projetos. A técnica da estimativa conjugada oferece ferramentas de análises analíticas, pois, a duração modelada está em função da duração planejada e da variabilidade (incerteza aleatória) do custo, bem como o custo modelado está em função do custo planejado e da variabilidade (incerteza aleatória) da duração, e também oferece ferramentas de análises gráficas, pois, as durações e os custos das atividades, pacotes de trabalhos ou das fases do projeto são representados no gráfico bidimensional e no gráfico de *trade-off*. No desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, o diagrama de precedências do projeto foi considerado como uma cadeia cinemática dos manipuladores robóticos, que pode estar na configuração da cadeia aberta (série), fechada (paralela) e/ou híbrida. A implementação e a verificação da técnica da estimativa conjugada ocorreu com a utilização dos cronogramas e orçamentos planejados e executados da etapa de montagem, integração e testes dos satélites CBERS-3 e 4 no centro espacial chinês durante a campanha de lançamento. Com a cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada foi possível modelar as variabilidades das durações e dos custos do CBERS-3. Estas variabilidades modeladas do CBERS-3 foram utilizadas pela cinemática direta da técnica da estimativa conjugada para modelar as durações e os custos do CBERS-4. Os valores das durações e dos custos modelados do CBERS-4 foram comparados e então verificados com os valores das durações e dos custos executados do CBERS-4. A quantificação dos riscos do satélite CBERS-4 foi realizada com as formulações matemáticas da técnica da estimativa conjugada e do PERT, por meio da simulação de Monte Carlo e a função de distribuição cumulativa. Em que, para o exemplo do CBERS-4 adotado nesta tese, a técnica da estimativa conjugada apresentou resultados mais adequados para as probabilidades de ocorrências do risco da duração e do custo. E por fim, a técnica da estimativa conjugada também foi implementada em um exemplo de projeto com o diagrama de precedências na configuração da cadeia cinemática fechada (paralela) e em outro exemplo de projeto composto com dois tipos de custos (direto e indireto). Assim, conclui-se que a técnica da estimativa conjugada pode ser utilizada amplamente para apoiar o planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos de diferentes tipos de indústrias e setores, inclusive projetos do setor espacial.

Palavras-chave: cronograma, orçamento, quantificação dos riscos, técnica da estimativa conjugada e CBERS.

COMBINED ESTIMATE TECHNIQUE FOR THE SCHEDULE AND BUDGET PLANNING AND RISKS QUANTIFICATION OF THE PROJECTS

ABSTRACT

This thesis presents the development, implementation and verification of mathematical formulation of the combined estimative technique for the projects planning. Combined estimate technique provides tools of analytical analysis, given that the modeled duration depends on the planned duration and on the cost variability (aleatory uncertainty), as well as the modeled cost depends on the planned cost and on the duration variability (aleatory uncertainty), and also provides tools of graphical analysis, given that the durations and costs of activities, work packages or phases of the project are represented in the bidimensional and trade-off graphics. In developing the mathematical formulation of the combined estimative technique, the project precedence diagram was considered as a kinematic chain of robotics manipulators, which may be in chain configuration open (serial), closed (parallel) and/or hybrid. The combined estimate technique was implemented and verified through analysis of scheduling and budgeting planning of the assembly, integration and testing stage of CBERS-3 and 4 satellites in the chinese space center during the launching campaign. With inverse kinematic of the combined estimate technique was possible to model the durations and costs variabilities of CBERS-3. This modeled variabilities of CBERS-3 was utilized through direct kinematic of the combined estimate technique to model the durations and costs of CBERS-4. The modeled durations and costs of CBERS-4 were compared and verified with executed durations and costs of CBERS-4. Risk quantification of CBERS-4 was performed with mathematical formulations of the combined estimate technique and PERT by Monte Carlo simulations and the cumulative distribution function. Where, for the example of CBERS-4 adopted in this thesis, the combined estimate technique presented more adequate results for the risk occurrence probabilities of duration and cost. And finally, combined estimate technique also is implemented in an example of project with the precedence diagram in configuration of closed kinematic chain, and in other example of project with two types of costs (direct and indirect). Therefore, it is concluded that the combined estimate technique may be applied widely to support the scheduling, budgeting and risk quantification of the projects of different types of industries and sectors, including the space projects.

Keywords: Scheduling, budgeting, risk quantification, combined estimate technique and CBERS.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1. Estrutura da tese organizada em capítulos e seus anexos.	10
Figura 2.1. Fases do gerenciamento do projeto e as áreas de conhecimentos do PMI.....	20
Figura 2.2. Fases do gerenciamento do projeto e os grupos de assuntos da ISO.....	21
Figura 2.3. Fases do gerenciamento do projeto e as disciplinas da ESA.....	22
Figura 2.4. Processos de gerenciamento do recurso do projeto da ISO.	24
Figura 2.5. Processos de gerenciamento do tempo do projeto do PMI.	27
Figura 2.6. Processos de gerenciamento do tempo do projeto da ISO.	28
Figura 2.7. Processos de gerenciamento do tempo do projeto da ESA.	29
Figura 2.8. Processos de gerenciamento do custo do projeto do PMI.	31
Figura 2.9. Processos de gerenciamento do custo do projeto da ISO.	32
Figura 2.10. Processos de gerenciamento do custo do projeto da ESA.	34
Figura 2.11. Processos de gerenciamento dos riscos do projeto do PMI.....	38
Figura 2.12. Processos de gerenciamento dos riscos do projeto da ISO.	39
Figura 2.13. Processos de gerenciamento dos riscos do projeto da ESA.	41
Figura 2.14. Principais tipos de estimativas dos projetos.....	43
Figura 2.15. Visão geral do gerenciamento do projeto.....	72
Figura 2.16. Gerenciamento do projeto com o <i>Trade-off</i>	73
Figura 2.17. Modelo de abordagem de sistema.	75
Figura 2.18. Gráfico com a performance fixa e <i>trade-off</i> entre o tempo e o custo.....	77
Figura 2.19. Gráfico com o custo fixo e <i>trade-off</i> entre o tempo e o nível da performance.	78
Figura 2.20. Gráfico com o tempo fixo e <i>trade-off</i> entre o custo e o nível da performance.	78
Figura 3.1. Sistemas de coordenadas do Trabalho: duração e custo.	85

Figura 3.2. Sistemas de coordenadas do Trabalho considerando as incertezas aleatórias ou variabilidades da duração (alfa) e do custo (beta). ..	86
Figura 3.3. Dinâmica da cinemática direta e inversa da técnica da estimativa conjugada.....	93
Figura 3.4. Cinemática direta da técnica da estimativa conjugada com a linguagem IDEF0.....	95
Figura 3.5. Cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada com a linguagem IDEF0.....	96
Figura 3.6. Diagrama de precedências utilizado como exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.....	98
Figura 3.7. Diagrama de precedências representado com os componentes da cinemática direta da estimativa conjugada com o IDEF0.....	99
Figura 3.8. Diagrama de precedências representado com os componentes da cinemática inversa da estimativa conjugada com o IDEF0.	99
Figura 3.9. Sistemas de coordenadas das atividades do exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da estimativa conjugada.....	101
Figura 3.10. Universo de valores da formulação matemática da duração da técnica da estimativa conjugada.	107
Figura 3.11. Universo de valores da formulação matemática do custo da técnica da estimativa conjugada.....	108
Figura 3.12. Gráfico bidimensional do exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.	110
Figura 3.13. Gráfico da análise de <i>trade-off</i> do exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.	111
Figura 3.14. Processo de implementação da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada.....	117
Figura 3.15. Processo de implementação da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada.....	118

Figura 3.16. Processo de implementação da técnica da estimativa conjugada para a quantificação dos riscos.	120
Figura 4.1. Ilustração do satélite CBERS da segunda geração.....	123
Figura 4.2. Durações e custos planejados e executados da etapa de AIT do CBERS-3 no BACCC.	131
Figura 4.3. Diagrama IDEF0 dos estados do AIT do CBERS-3 no BACCC... ..	132
Figura 4.4. Diagrama IDEF0 da etapa de AIT do CBERS-3 no BACCC.	133
Figura 4.5. Gráfico bidimensional (tempo e custo) do AIT do CBERS-3 no BACCC.....	134
Figura 4.6. <i>Trade-off</i> (tempo e custo) do estado A do AIT do satélite CBERS-3.	139
Figura 4.7. <i>Trade-off</i> (tempo e custo) da etapa de AIT do satélite CBERS-3.	140
Figura 4.8. Durações e custos planejados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.....	143
Figura 4.9. Diagrama IDEF0 dos estados do AIT do CBERS-4 no BACCC... ..	145
Figura 4.10. Diagrama IDEF0 da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.	145
Figura 4.11. Gráfico bidimensional (planejado, modelado e executado) dos estados do AIT do CBERS-4 no BACCC.	150
Figura 4.12. Resultado da análise com todas as curvas de <i>trade-offs</i> dos estados e da etapa de AIT do CBERS-4.....	153
Figura 4.13. Probabilidade do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada.	162
Figura 4.14. Distribuição normal do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada.....	163
Figura 4.15. Probabilidade do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada.....	164
Figura 4.16. Distribuição do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada.....	164
Figura 4.17. Probabilidade do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica PERT.	169

Figura 4.18. Distribuição normal do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica PERT.....	170
Figura 4.19. Probabilidade do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica PERT.....	171
Figura 4.20. Distribuição do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica PERT.....	171
Figura 4.21. Probabilidade do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 entre as técnicas da estimativa conjugada e PERT.	173
Figura 4.22. Probabilidade do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 entre as técnicas da estimativa conjugada e PERT.	175
Figura A.1. Total de publicações e citações com a palavra-chave “cronograma”.	206
Figura A.2. Total de publicações e citações com a palavra-chave “orçamento”.	206
Figura A.3. Total de publicações e citações com a palavra-chave “quantificação dos riscos”.....	207
Figura A.4. Total de publicações e citações com a palavra-chave “CBERS”.	208
Figura B.1. Problema da cinemática direta e inversa.	211
Figura B.2. Junta revoluta ou rotacional.....	212
Figura B.3. Junta prismática ou linear.	212
Figura B.4. Junta Helicoidal ou parafuso.....	213
Figura B.5. Junta cilíndrica.....	213
Figura B.6. Junta universal.....	214
Figura B.7. Junta esférica.	214
Figura B.8. Junta planar.	215
Figura B.9. Cadeia cinemática aberta (serial) com juntas revolutas.....	216
Figura B.10. Cadeia cinemática fechada (paralela) com juntas revolutas.....	216
Figura B.11. Cadeia cinemática híbridas com juntas revolutas.....	217
Figura B.12. Manipulador robótico do tipo serial.	218
Figura B.13. Manipulador robótico do tipo paralelo.	218
Figura B.14. Manipulador robótico do tipo paralelo, plataforma de Stewart. ...	219

Figura B.15. Manipulador robótico na configuração cartesiana.....	220
Figura B.16. Manipulador robótico na configuração cilíndrica.....	220
Figura B.17. Manipulador robótico na configuração esférica.....	221
Figura B.18. Manipulador robótico na configuração revoluta ou articulada....	221
Figura B.19. Sistemas de coordenadas fixo e móvel com origens iguais.....	226
Figura B.20. Rotação (alfa) no eixo da abscissa (x_1) do sistema de coordenadas móvel.....	228
Figura B.21. Rotação (beta) no eixo da ordenada (y_1) do sistema de coordenadas móvel.....	229
Figura B.22. Rotação (gama) no eixo da ordenada (z_1) do sistema de coordenadas móvel.....	230
Figura B.23. Sistemas de coordenadas fixo e móvel com origens transladadas.	233
Figura C.1. Diagrama de precedências do exemplo da cadeia cinemática direta fechada.	238
Figura C.2. Projeto com cadeia cinemática fechada com a linguagem IDEF0.	239
Figura C.3. Gráfico bidimensional (planejado e modelado) do projeto com a configuração da cadeia cinemática fechada.	242
Figura C.4. <i>Trade-off</i> (tempo e custo) do projeto com a configuração da cadeia cinemática fechada.	246
Figura D.1. Diagrama de precedências do exemplo da cadeia cinemática inversa aberta.....	250
Figura D.2. Atividades do projeto com dois tipos de custos com a linguagem IDEF0.	252
Figura D.3. Gráfico bidimensional (tempo e custo) do projeto com dois tipos de custos.....	253
Figura D.4. <i>Trade-off</i> (tempo e custo) da atividade direta do projeto com dois tipos de custos.	257
Figura D.5. <i>Trade-off</i> (tempo e custo) da atividade indireta do projeto com dois tipos de custos.	260

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1. Categorias das restrições dos projetos.	74
Tabela 2.2. Preferência da indústria pelo <i>trade-off</i> dos projetos.	79
Tabela 4.1. Atributos dos estados e da etapa de AIT do CBERS-3.	139
Tabela 4.2. Atributos dos estados e da etapa de AIT do CBERS-4.	147

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIT	<i>Assembly, Integration and Testing.</i>
AR	<i>Acceptance Review (Revisão de Aceitação).</i>
BACCC	<i>Beijing Aerospace Command and Control Center.</i>
CAST	Academia Chinesa de Tecnologia Espacial.
CBERS	<i>China Brazil Earth Resources Satellite.</i>
CCPM	<i>Critical Chain Path Method.</i>
CDR	<i>Critical Design Review (Revisão de Projeto Detalhado).</i>
COCOMO	<i>Constructive Cost Model.</i>
CPM	<i>Critical Path Method.</i>
CSE	Área de Concentração em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais.
C&T	Ciência e Tecnologia.
EAP	Estrutura Analítica do Projeto.
ECSS	<i>European Cooperation for Space Standardization.</i>
EDA	<i>Estimation of Distribution Algorithm.</i>
ESA	<i>European Space Agency.</i>
ETE	Engenharia e Tecnologia Espacial.
FPA	<i>Function Point Analysis.</i>
ICAM	<i>Integrated Computer Aided Manufacturing.</i>
IDEF0	<i>ICAM Definition for Functional Modelling.</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
IRS	Imageador Multiespectral e Termal.
LIT	Laboratório de Integração e Testes.
MDR	<i>Mission Definition Review (Revisão de Definição de Missão).</i>
MLI	<i>Multi Layer Insulation.</i>
MUX	Câmera Multiespectral Regular.
PAN	Câmera Pancromática e Multiespectral.
PDM	<i>Precedence Diagram Method.</i>

PDR	<i>Preliminary Design Review (Revisão de Projeto Preliminar).</i>
PERT	<i>Project Evaluation Review Technique.</i>
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge.</i>
PMI	<i>Project Management Institute.</i>
PRR	<i>Preliminary Requirements Review (Revisão Preliminar de Requisitos).</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization.</i>
P&D	<i>Pesquisa e Desenvolvimento.</i>
RCSPSP	<i>Resource Constrained Project Scheduling Problem.</i>
R&D	<i>Research and Development.</i>
SA	<i>Simulated Annealing.</i>
SAG	<i>Solar Array Generator.</i>
SDPM	<i>Success Driven Project Management.</i>
SLOC	<i>Source Line of Code.</i>
SRCPSP	<i>Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem.</i>
SRR	<i>System Requirements Review (Revisão de Requisitos de Sistema).</i>
S&T	<i>Science and Technology.</i>
UCP	<i>Use Case Points.</i>
WFI	<i>Câmera de Campo Largo.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Valor Esperado ou Aprimorado.
MP	Valor Mais Provável.
O	Valor Otimista.
P	Valor Pessimista.
R	Junta Revoluta ou rotacional.
P	Junta Prismática ou linear.
H	Junta Helicoidal, parafuso ou fuso.
C	Junta Cilíndrica.
U	Junta Universal.
S	Junta Esférica.
E	Junta Planar.
τ	Trabalho.
F	Força.
d	Distância ou Duração.
M	Massa.
a	Aceleração.
C	Custo.
T	Tempo ou duração.
x	eixo da abscissa.
y	eixo da ordenada.
z	eixo da cota.
α	Incerteza aleatória ou variabilidade da duração.
cossenoalfa	Incerteza aleatória ou variabilidade da duração.
cosalfa	Incerteza aleatória ou variabilidade da duração.
β	Incerteza aleatória ou variabilidade do custo.
cossenobeta	Incerteza aleatória ou variabilidade do custo.
cosbeta	Incerteza aleatória ou variabilidade do custo.
$\cos\theta$	Menor ângulo entre os dois vetores do produto escalar.
f	Fator crítico.

(1×1)	Matriz com uma linha e uma coluna.
(1×3)	Matriz com uma linha e três colunas.
(3×1)	Matriz com três linhas e uma coluna.
(3×3)	Matriz com três linhas e três colunas.
(4×4)	Matriz com quatro linhas e quatro colunas.
$R(3 \times 3)$	Representa a matriz de rotação entre o sistema de coordenadas móvel e fixo.
$P(3 \times 1)$	Representa o efeito de transladação entre os sistemas de coordenadas fixo e móvel.
$f(1 \times 3)$	Representa a transformação de perspectiva.
$f(1 \times 1)$	Representa o fator de escala.
$Ox_0y_0z_0$	sistema de coordenadas fixo.
$Ox_1y_1z_1$	sistema de coordenadas móvel.
i_0, j_0, k_0	vetores unitários do sistema de coordenadas fixo.
i_1, j_1, k_1	vetores unitários do sistema de coordenadas móvel.
a_0	Ponto A representado no sistema de coordenadas fixo.
a_1	Ponto A representado no sistema de coordenadas móvel.
a_{0x}	Componente da abscissa do ponto A representado no sistema de coordenadas fixo.
a_{0y}	Componente da ordenada do ponto A representado no sistema de coordenadas fixo.
a_{0z}	Componente da cota do ponto A representado no sistema de coordenadas fixo.
a_{1x}	Componente da abscissa do ponto A representado no sistema de coordenadas móvel.
a_{1y}	Componente da ordenada do ponto A representado no sistema de coordenadas móvel.
a_{1z}	Componente da cota do ponto A representado no sistema de coordenadas móvel.
$R_{x_0, \alpha}$	Matriz de rotação (alfa) no eixo da abscissa (x_0) do sistema de coordenadas móvel.

$R_{y_0,\beta}$ Matriz de rotação (beta) no eixo da ordenada (y_0) do sistema de coordenadas móvel.

$R_{z_0,\gamma}$ Matriz de rotação (gama) no eixo da cota (z_0) do sistema de coordenadas móvel.

$(R_{x_0,\alpha})^T$ Matriz transposta de rotação (alfa) no eixo da abscissa (x_0) do sistema de coordenadas móvel.

$(R_{y_0,\beta})^T$ Matriz transposta de rotação (beta) no eixo da ordenada (y_0) do sistema de coordenadas móvel.

$(R_{z_0,\gamma})^T$ Matriz transposta de rotação (gama) no eixo da cota (z_0) do sistema de coordenadas móvel.

d_1^0 Deslocamento entre as origens dos sistemas de coordenadas fixo e móvel.

seno Operação trigonométrica do seno.

coseno Operação trigonométrica do coseno.

i Representa o conjunto das durações presentes nas atividades do projeto ($i = 1, 2, \dots, n$);

j Representa o conjunto de custos presentes nas atividades do projeto ($j = 1, 2, \dots, m$);

A_i^j Matriz de transformação homogênea básica da técnica da estimativa conjugada dos projetos;

$H_i^j(x, \alpha_i^j)$ Matriz de transformação homogênea básica com rotação α_i^j no eixo da abscissa (x);

$H_i^j(T_i^j; C_i^j)$ Matriz de transformação homogênea básica sem rotação representando a transladação com a duração T_i^j e o custo R_i^j ;

$H_i^j(y, \beta_i^j)$ Matriz de transformação homogênea básica com rotação β_i^j no eixo da ordenada (y);

T_i^j Representa a estimativa da duração;

C_i^j Representa a estimativa do custo;

t_i^j Representa a duração modelada ou executada;

c_i^j Representa o custo modelado ou executado;

f_i^j Representa o fator crítico da atividade, este fator é necessário para o caso da atividade ter duração e custos maiores que o dobro da estimativa;

α_i^j Representa a incerteza aleatória ou variabilidade da duração, e

β_i^j Representa a incerteza aleatória ou variabilidade do custo.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO	2
1.2. OBJETIVO GERAL.....	4
1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3. METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DA TESE	5
1.4. ESTRUTURA DA TESE.....	8
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	11
2.1. GERENCIAMENTO DO TEMPO, CUSTO E RISCOS DOS PROJETOS	11
2.1.1. DEFINIÇÕES DE PROJETO E GERENCIAMENTO DO PROJETO	12
2.1.2. FASES OU GRUPOS DE PROCESSOS DO PROJETO.....	14
2.1.3. ÁREAS DE CONHECIMENTO DE GERENCIAMENTO DOS PROJETOS.....	19
2.1.4. GERENCIAMENTO DO RECURSO DO PROJETO	22
2.1.5. GERENCIAMENTO DO TEMPO DO PROJETO	25
2.1.6. GERENCIAMENTO DO CUSTO DO PROJETO.....	29
2.1.7. GERENCIAMENTO DOS RISCOS DO PROJETO	34
2.2. TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS DOS PROJETOS	41
2.2.1. PRINCIPAIS TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS DOS PROJETOS ...	42
2.2.1.1. OPINIÃO ESPECIALIZADA	44
2.2.1.2. ESTIMATIVA ANÁLOGA.....	45
2.2.1.3. ESTIMATIVA PARAMÉTRICA	46
2.2.1.4. ESTIMATIVAS DE TRÊS PONTOS (PERT)	47
2.2.1.5. TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS DO PROJETO DE <i>SOFTWARE</i> ..	48
2.2.2. PROCESSO DE ESTIMATIVA DOS RECURSOS DO PROJETO	49
2.2.3. PROCESSO DE ESTIMATIVA DA DURAÇÃO DO PROJETO.....	50
2.2.4. PROCESSO DE ESTIMATIVA DO CUSTO DO PROJETO.....	51

2.2.5.	PROCESSO DE QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DO PROJETO	52
2.2.6.	UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS E QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS NAS ORGANIZAÇÕES	53
2.2.6.1.	UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS DA PRODUÇÃO.....	54
2.2.6.2.	UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	55
2.2.6.3.	UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	56
2.2.6.4.	UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS DO SETOR DE SERVIÇOS.....	58
2.2.6.5.	UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS PARA OUTROS TIPOS DE INDÚSTRIAS.....	59
2.2.6.6.	UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS PARA O SETOR ESPACIAL	60
2.3.	ABORDAGENS QUE CONSIDERAM AS INCERTEZAS NAS ESTIMATIVAS DOS PROJETOS E ANÁLISE DE <i>TRADE-OFF</i> ...	61
2.3.1.	ABORDAGENS QUE CONSIDERAM AS INCERTEZAS NAS ESTIMATIVAS DOS PROJETOS.....	62
2.3.1.1.	PRINCIPAIS TÉCNICAS QUE CONSIDERAM AS INCERTEZAS NAS ESTIMATIVAS DOS PROJETOS	65
2.3.2.	DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS DA PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA	67
2.3.2.1.	TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA - QUE USAM AMOSTRAGEM DIRETA	68
2.3.2.2.	TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA - QUE NÃO USAM AMOSTRAGEM DIRETA	70
2.3.3.	ANÁLISE DE <i>TRADE-OFF</i> EM GERENCIAMENTO DOS PROJETOS.....	72

3	DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS	81
3.1.	CONCEITOS FÍSICOS DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS	83
3.1.1.	CONCEITOS DE TRABALHO E ENERGIA PARA A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS.....	83
3.2.	OBJETIVOS DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS.....	88
3.3.	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS.....	91
3.4.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS.....	96
3.4.1.	INTRODUÇÃO DA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	97
3.4.2.	DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ (4X4) DE TRANSFORMAÇÃO HOMOGENEA BÁSICA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	100
3.4.3.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA DURAÇÃO E DO CUSTO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	104
3.4.4.	ANÁLISES DO GRÁFICO BIDIMENSIONAL E <i>TRADE-OFF</i> DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	109
3.5.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA GENÉRICA E PROCESSOS DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS	112
3.5.1.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA GENÉRICA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	113
3.5.2.	PROCESSOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	115
3.5.2.1.	PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DA CINEMÁTICA INVERSA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA	116
3.5.2.2.	PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DA CINEMÁTICA DIRETA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	117

3.5.2.3.	PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA PARA A QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS.....	119
4	IMPLEMENTAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	121
4.1.	INTRODUÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA NO PROGRAMA CBERS	121
4.1.1.	BREVE RESUMO SOBRE O PROGRAMA CBERS.....	122
4.1.2.	DELIMITAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA NO PROGRAMA CBERS	123
4.1.3.	DESCRIÇÃO DOS ESTADOS DA ETAPA DE AIT DOS CBERS 3 E 4 NO BACCC	124
4.1.4.	CONTEXTO DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA NA ETAPA DE AIT DOS CBERS 3 E 4 NO BACCC	126
4.2.	IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA NO CBERS-3.....	127
4.2.1.	APRESENTAÇÃO ESTRUTURADA DAS DURAÇÕES E DOS CUSTOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC ...	129
4.2.2.	DIAGRAMA IDEF0 PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC.....	131
4.2.3.	GRÁFICO BIDIMENSIONAL PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC	133
4.2.4.	MODELAGEM DAS VARIABILIDADES E ANÁLISE DE <i>TRADE-OFF</i> PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC	135
4.2.5.	COMENTÁRIOS DA ANÁLISE DE <i>TRADE-OFF</i> PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC	140
4.3.	CINEMÁTICA DIRETA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC	141
4.3.1.	APRESENTAÇÃO ESTRUTURADA DAS DURAÇÕES E DOS CUSTOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC ...	142

4.3.2.	DIAGRAMA IDEF0 PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC.....	143
4.3.3.	MODELAGEM DAS DURAÇÕES E DOS CUSTOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC	146
4.3.4.	GRÁFICO BIDIMENSIONAL PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC	148
4.3.5.	COMENTÁRIOS SOBRE A VERIFICAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	150
4.4.	QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DA DURAÇÃO E DO CUSTO PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC	153
4.4.1.	SIMULAÇÃO MONTE CARLO COM O MICROSOFT EXCEL....	154
4.4.2.	QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC COM A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	158
4.4.2.1.	GERAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DO CBERS-4 COM A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	159
4.4.2.2.	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DOS RISCOS DO CBERS-4 COM A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA	162
4.4.3.	QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC COM A TÉCNICA PERT	165
4.4.3.1.	GERAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DO CBERS-4 COM A TÉCNICA PERT.....	165
4.4.3.2.	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DOS RISCOS DO CBERS-4 COM A TÉCNICA PERT	169
4.4.4.	ANÁLISE DA QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DO AIT DO CBERS-4 ENTRE AS TÉCNICAS DA ESTIMATIVA CONJUGADA E PERT	172
4.4.4.1.	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO RISCO DO CUSTO DO CBERS-4 ENTRE AS TÉCNICAS DA ESTIMATIVA CONJUGADA E PERT	172

4.4.4.2.	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO RISCO DA DURAÇÃO DO CBERS-4 ENTRE AS TÉCNICAS DA ESTIMATIVA CONJUGADA E PERT	174
5	DISCUSSÕES SOBRE A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS.....	177
5.1.	DISCUSSÃO SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	177
5.2.	COMPARAÇÃO ENTRE A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA E AS DEMAIS TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS	179
5.3.	OBSERVAÇÕES E LIMITAÇÕES DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA.....	180
6	CONCLUSÕES.....	183
6.1.	RECOMENDAÇÕES	184
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
	ANEXO A – BIBLIOMETRIA COM O BANCO DE DADOS DA WEB OF SCIENCE	205
	ANEXO B - CONCEITOS DA CINEMÁTICA DOS MANIPULADORES ROBÓTICOS.....	209
B.1	INTRODUÇÃO SOBRE OS MANIPULADORES ROBÓTICOS.....	210
B.2	TIPOS DE JUNTAS	212
B.3	CADEIAS CINEMÁTICAS.....	215
B.3.1	CONFIGURAÇÕES DOS MANIPULADORES.....	219
B.4	FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS PARA A CINEMÁTICA DOS MANIPULADORES	222
B.4.1	MUDANÇAS DE SISTEMAS DE COORDENADAS	223
B.4.2	MATRIZ DE ROTAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS.....	225
B.4.3	MATRIZ DE TRANSLADAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS	233
B.4.4	MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO HOMOGÊNEA BÁSICA	234
	ANEXO C - IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA EM UMA CADEIA CINEMÁTICA FECHADA.....	237

C.1 APRESENTAÇÃO ESTRUTURADA DAS INFORMAÇÕES DO PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA.....	238
C.2 DIAGRAMA IDEF0 PARA O PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA	239
C.3 MODELAGEM DAS DURAÇÕES E DOS CUSTOS DO PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA.....	240
C.4 GRÁFICO BIDIMENSIONAL DO PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA	241
C.5 ANÁLISE DE <i>TRADE-OFF</i> DO PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA	243
C.6 ANÁLISE CRÍTICA DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA EM UM PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA	247
ANEXO D - IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA EM UM PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS.....	249
D.1 APRESENTAÇÃO ESTRUTURADA DAS INFORMAÇÕES DO PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS.....	250
D.2 DIAGRAMA IDEF0 DO PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS.....	251
D.3 GRÁFICO BIDIMENSIONAL DO PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS	252
D.4 MODELAGEM DAS VARIABILIDADES E ANÁLISE DE <i>TRADE-OFF</i> DO PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS.....	254
D.4.1 MODELAGEM DAS VARIABILIDADES E ANÁLISE DE <i>TRADE-OFF</i> DA ATIVIDADE DIRETA	254
D.4.2 MODELAGEM DAS VARIABILIDADES E ANÁLISE DE <i>TRADE-OFF</i> DA ATIVIDADE INDIRETA.....	257
D.5 COMENTÁRIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA EM UM PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS	261

1 INTRODUÇÃO

Esta tese versa sobre o desenvolvimento, a apresentação e a verificação de um novo método de estimativa para apoiar o planejamento do cronograma, do orçamento e do processo de quantificação dos riscos dos projetos.

O novo método, nomeado de técnica da estimativa conjugada, é aplicado entre duas atividades adjacentes, ou dois pacotes de trabalho adjacentes, ou duas fases adjacentes presentes no diagrama de precedências do projeto.

Esta tese concentrou-se em resolver o problema de obter uma formulação matemática de maneira que a previsão da duração do projeto esteja em função da duração estimada ou planejada e da variabilidade (incerteza aleatória) do custo, e de que a previsão do custo do projeto esteja em função do custo estimado ou planejado e da variabilidade (incerteza aleatória) da duração.

Sendo que, o produto entre a duração e o custo modelados ou executados representa o trabalho necessário para a execução das atividades, dos pacotes de trabalhos ou das fases, o que permite realizar uma análise de *trade-off* entre a duração e o custo do projeto.

O escopo da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada abrange o planejamento de projetos com diagramas de precedências na configuração da cadeia cinemática aberta (série), fechada (paralela) e/ou híbrida (aberta e fechada), bem como com mais de um tipo de duração e mais de um tipo de custo.

O desenvolvimento da técnica da estimativa conjugada foi baseado no conceito da cinemática dos manipuladores robóticos, cujo principal interesse é a descrição espacial (transladação e rotação) da atividade, do pacote de trabalho ou da fase fim do projeto em relação ao sistema de coordenadas bidimensional (tempo e custo) de referência, cuja origem apresenta a atividade, pacote de trabalho ou fase de início do projeto.

1.1. MOTIVAÇÃO

Os projetos são empreendimentos únicos (ALEXANDER, 1985; DEMEULEMEESTER; HERROELEN, 1996) e representam o principal meio de atingimento das estratégias organizacionais (GRUNDY, 1998; SHENHAR et al., 2001). Desta forma, os projetos compreendem um conjunto de atividades que precisam ser realizadas para proporcionar vantagens competitivas para as organizações (MORRIS; JAMIESON, 2004; RAESFELD et al., 2012) .

Segundo Crawford (2014) as estratégias fluem do nível corporativo por meio dos portfólios, programas e são implementadas por meio dos projetos hierarquicamente e sistematicamente de forma a promover uma efetiva coesão, visibilidade e comunicação entre todas as partes interessadas.

Estes conceitos descritos acima, também podem ser aplicados em organizações orientadas a projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) ou Ciência e Tecnologia (C&T) (SOLAK et al., 2010; VERMA et al., 2011), como é o caso do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e da Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST), que desenvolveram e construíram os satélites CBERES-3 e 4.

Para um efetivo gerenciamento dos projetos, as incertezas devem ser consideradas, pois, as várias fontes de incertezas apresentam efeitos fundamentais nos projeto (BRESINA, 2002; ARRUDA, 2009; MORAIS, 2011).

Assim, de forma resumida, as incertezas estão associadas ao processo de estimativas dos projetos, aos componentes dos grandes projetos e aos estágios do ciclo de vida dos projetos (ATKINSON et al., 2006; PECHT et al., 2013; BESIKCI et al., 2015).

Com a motivação de analisar as incertezas associadas ao processo de estimativas dos projetos, independente do tipo da indústria ou do setor (BOCTOR, 1993; GOLDRATT, 1997), esta tese se concentrou nas técnicas de

estimativas utilizadas para o planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos.

O planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos, normalmente (BIDOT, 2005; BERGH et al., 2013), são apoiados por meio das muitas técnicas, métodos, modelos e abordagens para determinar as estimativas das durações e dos custos (ENBERG, 2012; PENTEGHEM; VANHOUCHE, 2014).

Portanto, esta tese apresenta um novo método que pode ser utilizado para apoiar as estimativas das durações e dos custos das atividades, dos pacotes de trabalho ou das fases, bem como pode ser aplicado no processo de quantificação dos riscos dos projetos.

Para simplificar o entendimento do leitor, o texto sobre o desenvolvimento, a implementação e a verificação da técnica da estimativa conjugada abordará apenas as atividades dos projetos. Este novo método é nomeado por técnica da estimativa conjugada, e segue a lógica de que basicamente:

- a) os projetos consistem de um conjunto de atividades relacionadas conforme o diagrama de precedências;
- b) essas atividades possuem suas durações e custos e que devem ser executadas com o objetivo de completar os projetos;
- c) por causa da natureza inerente dos projetos, tais atividades estão sujeitas as incertezas aleatórias das durações e dos custos, tratadas nesta tese como riscos dos projetos, e
- d) as incertezas aleatórias das durações influenciam a execução dos custos, bem como as incertezas aleatórias dos custos influenciam a execução das durações dos projetos.

1.2. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um novo método para apoiar o planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos, em que:

- a) a duração executada ou modelada entre duas atividades do projeto está em função da duração planejada ou estimada e da variabilidade do custo;
- b) o custo executado ou modelado entre duas atividades do projeto está em função do custo planejado ou estimado e da variabilidade da duração, e
- c) o *trade-off* entre a duração e o custo entre duas atividades do projeto proporciona uma gestão mais eficiente da duração e do custo do projeto.

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o propósito de realizar ou cumprir o objetivo geral desta tese, são apresentados os objetivos específicos:

- a) desenvolver a técnica da estimativa conjugada para apoiar o planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos;
- b) implementar a técnica da estimativa conjugada em um exemplo de projeto com informações conhecidas das durações e dos custos;
- c) verificar a técnica da estimativa conjugada em um exemplo de projeto com informações conhecidas das durações e dos custos;

- d) realizar a quantificação dos riscos com a técnica da estimativa conjugada e com a técnica PERT em um exemplo de projeto com informações conhecidas das durações e dos custos, e
- e) implementar a técnica da estimativa conjugada em exemplos com outras configurações e com mais de um tipo de duração e de custo.

1.3. METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DA TESE

A metodologia de implementação desta tese é classificada como bibliográfica, exploratória e quantitativa, e foi utilizada para desenvolver um novo método para apoiar o planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos.

Conforme apontado por Palillo e Aguilar (2012), a pesquisa bibliográfica desta tese foi elaborada com o propósito de mapear a fronteira do conhecimento sobre as técnicas de estimativas e quantificação dos riscos dos projetos.

E Gil (2006) afirma que a pesquisa exploratória ocorre, frequentemente, por meio de pesquisa bibliográfica, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o fenômeno investigado e análise de exemplos que estimulem a compreensão.

Assim, a pesquisa exploratória foi utilizada para coletar as informações das durações e dos custos da etapa de montagem, integração e testes (AIT – *Assembly, Integration and Testing*) dos satélites CBERS-3 e 4 (*China Brazil Earth Resources Satellite*) no centro espacial chinês (BACCC - *Beijing Aerospace Command and Control Center*) durante a campanha de lançamento.

Tais informações foram obtidas por meio de entrevistas informais com a equipe do Laboratório de Integração e Teste (LIT) do INPE (Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais) que participaram das campanhas de lançamentos dos satélites CBERS-3 e 4.

Essas entrevistas informais foram baseadas nos dados operacionais das atividades executadas pelos membros das equipes do LIT do INPE durante a campanha de AIT dos satélites CBERS-3 e 4. Tais dados fazem parte dos registros dos relatórios de trabalho desses membros e estão disponíveis no acervo do laboratório.

E com base nas informações obtidas das pesquisas bibliográfica e exploratória, foi desenvolvido uma formulação matemática, nomeada de técnica da estimativa conjugada, para quantificar a duração do projeto em função da duração planejada e da incerteza aleatória (variabilidade) do custo, bem como para quantificar o custo do projeto em função do custo planejado e da incerteza aleatória (variabilidade) da duração.

A metodologia de implementação desta tese, está dividida conforme as fases descritas abaixo:

- a) revisão bibliográfica: a partir das necessidades identificadas, constituiu-se uma revisão bibliográfica para a determinação do referencial teórico sobre as técnicas de estimativas de recursos, duração, custo, de quantificação dos riscos, da análise de *trade-off*, bem como sobre a modelagem matemática das cadeias cinemáticas dos manipuladores robóticos;
- b) desenvolvimento: a técnica da estimativa conjugada foi desenvolvida por meio da fertilização cruzada (DAY et al., 2003) segundo entre as oportunidades identificadas nas revisões bibliográficas das técnicas de estimativas e de quantificação dos riscos dos projetos, bem como da modelagem matemática das cadeias cinemáticas dos manipuladores robóticos;

c) implementação e verificação: realizada pelas subfases:

- a partir das entrevistas informais com os membros das equipes do LIT do INPE que participaram das campanhas da etapa de AIT do CBERS-3 e 4 no BACCC, foram levantadas, ajustadas e acordadas as informações sobre o planejamento e a execução das etapas de AIT dos CBERS-3 e 4 no centro espacial chinês;

- aplicação da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada no CBERS-3, de forma a modelar suas variabilidades das durações e dos custos;

- aplicação da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada no CBERS-4 em conjunto com as variabilidades modeladas das durações e dos custos do CBERS-3, de forma a modelar as durações e os custos do CBERS-4;

- verificação da técnica da estimativa conjugada, em que, os valores modelados das durações e dos custos do CBERS-4 foram comparados com os valores executados das durações e dos custos do CBERS-4, e

- quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS- 4 com a técnica da estimativa conjugada e com o PERT (*Project Evaluation Review Technique*), cujos resultados entre as técnicas foram comparados.

d) outras implementações: aplicação da técnica da estimativa conjugada para um exemplo de projeto com diagrama de precedências na configuração da cadeia cinemática fechada, e aplicação da técnica da estimativa conjugada para um exemplo de projeto com diagrama de precedências na configuração da cadeia cinemática aberta, porém, com dois tipos de durações e de custos.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada em seis capítulos e seus anexos, conforme a descrição a seguir:

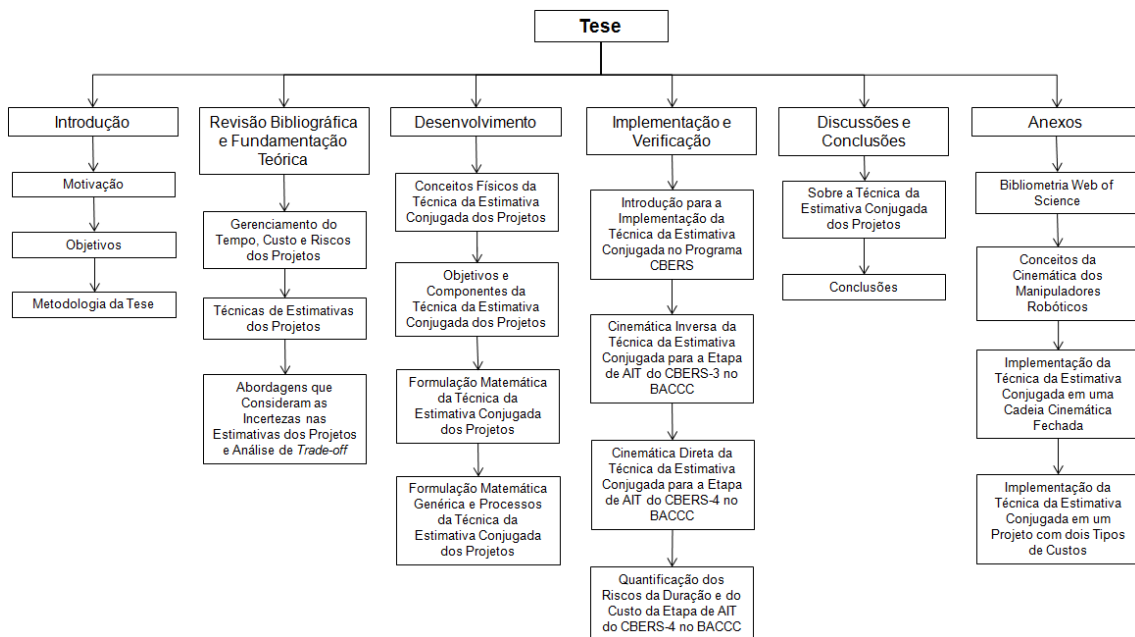
- a) Capítulo 1 – Introdução: é apresentada a contextualização, a motivação, o objetivo geral, os objetivos específicos, a metodologia de implementação e a estrutura desta tese;
- b) Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: sobre os conceitos do gerenciamento do tempo, custo e riscos dos projetos; sobre as técnicas de estimativas dos recursos, custos, durações, riscos e seus respectivos processos dos projetos; e sobre as abordagens que consideram as incertezas nas estimativas dos projetos e a análise de *Trade-off*;
- c) Capítulo 3 – Introdução da Técnica da Estimativa Conjugada dos Projetos: com a adaptação do conceito de Trabalho da Mecânica Clássica para a técnica da estimativa conjugada dos projetos; apresentação do conjunto de objetivos e componentes que orientaram o desenvolvimento da técnica da estimativa conjugada; as formulações matemáticas para a duração, o custo e para o Trabalho necessário para a execução das atividades; e a formulação matemática genérica e processos da técnica da estimativa conjugada;
- d) Capítulo 4 – Implementação e Verificação da Técnica da Estimativa Conjugada no Programa CBERS: modelagem das variabilidades das durações e dos custos da etapa de AIT do CBERS-3 no BACCC; modelagem das durações e dos custos da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC; e quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC;

- e) Capítulo 5 – Discussões sobre a Implementação da Técnica da Estimativa Conjugada dos Projetos: sintetiza a utilidade da aplicação das técnicas de estimativas e quantificação dos riscos nos projetos em vários tipos de indústrias, promove a discussão sobre a implementação da técnica da estimativa conjugada no planejamento dos projetos, compara a técnica da estimativa conjugada com as demais técnicas, modelos, métodos e abordagens;
- f) Capítulo 6 – Conclusões: apresentação das principais conclusões e sugestões de trabalhos futuros e continuação desta tese;
- g) Anexo A – Bibliometria com o banco de dados da Web of Science: tem como objetivo posicionar os principais assuntos abordados nesta tese em relação à produção acadêmica;
- h) Anexo B – Conceitos da Cinemática dos Manipuladores Robóticos: é apresentada a introdução sobre os manipuladores robóticos, as características dos tipos de juntas, a descrição dos tipos de cadeias cinemáticas e os fundamentos matemáticos para a descrição espacial da cinemática dos manipuladores robóticos;
- i) Anexo C – Implementação da Técnica da Estimativa Conjugada em uma Cadeia Cinemática Fechada: apresenta as durações e os custos para o projeto, determina o diagrama IDEF0 para o projeto, modela as durações e custos das atividades, determina o gráfico bidimensional (tempo e custo) para as durações e custos planejados e modelados, realiza a análise de *trade-off* entre os valores das durações e dos custos planejados e modelados e analisa criticamente os resultados das análises do gráfico bidimensional e *trade-off* do projeto com cadeia cinemática fechada, e
- j) Anexo D – Implementação da Técnica da Estimativa Conjugada em um Projeto com Dois Tipos de Custos: apresenta as durações e os

custos (direto e indireto) planejados e executados, determina o diagrama IDEF0 para o projeto, determina o gráfico bidimensional (tempo e custo), modela as variabilidades das durações e dos custos do projeto, bem como determina as curvas de análise de *trade-off* entre as durações e os custos, e analisa criticamente as curvas de *trade-offs* entre as durações e custos das atividades do projeto.

A Figura 1.1 apresenta a organização dos capítulos e dos anexos.

Figura 1.1. Estrutura da tese organizada em capítulos e seus anexos.



Fonte: Produção do autor (2015).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o levantamento dos assuntos abordados nesta tese. O capítulo está dividido em seções conforme descrição a seguir:

- a) em gerenciamento do tempo, custo e riscos dos projetos é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de gerenciamento dos recursos, custos, tempo e riscos dos projetos;
- b) nas técnicas de estimativas dos projetos são apresentadas as principais técnicas de estimativas dos recursos, custos, durações, riscos e seus respectivos processos, e
- c) nas abordagens que consideram as incertezas nas estimativas dos projetos e análise de *trade-off* são apresentadas as principais abordagens que consideram as incertezas aleatórias nas estimativas, as principais técnicas de programação estocásticas, bem como a representação das incertezas por meio da análise de *trade-off* dos projetos.

2.1. GERENCIAMENTO DO TEMPO, CUSTO E RISCOS DOS PROJETOS

Os guias genéricos das práticas recomendadas para o gerenciamento dos projetos podem ser utilizados em qualquer tipo de organização (privada ou pública), e em qualquer tipo de projeto, independente de sua complexidade, tamanho ou duração (ATKINSON et al., 2006). Entretanto, esta tese se concentrou em apresentar as abordagens amplamente aplicadas gerenciamento do tempo, custo e riscos dos projetos de sistemas espaciais.

Desta forma, a partir da necessidade identificada de desenvolver, apresentar e verificar um novo método de estimativa de projetos, esta seção apresenta uma

revisão da literatura, conforme preconizado pelos padrões do PMI (*Project Management Institute*), da ISO (*International Organization for Standardization*) e da ESA (*European Space Agency*), para os assuntos a seguir:

- a) os conceitos sobre o gerenciamento de projetos, as principais definições sobre os projetos, suas áreas ou grupos de conhecimentos, bem como suas fases;
- b) uma breve definição e um resumo dos processos do gerenciamento do recurso do projeto;
- c) uma breve definição e um resumo dos processos do gerenciamento do tempo do projeto;
- d) uma breve definição e um resumo dos processos do gerenciamento do custo do projeto, e
- e) uma breve definição e um resumo dos processos do gerenciamento dos riscos do projeto.

2.1.1. DEFINIÇÕES DE PROJETO E GERENCIAMENTO DO PROJETO

A crescente aceitação do gerenciamento dos projetos indica que a aplicação de conhecimentos, processos, habilidades, ferramentas e técnicas adequadas proporcionam um impacto significativo no sucesso do projeto (ELMAGHRABY, 2005; CHEN; ASKIN, 2009). Sendo que, o gerenciamento dos projetos é usado para descrever uma abordagem organizacional ou gerencial para contribuir com o atingimento dos objetivos e estratégias organizacionais (WIESEMANN et al., 2010; PMBOK, 2014).

O PMI difunde que o projeto é um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo (WARD; CHAPMAN, 2003; PMBOK, 2014), portanto, sua natureza temporária significa que todos os projetos

possuem início e término bem definidos (VONDER et al., 2006; THOMAS et al., 2014).

Sendo que o término do projeto é alcançado quando seus objetivos foram atingidos (TKINDT; BILLAUT, 2002), quando for identificado que esses objetivos não poderão ser atingidos (BIERWIRTH; MEISEL, 2015), ou ainda quando não existir mais a necessidade desse projeto (GHAREHGOZLI et al., 2014).

A norma da ISO 21500 (2012) define que o projeto é um conjunto único de processos que consiste em atividades coordenadas e controladas para atingir os objetivos do projeto.

O alcance dos objetivos do projeto está sujeito a múltiplas restrições e requerem provisões de entregas, assim, cada projeto tem início e fim bem definidos, e, normalmente, é dividido em fases (ISO 21500, 2012).

Segundo o padrão da Agência Espacial Europeia (ESA – *European Space Agency*) um projeto espacial, tipicamente, compreende um segmento espacial e um segmento solo implementados simultaneamente, e ainda esses segmentos dependem e possuem interfaces com o segmento lançador.

Assim, estes três segmentos compõem um projeto ou sistema espacial, representando uma atividade abrangente que envolve todas as disciplinas do projeto e exige uma forte cooperação entre os domínios do projeto, sendo o gerenciamento, a engenharia, a qualidade do produto e a sustentabilidade (ECSS-M-ST-10C, 2008).

O PMI afirma que o gerenciamento dos projetos é a aplicação de conhecimento, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto a fim de atender seus requisitos (PMBOK, 2014).

O gerenciamento dos projetos é realizado por meio da aplicação e integração de um conjunto de processos logicamente divididos e interdependentes (REYCK; LEUS, 2008).

A ISO considera que o gerenciamento dos projetos é a aplicação de métodos, ferramentas, técnicas e competências para a realização de um projeto por meio de processos (ISO 21500, 2012).

Vale a ressalva de que, os processos utilizados devem estar alinhados de forma sistêmica (PASSOS, 2013), de forma que cada fase do ciclo de vida do projeto ofereça entregas específicas que devem ser analisadas criticamente durante a execução do projeto para atender os requisitos das partes interessadas (RANJBAR et al., 2009).

Segundo a ESA, o gerenciamento dos projetos abrange um conjunto coerente de processos para todos os aspectos da gestão e controle do projeto espacial, sendo que as normas ECSS (*European Cooperation for Space Standardization*) descreveu os elementos essenciais do planejamento e da implementação dos projetos espaciais.

Nessas normas da ECSS também são identificados os requisitos e produtos no mais alto nível, que juntos fornecem um planejamento de projeto coerente e integrado por meio das áreas de domínios das normas, sendo o gerenciamento, a engenharia, a garantia de projetos e produtos para aplicações espaciais, e a sustentabilidade espacial (ECSS-M-ST-10C, 2008).

2.1.2. FASES OU GRUPOS DE PROCESSOS DO PROJETO

Segundo o PMI, os processos das áreas de conhecimentos são interdependentes e divididos logicamente em cinco fases ou cinco grupos de processos (PMBOK, 2014), que são:

- a) processos de iniciação: é constituído pelos processos que facilitam a autorização formal para iniciar um novo projeto ou uma fase do projeto. Os processos de iniciação são frequentemente realizados fora do escopo de controle do projeto pela organização ou pelos processos de programa ou de portfólio;
- b) processos de planejamento: define e refina os objetivos, bem como planeja a ação necessária para alcançar tais objetivos e o escopo para os quais o projeto foi idealizado;
- c) processos de execução: integra pessoas e outros recursos para realizar o plano de gerenciamento do projeto;
- d) processos de monitoramento e controle: mensura e monitora regularmente o progresso para identificar variações em relação ao plano de gerenciamento do projeto, de forma que possam ser tomadas ações corretivas quando necessário para atender aos objetivos do projeto, e
- e) processos de encerramento: formaliza a aceitação do produto, serviço ou resultado e conduz o projeto ou uma fase do projeto para um final ordenado. Inclui os processos usados para finalizar formalmente todas as atividades de um projeto ou de uma fase do projeto, podendo entregar um produto terminado ou encerrar um projeto cancelado.

Conforme definido pela ISO 21500 (2012), os projetos são normalmente organizados em fases determinadas por necessidade de governança e controle. É sugerido que estas fases sigam uma sequência lógica e usem recursos para produzirem suas entregas por meio da realização de um conjunto de atividades.

As fases são conhecidas, de forma coletiva, como ciclo de vida do projeto (ISO 21500, 2012), e são descritas abaixo:

- a) processos de iniciação: iniciam uma fase do projeto ou um projeto, definem os objetivos do projeto, bem como autoriza o gerente a prosseguir com o projeto;
- b) processos de planejamento: são usados para desenvolver o planejamento detalhado do projeto, bem como estabelecem as linhas de base contra as quais a implementação do projeto pode ser gerenciada e o seu desempenho medido e controlado;
- c) processos de implementação: são usados para desenvolver as atividades de gerenciamento do projeto e para apoiar as entregas, conforme os planos do projeto;
- d) processos de controle: são usados para mensurar, monitorar e controlar o desempenho do projeto em comparação com as linhas de base (tempo e custo), de forma que as ações corretivas e preventivas possam ser tomadas e as solicitações de mudanças sejam realizadas quando necessárias para permitir o atingimento dos objetivos do projeto, e
- e) processos de encerramento: são empregados para encerrar formalmente uma fase do projeto ou o projeto e também fornecem um conjunto de lições aprendidas.

A norma ECSS-M-ST-10C (2008) define que o ciclo de vida dos projetos de sistemas espaciais é descrito em sete fases, contemplando desde a transformação das necessidades do usuário em requisitos até a fase de descarte final do sistema espacial, conforme as fases descritas abaixo:

- a) fase 0 - Análise de Missão: a equipe responsável pelo início do projeto e o usuário final, identificam os principais requisitos de missão, o desempenho esperado, confiabilidade e vida útil do produto bem como suas restrições. Então, efetua-se a primeira análise entre o custo esperado e o orçamento a ser alocado para o projeto. Esta fase é concluída com a Revisão de Definição de Missão (MDR), que verifica a adequação das especificações técnicas preliminares e a avaliação de aspectos relativos à organização do projeto;

- b) fase A - Análise de Viabilidade: aprofundamento da identificação das restrições relativas à execução do projeto, tais como, custos, cronogramas, organização, operação, manutenção, produção e descarte. As incertezas e os riscos associados a cada alternativa são estimados. Esta fase é concluída com a Revisão Preliminar de Requisitos (PRR), que tem por objetivo a aceitação dos planos de gerenciamento e a confirmação da viabilidade técnica dos conceitos dos sistemas;

- c) fase B - Definição do Projeto Preliminar: consolida uma proposta de conceito para as configurações de sistema e operações, sendo que, o projeto preliminar associado é desenvolvido, enfatizando as soluções técnicas escolhidas, e, portanto, inicia-se a fabricação do Modelo de Engenharia dos equipamentos e subsistemas selecionados. Nessa fase são estabelecidas a árvore do produto, a estrutura analítica do projeto e a árvore de especificações. Nessa fase ocorre a Revisão de Requisitos de Sistema (SRR), e a fase se encerra com a Revisão de Projeto Preliminar (PDR), a qual tem como objetivo principal avaliar o projeto preliminar do conceito dos sistemas;

- d) fase C - Definição Detalhada do Projeto: nesta fase é finalizado o detalhamento do conceito dos sistemas e operações, incluindo o detalhamento dos planos de fabricação, bem como de integração e testes dos sistemas e seus componentes. Neste detalhamento são incluídos o desenvolvimento, a produção, os testes e a pré-qualificação dos componentes críticos e o detalhamento das interfaces entre os elementos. Esta fase se encerra com a Revisão de Projeto Detalhado (CDR), que tem como objetivos, avaliar as soluções de projeto por meio dos testes realizados no Modelo de Engenharia, como também o estado de qualificação dos processos críticos para a fabricação do Modelo de Qualificação;
- e) fase D - Produção e Qualificação: são realizadas as atividades para a Qualificação, incluindo os testes e as atividades de verificação. O Modelo de Qualificação dos equipamentos e subsistemas selecionados é submetido aos testes ambientais e funcionais, de modo a demonstrar a viabilidade das soluções adotadas de fabricação e de projeto. Assim, passa-se ao Modelo de Voo, que é submetido aos testes funcionais e ambientais de aceitação. Nessa fase é testada a compatibilidade operacional entre o segmento solo e o espacial, e se encerra com a Revisão de Aceitação (AR) que tem como objetivo principal demonstrar que o Modelo de Voo encontra-se livre de problemas advindos de erros de mão de obra e de outras operações, e pronto para o uso especificado;
- f) fase E - Operação: executadas as atividades de preparação para o lançamento, então, é realizado o lançamento propriamente dito com as atividades para injeção em órbita e procedimentos iniciais para a operação do sistema. Nessa fase são feitas todas as verificações pertinentes às atividades de comissionamento, operações em órbita, suporte à missão e às atividades de operação do segmento solo, e

- g) fase F - Descarte: são executados os planos relacionados ao descarte do segmento espacial.

2.1.3. ÁREAS DE CONHECIMENTO DE GERENCIAMENTO DOS PROJETOS

O gerenciamento dos projetos, segundo o PMI, é realizado por meio de processos usando conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas que recebem entradas e geram saídas a fim de atender seus requisitos. Assim, o gerenciamento dos projetos deve ser realizado por um conjunto de processos presentes nas áreas de conhecimento e agrupado de forma lógica em fases ou grupos. A seguir são apresentadas as áreas de conhecimentos do PMBOK (2014):

- a) gerenciamento da integração;
- b) gerenciamento do escopo;
- c) gerenciamento do tempo;
- d) gerenciamento do custo;
- e) gerenciamento da qualidade;
- f) gerenciamento dos recursos humanos;
- g) gerenciamento da comunicação;
- h) gerenciamento dos riscos;
- i) gerenciamento das aquisições, e
- j) gerenciamento das partes interessadas.

A Figura 2.1 ilustra o mapa que relaciona as fases ou grupos de processos com as áreas de conhecimentos do gerenciamento do projeto do PMBOK (2014).

Figura 2.1. Fases do gerenciamento do projeto e as áreas de conhecimentos do PMI.

Áreas de Conhecimentos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Execução	Monitoramento e Controle	Encerramento
Integração					
Escopo					
Tempo					
Custos					
Qualidade		Conjunto de Processos			
Recursos Humanos					
Comunicação					
Riscos					
Aquisições					
Partes Interessadas					

Fonte: Adaptado do PMBOK (2014).

De acordo com a ISO 21500 (2012), cada grupo por assunto ou área de conhecimento consiste de um conjunto de processos aplicáveis às fases do projeto. Os grupos são interdependentes e podem ser aplicados em projetos de diferentes tipos de indústrias. A seguir, relacionam-se os grupos de assuntos:

- a) integração;
- b) partes interessadas;
- c) escopo;
- d) recurso;
- e) tempo;

- f) custo;
- g) risco;
- h) qualidade;
- i) aquisições, e
- j) comunicação.

A Figura 2.2 ilustra o mapa que relaciona as fases ou grupos de processos com os grupos de assuntos do gerenciamento do projeto para a norma da ISO 21500 (2012).

Figura 2.2. Fases do gerenciamento do projeto e os grupos de assuntos da ISO.

Grupos de Assuntos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Implementação	Controle	Encerramento
Integração					
Partes Interessadas					
Escopo					
Recursos					
Tempo					
Custos					
Riscos					
Qualidade					
Aquisições					
Comunicação					

Fonte: Adaptado da ISO 21500 (2012).

A ECSS-M-ST-10C (2008) abrange os domínios de gerenciamento, engenharia, garantia e sustentabilidade dos produtos, projetos e aplicações espaciais. Porém, como esta tese versa sobre as áreas de conhecimentos (tempo, custo e riscos) presentes no domínio do gerenciamento, a seguir são apresentadas as disciplinas pertencentes ao domínio de planejamento e gerenciamento de projetos espaciais da ESA.

- a) planejamento e implementação de projetos;
- b) gerenciamento da configuração e informação;
- c) gerenciamento do custo e do cronograma;
- d) apoio à logística integrada, e
- e) gerenciamento dos riscos.

A Figura 2.3 ilustra o mapa que relaciona as fases ou grupos de processos com as disciplinas do gerenciamento do projeto para a norma ECSS-M-ST-10C (2008).

Figura 2.3. Fases do gerenciamento do projeto e as disciplinas da ESA.

Disciplinas	Fases ou Grupos de Processos						
	O	A	B	C	D	E	F
Planejamento e implementação							
Configuração e informação							
Custo e cronograma							
Apoio à logística integrada							
Riscos							

Fonte: Adaptado do ECSS-M-ST-10C (2008).

2.1.4. GERENCIAMENTO DO RECURSO DO PROJETO

Basicamente, os recursos do projeto podem ser agrupados em três tipos de categorias (HERROELEN; LEUS, 2005; PAN; RUIZ, 2012), conforme descrito a seguir:

- a) renováveis: existe uma determinada quantidade do recurso disponível para cada atividade. Se o recurso não for utilizado

totalmente em cada atividade, a sobra não pode ser reaproveitada na atividade seguinte, por exemplo, horas de trabalho dos colaboradores, das instalações, entre outros;

- b) não renováveis: uma determinada quantidade do recurso está disponível para todo o projeto. O uso do recurso pode ser feito de forma gradativa, a possibilidade de adicionar recursos ao longo do projeto deve ser amplamente discutida, por exemplo, matéria-prima, recursos financeiros, entre outros, e
- c) duplamente restrito: os recursos são considerados renováveis e não renováveis.

Segundo a norma ISO 21500 (2012), o gerenciamento do grupo de assunto do recurso inclui os processos requeridos para identificar e adquirir recursos adequados ao projeto, como pessoas, instalações, equipamentos, materiais, infraestrutura, ferramentas, entre outros. A seguir, apresentam-se os processos desta norma:

- a) estabelecer a equipe: obter os recursos humanos necessários para conclusão do projeto;
- b) estimar os recursos: determinar os recursos necessários para cada atividade identificada do projeto;
- c) definir a organização do projeto: identificar a estrutura organizacional adequada a fim de garantir todos os comprometerimentos necessários de todas as partes interessadas envolvidas no projeto;
- d) desenvolver a equipe: melhorar o desempenho e a interação dos membros da equipe do projeto de maneira contínua;

- e) controlar os recursos: assegurar que os recursos requeridos para empreender o trabalho do projeto estejam disponíveis e associados de maneira adequada para atender os objetivos do projeto, e
- f) gerenciar a equipe: otimizar o desempenho da equipe, fornecer *feedbacks*, resolução de problemas, estimular a comunicação e coordenar as mudanças.

A Figura 2.4 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento do recurso do projeto para a norma ISO 21500 (2012).

Figura 2.4. Processos de gerenciamento do recurso do projeto da ISO.

Grupos de Assuntos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Implementação	Controle	Encerramento
Integração					
Partes Interessadas					
Escopo					
Recursos	Estabelecer a equipe.	Estimar os recursos; Definir a organização do projeto.	Desenvolver a equipe.	Controlar o s recursos; Gerenciar a equipe.	
Tempo					
Custos					
Riscos					
Qualidade					
Aquisições					
Comunicação					

Fonte: Adaptado da ISO 21500 (2012).

Para os demais padrões de gerenciamento dos projetos apresentados nesta tese, sendo do PMBOK (2014) e ECSS-M-ST-10C (2008), os processos de gerenciamento do recurso do projeto estão compartilhados nas áreas de conhecimentos ou disciplinas do gerenciamento do tempo, dos custos e dos recursos humanos do projeto.

2.1.5. GERENCIAMENTO DO TEMPO DO PROJETO

Os processos de gerenciamento do tempo do projeto, suas ferramentas e técnicas são descritas no plano de gerenciamento do cronograma que representa um plano auxiliar do plano de gerenciamento do projeto (ECSS-M-ST-10C, 2008).

O plano de gerenciamento do cronograma identifica um método e uma ferramenta de cronograma, bem como estabelece o formato e critérios para o desenvolvimento e controle do cronograma do projeto (PMBOK, 2014).

O desenvolvimento do cronograma do projeto usa as saídas dos processos para definir e sequenciar as atividades e também para estimar os recursos, os custos e as durações das atividades (PMBOK, 2014). Assim, este cronograma finalizado e aprovado servirá de linha de base no processo de controlar o cronograma (ISO 21500, 2012).

Segundo o PMBOK (2014), o gerenciamento do tempo do projeto inclui os processos necessários para que o projeto termine dentro do prazo. Em alguns projetos de menor escopo, o sequenciamento, a estimativa de recursos, a estimativa de duração e o desenvolvimento do cronograma das atividades são considerados um único processo.

Os processos do gerenciamento do tempo do projeto são apresentados como processos separados, porém, na prática esses processos são interdependentes e interagem com os processos das outras áreas de conhecimentos (PMBOK, 2014). A seguir, apresentam-se esses processos:

- a) planejar o gerenciamento do cronograma: estabelece as políticas, procedimentos e documentação para o planejamento, execução, monitoramento e controle do cronograma do projeto;

- b) definir as atividades: identificar e documentar as ações específicas ou pacotes de trabalho a serem realizados, a fim de produzir as entregas do projeto;
- c) sequenciar as atividades: identificar e documentar os relacionamentos entre as atividades, pacotes de trabalho ou fases do projeto;
- d) estimar os recursos das atividades: estimativa dos tipos e da quantidade de material, pessoas, equipamentos ou suprimentos necessários para realizar cada atividade, pacote de trabalho ou fase do projeto;
- e) estimar as durações das atividades: estimativa do número de períodos de trabalho necessários para terminar as atividades específicas, pacotes de trabalho ou fases com os recursos estimados;
- f) desenvolver o cronograma: análise das sequências das atividades, suas durações, recursos necessários e restrições do projeto a fim de criar o modelo do cronograma, e
- g) controlar o cronograma: monitoramento do andamento das atividades, pacotes de trabalho ou fases do projeto, atualização do seu progresso e gerenciamento das alterações na linha de base do cronograma planejado.

A Figura 2.5 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento do tempo do projeto para o PMBOK (2014).

Figura 2.5. Processos de gerenciamento do tempo do projeto do PMI.

Áreas de Conhecimentos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Execução	Monitoramento e Controle	Encerramento
Integração					
Escopo					
Tempo		Planejar o gerenciamento do cronograma; Definir as atividades; Sequenciar as atividades; Estimar os recursos das atividades; Estimar as durações das atividades; Desenvolver o cronograma.		Controlar o cronograma.	
Custos					
Qualidade					
Recursos Humanos					
Comunicação					
Riscos					
Aquisições					
Partes Interessadas					

Fonte: Adaptado do PMBOK (2014).

De acordo com a norma ISO 21500 (2012) o gerenciamento do tempo do projeto inclui os processos requeridos para programar as atividades do projeto e monitorar o progresso para controlar o cronograma. A seguir, apresentam-se esses processos.

- a) sequenciar as atividades: identificar e documentar os relacionamentos lógicos entre as atividades;
- b) estimar as durações das atividades: estimar o tempo requerido para completar cada atividade do projeto;
- c) desenvolver o cronograma: determinar o tempo de início e fim de cada atividade do projeto e estabelecer uma linha de base geral da programação do projeto, e
- d) controlar o cronograma: tem o propósito de monitorar suas variações e executar as devidas ações.

A Figura 2.6 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento do tempo do projeto para a norma ISO 21500 (2012).

Figura 2.6. Processos de gerenciamento do tempo do projeto da ISO.

Grupos de Assuntos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Implementação	Controle	Encerramento
Integração					
Partes Interessadas					
Escopo					
Recursos					
Tempo		Sequenciar as atividades; Estimar as durações das atividades; Desenvolver o cronograma.		Controlar o cronograma.	
Custos					
Riscos					
Qualidade					
Aquisições					
Comunicação					

Fonte: Adaptado da ISO 21500 (2012).

De acordo com a ECSS-M-ST-10C (2008) o gerenciamento do tempo do projeto inclui os processos necessários para o desenvolvimento do diagrama de precedências das atividades, seus marcos e relacionamentos, conforme descrito abaixo:

- a) definição do cronograma: as atividades do projeto são identificadas e arranjadas em sequência lógica de execução. São estimadas as durações bem como os recursos necessários para cada atividade;
- b) controle do cronograma: estabelecimento da linha de base do cronograma, os marcos e as reuniões de revisão das fases. São definidas as ferramentas de acompanhamento do progresso do projeto bem como de avaliação do desempenho das atividades, e
- c) relatórios do cronograma: com o propósito de satisfazer os requisitos de informações sobre o controle do cronograma e as medidas de

desempenho do projeto, e para apoiar o atingimento dos objetivos do projeto e as tomadas de decisões realizadas pelas partes interessadas.

A Figura 2.7 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento do tempo do projeto para a norma da ECSS-M-ST-10C (2008).

Figura 2.7. Processos de gerenciamento do tempo do projeto da ESA.

Disciplinas	Fases ou Grupos de Processos						
	O	A	B	C	D	E	F
Planejamento e implementação							
Configuração e informação							
Custo e cronograma	Definição do cronograma.						
			Controle do cronograma.				
			Relatórios do cronograma.				
Apoio à logística integrada							
Riscos							

Fonte: Adaptado da ECSS-M-ST-10C (2008).

2.1.6. GERENCIAMENTO DO CUSTO DO PROJETO

O gerenciamento do custo do projeto preocupa-se principalmente com os custos dos recursos necessários para realizar as atividades do projeto (PMBOK, 2014).

Provavelmente, os *stakeholders* medirão o custo do projeto de maneiras diferentes, por exemplo, o custo pode ser computado quando a decisão de aquisição é tomada, na realização do pedido, entrega do pedido, ou ainda quando o custo é incorrido (KLERIDES; HADJICONSTANTINOU, 2010).

O custo pode ser definido como o valor monetário ou preço de uma atividade, pacote de trabalho ou fase do projeto, que compreende a somatória de todos

os custos envolvidos na execução do projeto, conforme os tipos descritos abaixo (MARAVAS; PANTOUVAKIS, 2012):

- a) custo direto: está diretamente associado à execução do trabalho, ou seja, refere-se ao valor monetário que será desembolsado com a utilização dos recursos específicos desta atividade;
- b) custo indireto: é o custo incorrido pela empresa em benefício do seu funcionamento, não está associado diretamente à execução do trabalho de uma atividade;
- c) custos variáveis: dependem da forma como o projeto decorre (recursos humanos, suprimentos e outros materiais), e
- d) custos fixos: mantêm-se constantes independentemente da sua utilização pelo projeto.

A execução de uma atividade, pacote de trabalho ou fase do projeto demanda a utilização de recursos que serão aplicados diretamente ou indiretamente na sua execução, porém, ainda existem outros custos relativos ao funcionamento da empresa, como os tributos, impostos, entre outros (MOKHTARI et al., 2010).

Portanto, em todos os projetos, independente do tipo e tamanho, existe a necessidade da utilização de recursos para a execução das atividades, pacotes de trabalho ou fases, e esses recursos possuem seus custos (XU et al., 2012).

Segundo o PMBOK (2014), o gerenciamento do custo do projeto inclui os processos envolvidos no planejamento, estimativa, orçamento, gerenciamento e controle dos custos, de modo que o projeto possa ser finalizado dentro do orçamento aprovado.

Os processos do gerenciamento do custo do projeto são apresentados como processos separados, porém, na prática esses processos são

interdependentes e interagem com os processos das outras áreas de conhecimento (PMBOK, 2014). A seguir, apresentam-se esses processos:

- a) planejar o gerenciamento dos custos: estabelece as políticas, procedimentos e documentação para o planejamento, execução, monitoramento e controle dos custos do projeto;
- b) estimar os custos: estimativa dos recursos monetários necessários para executar as atividades do projeto;
- c) determinar o orçamento: agregação dos custos estimados de atividades individuais ou pacotes de trabalho, a fim de estabelecer uma linha de base dos custos, e
- d) controlar os custos: monitorar o andamento do projeto para atualização do orçamento e gerenciamento das alterações feitas na linha de base dos custos.

A Figura 2.8 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento do custo do projeto para o PMBOK (2014).

Figura 2.8. Processos de gerenciamento do custo do projeto do PMI.

Áreas de Conhecimentos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Execução	Monitoramento e Controle	Encerramento
Integração					
Escopo					
Tempo					
Custos		Planejar o gerenciamento dos custos; Estimar os custos; Determinar o orçamento.		Controlar os custos.	
Qualidade					
Recursos Humanos					
Comunicação					
Riscos					
Aquisições					
Partes Interessadas					

Fonte: Adaptado do PMBOK (2014).

De acordo com a ISO 21500 (2012), o grupo por assunto do custo inclui os processos requeridos para estimar os custos, desenvolver o orçamento e monitorar o progresso para controlar os custos do projeto. A seguir, apresentam-se esses processos:

- a) estimar os custos: obter uma aproximação dos custos necessários para completar cada atividade do projeto;
- b) desenvolver o orçamento: distribuir o orçamento do projeto aos níveis adequados da EAP, e
- c) controlar os custos: monitorar as variações dos custos e tomar as ações adequadas.

A Figura 2.9 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento do custo do projeto para a norma ISO 21500 (2012).

Figura 2.9. Processos de gerenciamento do custo do projeto da ISO.

Grupos de Assuntos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Implementação	Controle	Encerramento
Integração					
Partes Interessadas					
Escopo					
Recursos					
Tempo					
Custos		Estimar os custos; Desenvolver o orçamento.		Controlar os custos.	
Riscos					
Qualidade					
Aquisições					
Comunicação					

Fonte: Adaptado da ISO 21500 (2012).

De acordo com a ECSS-M-ST-10C (2008), o gerenciamento do custo do projeto inclui os processos necessários para permitir uma análise efetiva do orçamento, dos recursos e dos riscos, bem como também o acompanhamento, controle e a divulgação do progresso e desempenho das atividades das fases do projeto espacial, tais processos são descritos abaixo:

- a) interfaces contratuais e financeiras: determinação das categorias dos custos (diretos, indiretos, entre outros) com o propósito de construir a estrutura do custo do projeto;
- b) estimativa e planejamento dos custos: atividades relacionadas na determinação do custo esperado para o projeto;
- c) desenvolvimento do plano dos custos: determinação da linha de base dos custos do projeto, bem como os planos de alocação dos recursos durante a execução das atividades, dos pacotes de trabalho ou das fases do projeto;
- d) controle dos custos: monitoramento, controle e atualizações autorizadas do progresso das atividades, dos pacotes de trabalho ou das fases em relação a linha de base dos custos do projeto espacial, e
- e) relatórios dos custos: divulgação sobre o desempenho financeiro das atividades, dos pacotes de trabalho ou das fases do projeto, conforme requisitos de informações das partes interessadas.

A Figura 2.10 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento do custo do projeto para o padrão da norma ECSS-M-ST-10C (2008).

Figura 2.10. Processos de gerenciamento do custo do projeto da ESA.

Disciplinas	Fases ou Grupos de Processos						
	O	A	B	C	D	E	F
Planejamento e implementação							
Configuração e informação							
Custo e cronograma	Interfaces contratuais e financeiras.						
	Estimativa e planejamento dos custos.						
	Desenvolvimento do plano dos custos.						
			Controle dos custos.				
			Relatórios dos custos.				
Apoio à logística integrada							
Riscos							

Fonte: Adaptado da ECSS-M-ST-10C (2008).

2.1.7. GERENCIAMENTO DOS RISCOS DO PROJETO

O risco do projeto é um evento ou condição incerta, que se ocorrer, provocará um efeito positivo ou negativo em um ou mais objetivos do projeto, por exemplo, no tempo, no custo, na qualidade, no escopo, entre outros (PMBOK, 2014). O risco do projeto tem origem na incerteza existente em todos os projetos (ECSS-M-ST-10C, 2008).

Os riscos conhecidos são aqueles que foram identificados e analisados, possibilitando o planejamento de respostas, sendo que, sugere-se que seja designada uma reserva de contingência para os riscos conhecidos que não podem ser gerenciados de forma proativa. Os riscos desconhecidos não podem ser gerenciados de forma proativa, assim sendo, podem receber uma reserva para gerenciamento (PMBOK, 2014).

Enquanto que, para a definição dos tipos de incertezas dos projetos, esta tese buscou por uma definição mais apropriada ao gerenciamento de projetos de P&D, e assim, escolheu a definição apresentada por Hillson (2004), em que as incertezas podem ser categorizadas por:

- a) epistêmica: está relacionada à falta de conhecimento sobre os possíveis resultados de um evento, incluindo sua natureza e probabilidades associadas. Assim, uma incerteza é um evento desconhecido a partir de um conjunto desconhecido de possíveis resultados. Portanto, uma incerteza epistêmica é um risco não mensurável, e
- b) aleatória: é um evento onde o conjunto de possíveis resultados é conhecido, e a probabilidade de obter cada um dos resultados pode ser medida ou estimada. Assim, a incerteza aleatória refere-se a um evento desconhecido extraído a partir de um conjunto conhecido de possíveis resultados. Portanto, uma incerteza aleatória é um risco mensurável.

Na prática, o conjunto conhecido de possíveis resultados representa uma aproximação do evento desconhecido, o que possibilita o tratamento do evento desconhecido por meio das ferramentas probabilísticas (KERZNER, 2009).

Desta forma, as incertezas do tipo aleatórias na verdade são incertezas pseudoaleatórias, cujos conjuntos dos possíveis resultados são aproximações dos eventos desconhecidos, pois utilizam algum tipo de gerador de números aleatórios, em que, tais geradores são baseados em mecanismos determinísticos e iterativos (DEVROYE, 1986).

Entretanto, esta tese considera que tais incertezas pseudoaleatórias apresentam propriedades básicas necessárias de um número verdadeiramente

aleatório, tais como, a uniformidade no intervalo unitário e a independência entre sequências dos valores gerados, e, portanto, são consideradas como incertezas aleatórias.

Assim, o risco pode ser considerado como a probabilidade de ocorrência de uma incerteza aleatória que afeta os objetivos do projeto, geralmente, o cronograma e o orçamento do projeto.

A organização deve estar comprometida com uma abordagem proativa e consistente de gerenciamento dos riscos durante todo o projeto, ou seja, avançar um projeto sem considerar o gerenciamento dos riscos de forma proativa pode causar sérios problemas em virtude de ameaças não gerenciadas.

As respostas aos riscos refletem o equilíbrio entendido pela organização entre correr e evitar riscos (PMBOK, 2014). O projeto pode ser aceito se os riscos estiverem dentro das tolerâncias e em equilíbrio com as recompensas que podem ser obtidas ao assumir os riscos (KERZNER, 2009).

Segundo o PMBOK (2014), o gerenciamento dos riscos do projeto inclui os processos de planejamento, identificação, análise, planejamento das respostas e controle dos riscos de um projeto, a fim de aumentar a probabilidade e o impacto dos eventos positivos e diminuir a probabilidade e o impacto dos eventos negativos em um ou mais objetivos do projeto, por exemplo, tempo, custo, qualidade, escopo, entre outros.

Os processos do gerenciamento dos riscos do projeto são apresentados como processos separados, porém, na prática estes processos são interdependentes e interagem com os processos das outras áreas de conhecimentos (PMBOK, 2014), a seguir são apresentados esses processos:

- a) planejar o gerenciamento dos riscos: definição de como conduzir as atividades de gerenciamento dos riscos de forma alinhada com o plano de gerenciamento do projeto;
- b) identificar os riscos: determinação dos riscos que podem afetar os objetivos do projeto (tempo, custo, escopo, entre outros) e da documentação de suas características;
- c) realizar análise qualitativa dos riscos: priorização dos riscos para análise ou ação adicional por meio da avaliação e combinação de sua probabilidade de ocorrência e impacto;
- d) realizar análise quantitativa dos riscos: análise numérica do efeito dos riscos identificados, por meio da probabilidade de ocorrência, nos objetivos do projeto. Frequentemente, a quantificação é realizada utilizando as ferramentas de simulações computacionais;
- e) planejar as respostas aos riscos: desenvolvimento de opções e ações para aumentar as oportunidades e reduzir as ameaças nos objetivos do projeto, e
- f) controlar os riscos: implementação dos planos de respostas aos riscos, acompanhamento dos riscos identificados, monitoramento dos riscos residuais, identificação de novos riscos e avaliação da eficácia dos processos de gerenciamento dos riscos durante todo o projeto.

A Figura 2.11 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento dos riscos do projeto para o PMBOK (2014).

Figura 2.11. Processos de gerenciamento dos riscos do projeto do PMI.

Áreas de Conhecimentos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Execução	Monitoramento e Controle	Encerramento
Integração					
Escopo					
Tempo					
Custos					
Qualidade					
Recursos Humanos					
Comunicação					
Riscos		Planejar o gerenciamento dos riscos; Identificar os riscos; Realizar a análise qualitativa dos riscos; Realizar a análise quantitativa dos riscos; Planejar as respostas aos riscos.		Controlar os riscos.	
Aquisições					
Partes Interessadas					

Fonte: Adaptado do PMBOK (2014).

Conforme definido pela ISO 21500 (2012), o grupo do assunto dos riscos inclui os processos requeridos para identificar e gerenciar ameaças e oportunidades, que são:

- a) identificar os riscos: determinar os eventos potenciais de riscos e suas características que, caso ocorram, possam causar impactos positivos ou negativos nos objetivos do projeto;
- b) avaliar os riscos: mediação e priorização dos riscos, bem como estimar a probabilidade de ocorrência de cada risco e sua correspondente consequência para os objetivos do projeto;
- c) tratar os riscos: desenvolver opções e determinar ações para aumentar as oportunidades e reduzir ameaças para os objetivos do projeto, e

- d) controlar os riscos: minimizar a interrupção do projeto com a execução das respostas aos riscos e analisar seus efeitos nos objetivos do projeto.

A Figura 2.12 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento dos riscos do projeto para a norma ISO 21500 (2012).

Figura 2.12. Processos de gerenciamento dos riscos do projeto da ISO.

Grupos de Assuntos	Fases ou Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Implementação	Controle	Encerramento
Integração					
Partes Interessadas					
Escopo					
Recursos					
Tempo					
Custos					
Riscos		Identificar os riscos; Avaliar os riscos.	Tratar os riscos.	Controlar os riscos.	
Qualidade					
Aquisições					
Comunicação					

Fonte: Adaptado da ISO 21500 (2012).

E a ESA define que o gerenciamento dos riscos é composto por um conjunto sistemático e iterativo de processos para a otimização dos recursos conforme as políticas de gerenciamento dos riscos do projeto.

E acordo com a ECSS-M-ST-10C (2008), os riscos identificados são avaliados conforme sua severidade e probabilidade de ocorrência com o propósito de

avaliar as alternativas de mitigação dos riscos, bem como produzir e estruturar uma efetiva comunicação sobre os riscos do projeto. A seguir, apresentam-se esses processos:

- a) definir os requisitos da implementação do gerenciamento dos riscos: estabelecimento da política e do plano de gerenciamento dos riscos de forma coordenada com outras disciplinas do projeto espacial, tais como, a engenharia de sistemas, a garantia do produto, produção, montagem, integração e testes, entre outras;
- b) identificar e avaliar os riscos: os riscos identificados devem ser qualificados, priorizados, ranqueados e quantificados conforme sua severidade em relação aos objetivos do projeto (tempo, custo, qualidade, escopo, entre outros), bem como sua probabilidade de ocorrência;
- c) decidir e agir: analisar as opções de aceitação e redução dos riscos identificados, priorizados e quantificados, conforme a política de gerenciamento dos riscos de forma a produzir as estratégia de respostas aos riscos, e
- d) monitorar, comunicar e aceitar os riscos: tem como objetivo monitorar, atualizar, iterar, comunicar e finalmente aceitar o desempenho das respostas aos riscos nos objetivos do projeto (tempo, custo, escopo, qualidade, entre outros).

A Figura 2.13 ilustra a visão geral dos processos de gerenciamento dos riscos do projeto para o padrão da norma ECSS-M-ST-10C (2008).

Figura 2.13. Processos de gerenciamento dos riscos do projeto da ESA.

Disciplinas	Fases ou Grupos de Processos						
	O	A	B	C	D	E	F
Planejamento e implementação							
Configuração e informação							
Custo e cronograma							
Apoio à logística integrada							
Riscos	Definir os requisitos de implementação do gerenciamento dos riscos.						
		Identificar e avaliar os riscos.					
			Decidir e agir.				
			Monitorar, comunicar e aceitar os riscos.				

Fonte: Adaptado da ECSS-M-ST-10C (2008).

2.2. TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS DOS PROJETOS

De forma geral, as estimativas do projeto estão relacionadas ao planejamento do tempo necessário para concluir o projeto, do custo ou investimento financeiro necessário para concluir o projeto, bem como do processo da análise quantitativa dos riscos que influenciam os objetivos do projeto (tempo e custo) (GRAY, 2001).

Assim, o objetivo desta seção é apresentar:

- a) as principais técnicas de estimativas dos projetos utilizadas para o planejamento de cronogramas, orçamentos e quantificação dos riscos;
- b) as principais técnicas de estimativas do projeto de *software* utilizadas para o planejamento de cronogramas, orçamentos e quantificação dos riscos;

- c) o processo de estimativas dos recursos das atividades, pacotes de trabalho ou fases do projeto;
- d) o processo de estimativas das durações das atividades, pacotes de trabalho ou fases do projeto;
- e) o processo de estimativas dos custos das atividades, pacotes de trabalho ou fases do projeto;
- f) o processo de quantificação dos riscos do projeto por meio da apresentação e análise numérica dos efeitos dos riscos identificados. Frequentemente, a quantificação do risco é realizada utilizando as ferramentas de simulações computacionais, e
- g) sintetizar a utilidade da aplicação das técnicas de estimativas e quantificação dos riscos nos projetos em vários tipos de indústrias.

2.2.1. PRINCIPAIS TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS DOS PROJETOS

A partir da Estrutura Analítica do Projeto (EAP), da lista de atividades, do calendário dos recursos, do registro dos riscos, entre outros, as técnicas de estimativas dos projetos são empregadas com o objetivo de determinar as previsões ou aproximações dos recursos, das durações e dos custos necessários para completar as entregas dos projetos (LARSON; GRAY, 2011).

A precisão das estimativas dos recursos, das durações e dos custos é afetada por vários fatores específicos dos projetos, por exemplo, o tipo do projeto, a maturidade da organização e dos colaboradores, e de vários fatores externos que devem ser considerados a fim de aprimorar a precisão e a qualidade das estimativas dos projetos (GRAY, 2001).

Os processos para as estimativas das durações e dos custos dos projetos podem ser classificados em (KERZNER, 2009):

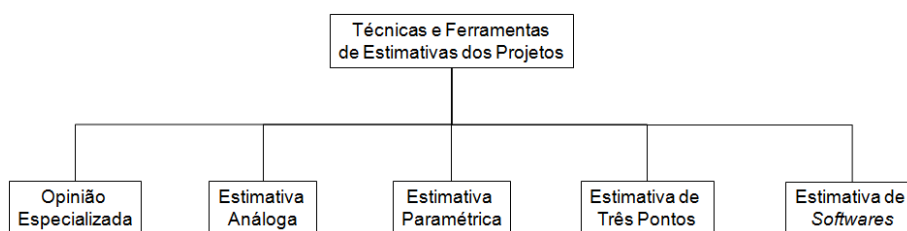
- a) *top-down* (de cima para baixo): são efetuados com base na experiência ou/e em informações para estimar a duração e o custo do projeto. Geralmente efetuados pela alta administração com pouco conhecimento sobre os processos usados para concluir o projeto, e
- b) *bottom-up* (de baixo para cima): em que a estimativa da duração e do custo do projeto é realizada pela agregação das estimativas dos componentes de nível mais baixo da EAP. Geralmente efetuado por membros da equipe do projeto com muito conhecimento sobre os processos usados para concluir o projeto.

E, por fim, as estimativas do projeto são utilizadas na quantificação dos riscos identificados, com o objetivo de analisar numericamente a probabilidade de ocorrência de cada risco, bem como sua respectiva consequência nas durações e nos custos das atividades do projeto.

Vale a ressalva de que a equipe do projeto também pode optar em usar mais de um tipo de técnica de estimativa para determinar as durações e os custos das atividades do projeto (KERZNER, 2009).

As técnicas de estimativas dos projetos podem ser categorizadas em estimativas baseadas em opinião especializada (consenso), em analogias, paramétricas ou por modelos (PMBOK, 2014). A Figura 2.14 ilustra os principais tipos de estimativas do projeto.

Figura 2.14. Principais tipos de estimativas dos projetos.



Fonte: Produção do autor (2015).

2.2.1.1. OPINIÃO ESPECIALIZADA

A opinião especializada, quando guiada por informações históricas, pode fornecer informações para as estimativas dos recursos, das durações, dos custos, bem como para a identificação e quantificação dos riscos das atividades a partir de projetos anteriores similares (LARSON; GRAY, 2011).

Esta opinião especializada pode ser oferecida por qualquer grupo ou pessoa com formação, conhecimento, habilidade, experiência ou treinamento apropriado. A opinião especializada está disponível em várias fontes, a seguir são apresentadas as principais fontes (PMBOK, 2014):

- a) alta administração/gestão;
- b) outras unidades/departamentos da organização;
- c) partes interessadas identificadas;
- d) gerentes de projetos anteriores da mesma área (diretamente ou por meio de lições aprendidas);
- e) especialistas no assunto da área de negócio ou do projeto;
- f) grupos e consultores do setor, e
- g) associações técnicas e de profissionais, entre outros.

A opinião especializada pode ser obtida por meio de consultas individuais (reuniões particulares, entrevistas, entre outros) ou em formato de painel (discussões de grupo, pesquisas de opinião, entre outros), como elucidado abaixo (PMBOK, 2014):

- a) entrevistas e questionários: meio formal e informal de extrair informações das partes interessadas e dos especialistas, por exemplo, técnica Delphi;
- b) grupos de discussão: reunião interativa e orientada para extração de informações de um grupo formado pelas partes interessadas e pelos especialistas;
- c) oficinas facilitadas: sessões focadas que reúnem um grupo temático de partes interessadas e especialistas;
- d) técnicas de criatividade em grupo: *brainstorming*, técnica do grupo nominal, mapas mentais, diagrama de afinidade, múltiplos critérios, entre outros;
- e) técnicas de tomada de decisão em grupo: processo de avaliação de múltiplas alternativas;
- f) observações: fornece uma maneira direta de observar as atividades do projeto em seu ambiente;
- g) protótipos: método para obter respostas iniciais sobre as atividades do projeto, e
- h) *benchmarking*: comparações para identificar melhores práticas.

2.2.1.2. ESTIMATIVA ANÁLOGA

A estimativa análoga é uma técnica de estimativa da duração e do custo de uma atividade, bem como de um projeto, a partir de informações históricas de atividades e/ou projetos semelhantes anteriores (PMBOK, 2014).

A estimativa análoga utiliza parâmetros tais como duração, orçamento, tamanho, peso e complexidade de um projeto anterior similar como base para a

estimativa dos mesmos parâmetros ou medidas para um projeto futuro. É uma abordagem para estimar o valor bruto, algumas vezes ajustado para diferenças conhecidas da complexidade do projeto, onde é frequentemente usada quando há certa quantidade de informações sobre o projeto (LARSON; GRAY, 2011).

A estimativa por analogia pode ser aplicada para estimar a totalidade da duração e do custo do projeto (estimativa *top-down*) ou pode ser usada para estimar as durações e os custos de cada uma das atividades do projeto (KERZNER, 2009).

A estimativa por analogia é uma forma de avaliação especializada. Esta forma de estimativa leva menos tempo para concluir do que outros modelos de estimativas, mas também é menos precisa (PMBOK, 2014).

2.2.1.3. ESTIMATIVA PARAMÉTRICA

A estimativa paramétrica é uma técnica que utiliza um algoritmo para calcular a estimativa das durações e dos custos das atividades baseada em dados e informações históricas e em parâmetros do projeto. Por meio da utilização de uma relação estatística entre os dados históricos e outras variáveis (por exemplo, área por tempo), pode-se calcular uma estimativa de parâmetros, tais como os custos e as durações das atividades do projeto (PMBOK, 2014).

As estimativas das durações e dos custos podem ser determinadas quantitativamente por meio de operações algébricas entre as quantidades de trabalhos realizados em projetos anteriores e as quantidades de trabalhos em projetos em fase de planejamento.

Esta técnica pode produzir altos níveis de precisão, conforme os dados básicos que foram colocados no modelo. Basicamente, os principais tipos de estimativas paramétricas, são apresentados a seguir (KERZNER, 2009):

- a) análise de Regressão: é uma abordagem estatística para prever qual poderá ser o valor futuro com base em valores históricos, e
- b) curva de Aprendizagem: esta abordagem aplica-se essencialmente a atividades repetitivas realizadas por pessoas, o custo por unidade diminui à medida que aumenta a experiência.

2.2.1.4. ESTIMATIVAS DE TRÊS PONTOS (PERT)

A precisão das estimativas das durações e dos custos das atividades do projeto pode ser aperfeiçoada por meio da técnica de três pontos, também conhecida como *Program Review and Evaluation Technique* (PERT - Técnica de Revisão e Avaliação de Programa) (DUFFY, 2006).

Nesta técnica, a estimativa aprimorada da duração de uma atividade é obtida por meio da operação algébrica que considera a variabilidade da duração da atividade.

E, a estimativa aprimorada do custo de uma atividade é obtida por meio da operação algébrica que considera a variabilidade do custo da atividade (CUKIERMAN, 2000).

Assim, a estimativa de três pontos ou PERT utiliza três estimativas para definir uma faixa aproximada (variabilidade) para a duração e o custo de uma atividade, representado por:

- a) valor mais provável: MP;
- b) valor otimista: O;
- c) valor pessimista: P, e
- d) valor esperado ou aprimorado: E.

O valor esperado ou aprimorado para a estimativa da duração e do custo da atividade do projeto pode ser obtido por meio da Equação 2.1 quando a distribuição da probabilidade dos valores contínuos na faixa das três estimativas for do tipo Beta, e por meio da Equação 2.2 quando a distribuição da probabilidade dos valores contínuos na faixa das três estimativas for do tipo triangular (EVANS; OLSON, 1998).

$$E = (O+4*MP+P)/6 \quad (2.1)$$

$$E = (O+MP+P)/3 \quad (2.2)$$

As estimativas resultantes da aplicação dessa técnica proporcionam duas principais vantagens (VOSE, 2000), que são:

- a) busca corrigir a distorção natural das estimativas das durações e dos custos, e
- b) com a determinação da variabilidade das estimativas (pessimista e otimista), é possível obter por meio de experimentos aleatórios, a quantificação dos riscos identificados do projeto, bem como suas influências na duração e no custo do projeto.

2.2.1.5. TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS DO PROJETO DE SOFTWARE

Um dos processos fundamentais de gerenciamento dos projetos de *software* é o conjunto de atividades que proporcionam estimar o tempo e o custo necessários para completar o projeto do *software* (FENTON; PFLEEGER, 1997).

Assim, as medidas de tamanho de *software* surgiram com o objetivo de estimar o esforço (número de pessoas por hora), o prazo e o custo associados ao desenvolvimento destes *softwares* (JONES, 1998). A principal medida utilizada era a quantidade de linhas de código fonte (SLOC – *Source Line of Code*), sendo considerada uma medida física do tamanho do *software* (KAN, 1995).

Embora o SLOC seja útil em muitos contextos, suas limitações levaram a criação de outras medidas que procuram medir a funcionalidade do *software* e não o tamanho do *software*, essas medidas são conhecidas como medidas funcionais de tamanho do *software* (WEBER et al., 2001).

Entre as principais técnicas de medidas funcionais utilizadas em modelos de estimativas do tempo e do custo do projeto do *software*, pode-se destacar a Análise por Pontos de Função (FPA – *Function Point Analysis*), Pontos por Caso de Uso (UCP – *Use Case Points*) e Modelo de Custo Construtivo (COCOMO – *Constructive Cost Model*) (PRESSMAN, 1995).

2.2.2. PROCESSO DE ESTIMATIVA DOS RECURSOS DO PROJETO

A partir da Estrutura Analítica do Projeto (EAP), da lista de atividades, do calendário dos recursos e do registro dos riscos as ferramentas e técnicas de estimativas dos projetos são empregadas com o objetivo de realizar as estimativas dos recursos das atividades, pacotes de trabalho e das fases do projeto (PMBOK, 2014; ISO 10006, 2003).

Segundo o PMI, é o processo de estimativas dos tipos e quantidades de material, pessoas, equipamentos, suprimentos, entre outros, que serão necessários para concluir cada uma das atividades do projeto. O principal benefício deste processo é identificar o tipo e a quantidade dos recursos requeridos por cada atividade, de forma a permitir estimativas mais efetivas dos custos e das durações destas atividades (PMBOK, 2014).

A norma ISO 21500 (2012) define que os recursos necessários para o projeto sejam identificados e quantificados, permitindo que o plano de alocação de recursos demonstre quais recursos serão necessários para o projeto e quando serão solicitados, de acordo com o cronograma. E a norma ISO 10006 (2003) também define que o planejamento dos recursos seja documentado, incluindo estimativas, alocações e limitações, em conjunto com as hipóteses feitas.

Conforme a ECSS-M-ST-10C (2008) e a ECSS-M-ST-60C (2008), a estimativa dos recursos para as atividades do projeto espacial deve prever o tipo, a quantidade e os períodos de disponibilidades para cada recurso identificado. Como as principais técnicas aplicadas na estimativa dos recursos, pode-se destacar a análise de alternativas, opinião especializada e dados históricos, entretanto, a técnica mais utilizada é a estimativa *bottom-up*.

2.2.3. PROCESSO DE ESTIMATIVA DA DURAÇÃO DO PROJETO

Estimar as durações da atividade é o processo da estimativa do número de períodos de trabalho que serão necessários para terminar as atividades específicas com os recursos estimados. Para isso devem ser utilizadas as informações sobre as atividades do escopo do projeto, EAP, lista de atividades, tipos dos recursos necessários, quantidades estimadas dos recursos, calendários dos recursos e o registro dos riscos. Assim, as ferramentas e técnicas das estimativas dos projetos são empregadas com o objetivo de realizar as estimativas das durações das atividades do projeto (PMBOK, 2014; ISO 10006, 2003).

Conforme definido pelo PMI, as estimativas das durações das atividades representam o tempo necessário planejado para a execução de cada atividade do cronograma. Frequentemente, as estimativas das durações são baseadas em dados históricos e opiniões de especialistas obtidas por técnicas de entrevistas, pesquisas e por processos baseados em modelos (PMBOK, 2014).

A ISO 10006 (2003) e a ISO 21500 (2012) definem que o processo da estimativa da duração das atividades seja estabelecido a partir de informações e experiências anteriores, e que seja verificada quanto à correção e aplicabilidade para as atuais condições do projeto. Quando a estimativa da duração envolver a incerteza, convém que os riscos sejam avaliados e minimizados, incorporando nas estimativas as tolerâncias apropriadas pertinentes aos riscos.

Enquanto que para a ECSS-M-ST-10C (2008) e a ECSS-M-ST-60C (2008) a estimativa da duração deve ser realizada para cada atividade do projeto, baseada na aplicação integrada das técnicas das estimativas, sendo as mais comuns, opinião especializada, análogas e paramétricas. O processo da estimativa da duração apoia o processo de desenvolvimento do cronograma do projeto.

2.2.4. PROCESSO DE ESTIMATIVA DO CUSTO DO PROJETO

A estimativa do custo da atividade do projeto envolve o desenvolvimento de uma aproximação dos custos dos recursos necessários para terminar cada atividade do projeto. Na aproximação destes custos, são consideradas as possíveis causas de variação das estimativas dos custos, inclusive os riscos (PMBOK, 2014; ISO 10006, 2003).

O PMI determina que a estimativa do custo deve incluir a identificação e a consideração de diversas alternativas dos custos, sendo que, na maior parte das áreas de aplicação, aceita-se o fato de que o trabalho adicional durante uma fase de projeto tem o potencial de reduzir o custo da fase de execução e das operações de produtos. O principal benefício deste processo é a definição dos custos requeridos para concluir as atividades do projeto (PMBOK, 2014).

Segundo a ISO 10006 (2003) e a ISO 21500 (2012), o processo de estimativa dos custos das atividades determina que todos os custos do projeto sejam identificados (atividades, bens e serviços) e estimados considerando as fontes pertinentes de informação, sendo que, as estimativas dos custos a partir de experiências anteriores devem ser verificadas para garantir a adequação às condições atuais do projeto.

Conforme a ECSS-M-ST-10C (2008) e a ECSS-M-ST-60C (2008), o padrão da ESA, a estimativa do custo é o processo de determinação da expectativa do custo de um projeto espacial. Uma estimativa de custo adequado proporciona um forte apoio para o desenvolvimento do orçamento e no processo de financiamento do projeto, bem como um suporte para o processo de tomadas de decisões no gerenciamento do projeto.

2.2.5. PROCESSO DE QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DO PROJETO

O processo de quantificação dos riscos tem como propósito apresentar e analisar numericamente a probabilidade de cada risco e de sua respectiva consequência nos objetivos do projeto (tempo e custo). Este processo usa técnicas para auxiliar na tomada de decisões para o gerenciamento do projeto, de forma a identificar o custo, o tempo ou os objetivos realísticos e alcançáveis para o projeto. A seguir, são apresentadas as principais ferramentas (PMBOK, 2014):

- a) o diagrama de tornado auxilia na análise de sensibilidade a fim de identificar os riscos que requerem maior atenção, quantificando sua contribuição relativa ao risco do projeto;
- b) a análise de decisão e do valor monetário esperado auxiliam em quantificar a exposição do risco, e determinar o tamanho da reserva

de contingência do custo e cronograma que pode ser necessária para o projeto, e

- c) a simulação de Monte Carlo determina a probabilidade em se conquistar um objetivo específico do projeto.

Segundo o PMI, a quantificação dos riscos consiste no processo de analisar numericamente o efeito dos riscos identificados nos objetivos do projeto, geralmente no tempo e no custo. O principal benefício desse processo é a geração de informações quantitativas dos riscos de forma a apoiar a tomada de decisões no gerenciamento do projeto. O processo de análise quantitativa dos riscos, geralmente segue o processo de análise qualitativa dos riscos (PMBOK, 2014).

A ISO 10006 (2003) e a ISO 21500 (2012) definem que o processo de quantificação dos riscos identificados do projeto deve determinar a probabilidade da ocorrência e do impacto dos riscos identificados, considerando a experiência e os dados históricos de projetos.

Conforme a ECSS-M-ST-10C (2008) e a ECSS-M-ST-60C (2008), a análise quantitativa dos riscos do projeto ocorre no processo de definir os requisitos de implementação do gerenciamento do projeto, em que, é determinado o ranqueamento dos riscos conforme sua severidade em relação ao tempo e custo do projeto, bem como sua probabilidade de ocorrência.

2.2.6. UTILIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS E QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS NAS ORGANIZAÇÕES

Baseado no sucesso e credibilidade das técnicas de estimativas e quantificação dos riscos, juntamente com o apoio de ferramentas computacionais com crescente capacidade de disseminação de dados (JIANG

et al., 2014), hoje é possível trabalhar grandes volumes de dados para o planejamento dos cronogramas, orçamentos e quantificação dos riscos (incertezas aleatórias) dos projetos nos mais diversos tipos de indústrias, podendo destacar o planejamento de projetos da produção, da construção civil, da logística, de serviços, bem como de outros tipos de indústrias e setores, incluindo o setor espacial (XIONG et al., 2015).

2.2.6.1. UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS DA PRODUÇÃO

As técnicas de estimativas e de quantificação dos riscos são amplamente utilizadas nos projetos dos processos de produção que tipicamente envolve mais de uma maneira de completar o produto (BARTELS; ZIMMERMANN, 2009). O plano de processo define o conjunto de atividades que devem ser executadas de forma a completar um produto, considerando as restrições dos diferentes recursos, as durações de processamento e as relações de precedências (CAPEK et al., 2012).

Portanto, o projeto da produção concentra-se no planejamento e no controle dos recursos do processo produtivo, recebendo informações sobre estoques, linha de produtos, vendas previstas, capacidades e modo de produzir (LAMGHARI; DIMITRAKOPOULOS, 2012). O planejamento da produção aplica os métodos de estimativas e de quantificação de riscos, a fim de apoiar as altas de taxas de utilização das instalações e dos recursos no curto, médio e longo prazo (BENAVIDES et al., 2014), que servem para:

- a) as atividades diárias, em que a estimativa dos recursos se faz necessária para atender às necessidades da produção, acompanhando a utilização de recursos e os resultados da execução das tarefas;

- b) as atividades no médio prazo, em que o problema fundamental é combinar suprimentos e demanda em termos de volume e produto, e
- c) as atividades futuras, que proporcionarão vantagens competitivas, sendo necessário que a organização forneça o conjunto apropriado de capacidade de tecnologia e recursos humanos para atender as necessidades futuras da organização.

De forma geral, existem muitos tipos de indústrias que utilizam as técnicas de estimativas e de quantificação dos riscos no planejamento de suas produções, com destaques para a indústria automotiva, siderúrgica, química, farmacêutica, aeronáutica, espacial, entre outras (ROCKAFELLAR et al., 2014; HAO et al., 2015).

2.2.6.2. UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Entre os processos mais importantes do gerenciamento de projetos da construção civil, pode-se destacar o planejamento que utiliza as técnicas de estimativas e de quantificação dos riscos (LOVA et al., 2006), sendo que, os projetos bem sucedidos, representam o principal fator para a lucratividade para as organizações presentes no setor da construção civil (KNOTTTS et al., 2000).

Muitos dos projetos da construção civil são empreendimentos únicos, assim, os gerentes de projetos precisam planejar as atividades do projeto atual baseado em experiências em projetos similares anteriores (BIDOT, 2005), por exemplo, casas, edifícios, pontes, barragens, fundações em geral, estradas, aeroportos e outras infraestruturas (BRCIC et al., 2012).

As organizações inseridas na indústria da construção civil executam suas atividades em um ambiente de múltiplos projetos, desta forma, intensificando

os problemas de planejamento de projetos que são fortemente influenciados pela política de alocação dos recursos limitados (geralmente do tipo renováveis), que podem ser definidos pelo modo de aquisição e compartilhamento (GONZALEZ; FRAMINAN, 2014).

E, por fim, pode-se destacar que as instalações de desenvolvimento, montagem, integração e testes de produtos de satélites são complexas e podem utilizar as técnicas de estimativas e quantificação dos riscos dos projetos.

2.2.6.3. UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

A cadeia de suprimentos é composta por um conjunto de atividades simultâneas que englobam os processos da logística integrada e engenharia reversa, e utiliza as técnicas de estimativas e de quantificação dos riscos no planejamento de suas atividades (BERGHMAN; LEUS, 2015). Existem várias definições para a cadeia de suprimentos, a seguir são apresentadas as mais encontradas (JAEHN; NEUMANN, 2015).

A cadeia de suprimentos pode ser definida como uma rede de trabalho de organizações que estão envolvidas, por meio de ligações a montante (fornecedores) e a jusante (distribuidores), em diferentes processos e atividades que produzem valores na forma de produtos e serviços entregues ao consumidor final (THOMAS et al., 2014; BIERWIRTH; MEISEL, 2010).

Uma cadeia de suprimentos pode ser definida como um processo integrado em que várias entidades do negócio (fornecedores, fabricantes, distribuidores, e varejistas), trabalham juntos nos esforços para (NGUYEN et al., 2015):

- a) adquirir matérias-primas;

- b) converter essas matérias-primas em produtos finais especificados e conforme padrões de qualidade, e
- c) entregar esses produtos finais aos varejistas.

Sendo que, na definição mais citada, a cadeia de suprimentos é definida como um conjunto de três ou mais entidades (organizacionais ou individuais), diretamente envolvidas no fluxo a montante (fornecedores) e a jusante (distribuidores) de produtos, serviços, financeiros e informações a partir da fonte até o consumidor (CHEN et al., 2013).

A seguir são apresentadas as principais áreas de aplicação das técnicas de estimativas e de quantificação dos riscos para o planejamento das atividades da cadeia de suprimentos:

- a) sistemas de transportes integrados (terrestre, marítimo e aéreo) (BERGHMAN; LEUS, 2015);
- b) sistemas de transporte urbano (trens, ônibus, entre outros) (KIM et al., 2012);
- c) projetos e operações de terminais de contêineres (terrestre, marítimo e aéreo) (GO et al., 2013);
- d) projetos e operação de aeroportos e portos (JAEH; NEUMANN, 2015);
- e) projetos especiais, por exemplo, de transportes emergenciais de ajuda humanitária para caso de catástrofes naturais (ÖZDAMAR; ERTEM, 2015), entre outros, e
- f) projetos espaciais, envolvendo o veículo lançador e sua base de lançamento, o satélite e suas bases de rastreamento e controle e a disponibilização das informações e dados para os usuários.

2.2.6.4. UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS DO SETOR DE SERVIÇOS

A indústria, mercado ou setor de serviços é composta de organizações privadas, sem fins lucrativos e governamentais, envolvidas nos ramos de serviços financeiros, transporte, segurança, telecomunicação, varejo, educação, saúde, hotéis, imobiliários, alimentação, administração pública, entre outros (BEANE; ENNIS, 1987; SARQUIS, 2006).

As técnicas de estimativas e quantificação dos riscos são utilizadas no planejamento das atividades dos diversos ramos do setor de serviços, podendo destacar o planejamento das atividades em (SOBEL et al., 2009):

- a) moradia: hotéis, motéis, apartamentos, casas, fazendas, entre outros;
- b) operações domésticas: reformas, consertos, paisagismo e limpeza, entre outros;
- c) entretenimento: teatro, cinema, esportes, parques, feiras, entre outros;
- d) higiene: lavanderia, estética, entre outros;
- e) médicos: dentistas, médicos, enfermagem, hospitais, entre outros;
- f) educação: formal, idiomas, vocacional, profissionalizante, entre outras;
- g) consultorias: contabilidade, gerenciamento, entre outros;
- h) financeiros: seguros, bancos, investimentos, empréstimos, créditos, entre outros;
- i) comunicação: telefone, correios, internet, entre outros, e
- j) segurança: pública e privada, entre outros.

2.2.6.5. UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS PARA OUTROS TIPOS DE INDÚSTRIAS

As técnicas de estimativas e de quantificação dos riscos também são utilizadas no planejamento das atividades de projetos em outros tipos de indústrias, sendo que a seguir é apresentada uma síntese para as indústrias do petróleo e gás, setor elétrico e do abastecimento de água. Porém, vale a ressalva de que a as técnicas de estimativas pode ser utilizada em praticamente todos os tipos de indústrias, setores e mercados, conforme elucidado abaixo:

- a) indústria de petróleo e gás: decisões devem ser tomadas considerando os impactos dos riscos no desempenho dos campos de petróleo e de gás, aumentando a possibilidade de sucesso, quantificando possíveis perdas e identificando oportunidades (MARTINELLI et al., 2013; GOEL et al., 2015);

- b) indústria do setor elétrico: planejamento para as atividades de geração e transmissão (transmissão e distribuição) da energia elétrica (GOEL; MEISEL, 2013). A geração é o segmento da indústria de eletricidade responsável por produzir energia elétrica e injetá-la nos sistemas de transporte (transmissão e distribuição). O segmento de transmissão é aquele que se encarrega de transportar grandes quantidades de energia provenientes das usinas geradoras para que chegue aos consumidores (BEERBÜHL et al., 2015), e

- c) abastecimento de água: planejamento do sistema de abastecimento de água que é composto pela captação da água do meio ambiente, tratamento adequado para torná-la potável (adução, tratamento e armazenagem) e distribuição até os consumidores, em quantidade suficiente para suprir suas necessidades de consumo (GHADDAR et al., 2015; PRITCHAR, 2015), entre outras.

2.2.6.6. UTILIZAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE PROJETOS PARA O SETOR ESPACIAL

É bem provável que os projetos do setor espacial, aeronáutico e de defesa representem os produtos e serviços com desenvolvimentos tecnológicos mais complexos e repletos de restrições técnicas, de cronograma, de orçamento, riscos, incertezas entre outras.

Abordando os projetos do setor espacial, pode-se constatar a importância remetida ao planejamento desses projetos, em que os processos de estimativas de recursos, tempo e custo, bem como também de quantificação dos riscos (incertezas aleatórias) estão presentes em todas as abordagens de gerenciamento dos projetos espaciais.

Com o propósito de comprovar a utilização das técnicas das estimativas e de quantificação dos riscos nos projetos espaciais. A seguir é apresentada parte do padrão da Agência Espacial Europeia (ESA) e da NASA sobre o aspecto de planejamento de projetos espaciais:

- a) no conjunto de padrões da ESA para o planejamento de projetos, existem dois padrões específicos, sendo um para o planejamento do cronograma e do custo, e outro para o gerenciamento dos riscos dos projetos espaciais (ECSS-M-ST-10C, 2008), e
- b) no *Handbook* de Engenharia de Sistemas da NASA, as técnicas de estimativas para os recursos, durações e custo, bem como para o gerenciamento dos riscos, são apresentados em capítulos específicos, em que influenciam o projeto do sistema espacial durante todo o seu ciclo de vida (NASA, 2007).

Vale a ressalva de que o INPE, frequentemente, aplica os padrões da ESA em seus projetos espaciais.

2.3. ABORDAGENS QUE CONSIDERAM AS INCERTEZAS NAS ESTIMATIVAS DOS PROJETOS E ANÁLISE DE *TRADE-OFF*

O principal objetivo destas abordagens, de forma geral, é quantificar o impacto ou a influência das incertezas das estimativas no processo de desenvolvimento, monitoramento e controle do cronograma e do orçamento do projeto (VOSE, 2000).

Frequentemente, os impactos ou as influências das incertezas são numericamente representados por meio do processo de quantificação dos riscos (ameaças e oportunidades), com a determinação da probabilidade de ocorrência dos riscos frente aos objetivos do projeto, por exemplo, tempo, custo, escopo, em outros (HILLSON, 2004).

Esta tese possui interesse em estudar como as incertezas afetam o processo de estimativa das durações e dos custos de projetos, e como a análise de *trade-off* proporciona a possibilidade de compreender a relação de aumento e diminuição entre os valores do tempo e do custo para uma atividade, pacote de trabalho, fase, bem como para todo o projeto.

Esta seção apresenta como as incertezas são consideradas no processo de estimativas do tempo e do custo dos projetos. No contexto desta tese, são consideradas as incertezas do tipo aleatórias, em que, segundo Hillson (2004) a incerteza aleatória refere-se a um evento desconhecido, que são extraídos a partir de um conjunto conhecido de possíveis resultados.

Esse conjunto conhecido de possíveis resultados representa uma aproximação do evento desconhecido, o que possibilita o tratamento deste evento por meio das ferramentas probabilísticas (KERZNER, 2009).

É razoável esclarecer que as incertezas do tipo aleatórias, na verdade são incertezas pseudoaleatórias, cujos conjuntos dos possíveis resultados são aproximações dos eventos desconhecidos, porque utilizam algum tipo de

gerador de números aleatórios, sendo que esses geradores são baseados em mecanismos determinísticos e iterativos (DEVROYE, 1986).

Entretanto, é possível realizar experimentos, em condições internas e externas controladas, onde os possíveis resultados não são aproximações, e, portanto, as incertezas podem ser consideradas como puramente aleatórias (LARSON; GRAY, 2011).

Assim, para o contexto de gerenciamento dos projetos, as incertezas pseudoaleatórias tratadas nesta tese são consideradas como incertezas aleatórias, pois, apresentam uniformidade no intervalo unitário e a independência entre sequências de valores gerados.

Esta seção apresenta os assuntos a seguir:

- a) as principais abordagens, implementadas por meio de simulações computacionais, que consideram as incertezas aleatórias nas estimativas das durações e dos custos do projeto, por meio da quantificação dos riscos;
- b) o resumo das principais técnicas da programação estocástica que consideram as incertezas aleatórias no processo de estimativas de projetos, e
- c) a representação das incertezas aleatórias (variabilidades) das durações e dos custos de forma gráfica, por meio da análise de *trade-off*.

2.3.1. ABORDAGENS QUE CONSIDERAM AS INCERTEZAS NAS ESTIMATIVAS DOS PROJETOS

Historicamente, as primeiras aplicações considerando as incertezas aconteceram no campo da pesquisa operacional a partir da segunda metade

da década de 1930, sobretudo na campanha europeia da Segunda Guerra Mundial (BRISKORN et al., 2010).

As técnicas da pesquisa operacional foram inicialmente desenvolvidas na Inglaterra e baseadas em análises que procuravam maximizar os escassos recursos disponíveis às operações militares (HARTMANN; BRISKORN, 2010; LIU et al., 2013).

O campo da pesquisa operacional desenvolveu-se de forma interdisciplinar com o objetivo de abordar problemas complexos de controle da logística de um grande número de forças de trabalho, materiais, suprimentos, equipamentos bélicos, bem como de projetos complexos de novas armas em um ambiente altamente complexo que exigia tomadas de decisões estratégicas (BENAVIDES et al., 2014). Ao final da guerra, as técnicas da pesquisa operacional passaram a ser aplicadas nos meios organizacionais da Inglaterra e dos Estados Unidos da América (GERSTL; MOSHEIOV, 2013).

Desta forma, a pesquisa operacional é considerada como uma ciência aplicada para a resolução de problemas reais, com a aplicação de conceitos e métodos de várias áreas científicas na concepção, planejamento ou operação de sistemas (HOSSEININASAB; BOUSHEHRI, 2015).

A pesquisa operacional é utilizada para auxiliar a tomada de decisões com base em modelos dos problemas reais, de forma a simular as soluções estratégicas ou decisões alternativas que melhor servem aos objetivos dos indivíduos ou organizações (KASTOR; SIRAKOULIS, 2009).

Baseado no sucesso e credibilidade das técnicas e metodologias da pesquisa operacional e com o apoio de ferramentas computacionais com crescente capacidade de disseminação de dados, hoje é possível trabalhar grandes volumes de dados sobre as atividades nos mais diversos tipos de indústrias, podendo destacar a programação da produção, da construção civil, da logística, de serviços, desenvolvimento de novos produtos e *softwares*,

aeroespacial, energia, agricultura, telecomunicações, bem como de outros tipos de indústrias e setores (HERROELEN et al., 1998; PETEGHEM; VANHOUCHE, 2010).

A pesquisa sobre a influência das incertezas aleatórias nas estimativas de projetos foi intensificada a partir do reconhecimento de que os modelos de redes CPM (*Critical Path Method*), PERT (*Project Evaluation Review Technique*) e PDM (*Precedence Diagram Method*) pressupõem disponibilidade ilimitada de recursos (MORI; TSENG, 1997; CONTADOR, 1997; BROWNING; YASSINE, 2010).

A importância da estimativa dos projetos é justificada por ser a principal causa de insucesso dos projetos, cerca de apenas 30% dos projetos chegam ao seu final dentro do prazo e do orçamento (BRCIC et al., 2012). A estimativa é definida como o processo de previsão e aproximação dos recursos, do tempo e dos custos para completar o projeto (MARAVAS; PANTOUVAKIS, 2012).

No processo de estimativa do projeto é necessário considerar as restrições inerentes à natureza dos projetos, sendo, as precedências das atividades dos projetos e as estimativas dos recursos, das durações e dos custos das atividades, pacotes de trabalho e das fases, necessários para concluir o projeto (FIGIELSKA, 2014; CREEMERS et al., 2015).

As incertezas relacionadas ao projeto podem ocasionar o não cumprimento do cronograma e do orçamento, sendo que essas incertezas são proporcionadas por vários tipos de fontes (HASSANZADEH et al., 2014; ZHANG; ELMAGHRABY, 2014), que são:

- a) as atividades podem consumir mais ou menos tempo e recursos do que originalmente estimado;
- b) o material, equipamento ou recurso podem ficar disponíveis antes ou depois do estimado;

- c) necessidade de alteração nas datas de entregas, conforme as diretrizes do gerenciamento da configuração;
- d) incorporação de novas atividades, pacotes de trabalhos ou fases no projeto, e
- e) alteração do escopo do projeto devido as influências internas ou externas, entre outras.

2.3.1.1. PRINCIPAIS TÉCNICAS QUE CONSIDERAM AS INCERTEZAS NAS ESTIMATIVAS DOS PROJETOS

Do ponto de vista da modelagem, as técnicas que consideram as incertezas nos projetos, surgiram apenas a partir da primeira década do ano 2000 (NABER; KOLISCH, 2014). Tais modelos matemáticos são viabilizados por meio de simulações computacionais, e frequentemente, podem ser categorizados como (BACH et al., 2015; ÖZDAMAR; ERTEM, 2015):

- a) Programação reativa: não se preocupa em tratar as incertezas durante o desenvolvimento do cronograma e do orçamento, se concentrando em recalcular e reajustar o *schedule baseline* e o *budget baseline* cada vez que algum evento inesperado ocorre, seguem as principais técnicas:
 - técnicas simples de reparo do *schedule baseline*, apenas corrigindo os problemas causados pelos eventos inesperados que acontecerem (*right-shift rule*), e
 - determinação de um novo cronograma e orçamento para o projeto, a partir do instante em que ocorreu o evento inesperado.

b) Programação estocástica: consideram as durações das atividades como fonte de incertezas aleatórias, a fim de minimizar o tempo esperado do projeto, mantendo as relações de precedência entre as atividades e as restrições dos recursos, tratando o problema do cronograma e do orçamento do projeto como um processo de decisão multiestágios (STORK, 2001; ARCHER, 2008), seguem as principais técnicas:

- métodos baseados em amostragem;
- algoritmos de distribuição de estimação (EDA – *Estimation of Distribution Algorithm*);
- métodos de perturbação;
- método de Neumann;
- método de Galerkin, e
- método de Colocação Estocástica.

c) Programação com lógica Fuzzy: utilizada quando ocorre a falta de dados históricos para a determinação da distribuição probabilística das durações das atividades, a fim de determinar o cronograma e o orçamento do projeto (MOHANTY et al., 2005; LIU et al., 2013), seguem as principais técnicas:

- *Fuzzy project scheduling* – G4;
- *Fuzzy project scheduling* – SIM, e
- *Fuzzy project scheduling* – Meta-heurísticas (SA, Algoritmos evolucionários, Busca Tabu, PSO).

d) Programação proativa: a incerteza aleatória é contingenciada aumentando a robustez do cronograma a resultados inesperados de forma que o cronograma possa permanecer viável sobre várias condições em um ambiente incerto (VALLS et al., 2009; ARANDA et al., 2015), seguem as principais técnicas:

- métodos baseados na redundância: alcançam a robustez a perturbações por meio da redundância de recursos e tempo. A redundância do tempo é utilizada com mais frequência porque a redundância de recursos é proibida por causa dos custos (CCPM – *Critical Chain Path Method*, e o SDPM – *Success Driven Project Management*);

- métodos robustos: uma programação é robusta quando uma alteração nas restrições causa pouca alteração na programação inicial, e

- métodos de contingência: baseada na geração de múltiplos *baselines*, com o objetivo de responder de forma ótima frente às possíveis interrupções. Quando algum evento inesperado ocorrer, basta utilizar a programação (ou fragmento) correspondente àquela situação. Assim, o foco está em flexibilidade e robustez.

2.3.2. DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS DA PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA

Dentre as técnicas que consideram as incertezas no processo de estimativa dos projetos, a abordagem dominante procura tratar as incertezas como variáveis aleatórias, a fim de transformar a formulação matemática determinística em sistemas ou processos estocásticos por meio de simulações estocásticas computacionais (GONZALEZ; FRAMINAN, 2014).

Basicamente, as principais técnicas são baseadas na abordagem SRCPSP (*Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem*) que considera os fatores conhecidos de imprevisibilidades da natureza dos projetos (ZHANG; ELMAGHRABY, 2014).

O SRCPSP é uma variante estocástica do RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*) que consiste no planejamento do cronograma e do orçamento conforme a precedência e a disponibilidade de recursos limitados, de forma a minimizar o *makespan* ou a duração do projeto (COELHO; VANHOUCKE, 2011; ABOUTALEBI et al., 2012).

Na sequência, são apresentadas as principais técnicas de programação estocástica que consideram as incertezas aleatórias no processo da estimativa do tempo e do custo, em que os impactos das incertezas aleatórias no cronograma e no orçamento do projeto são representados por meio do processo de quantificação dos riscos, com a determinação da probabilidade de ocorrência da incerteza aleatória.

2.3.2.1. TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA - QUE USAM AMOSTRAGEM DIRETA

A principal técnica de amostragem direta é o método de Monte Carlo, que fornece soluções aproximadas para uma série de problemas matemáticos executando experimentos de amostragem estatística por simulações computacionais (BUSTOS; FRERY, 1992).

O método de Monte Carlo, frequentemente, é aplicado em sistemas com variáveis aleatórias, ou seja, que não podem ser descritos de forma exata por uma formulação matemática, entretanto, podem ser descritos com o uso de estruturas probabilísticas, por meio de simulações estocásticas com base em distribuições de probabilidade (RIPLEY, 1987).

Segundo Devroye (1986), as simulações estocásticas utilizam algum tipo de gerador de números aleatórios, vale a ressalva de que, tais geradores são baseados em mecanismos determinísticos e iterativos. Portanto, a nomenclatura mais adequada seria de geradores de números pseudoaleatórios, pois, estes mecanismos geram números com comportamento similar aos efetivamente aleatórios.

Entretanto, pode-se assumir que os números gerados possuem as propriedades básicas necessárias de um número realmente aleatório, tais como, a uniformidade no intervalo unitário e a independência entre sequências de valores (DEVROYE, 1986).

O método de Monte Carlo pode ser executado conforme as três etapas básicas descritas a seguir:

- a) estabelecer as populações de interesse, com parâmetros (média, desvio padrão, moda, entre outros) e comportamentos distribucionais (normal, exponencial, uniforme, entre outros);
- b) obter amostras aleatórias destas populações, por meio do gerador de números aleatórios, e calcular as estatísticas de interesse, e
- c) criar a distribuição de frequência da estatística de interesse, também conhecida como distribuição aleatória empírica, que pode ser comparada com a distribuição aleatória teórica da estatística.

Também, pode-se citar o método dos Algoritmos de Estimação de Distribuição, que são compostos por um conjunto de algoritmos evolutivos, que substituem os operadores de mutação e recombinação por um modelo probabilístico que representa a distribuição de probabilidade para as melhores soluções. Estes algoritmos são conhecidos como Algoritmos Genéticos Baseados em Modelos Probabilísticos (BALUJA, 1994).

Um Algoritmo de Estimação de Distribuição pode ser executado conforme as etapas descritas abaixo:

- a) geração aleatória da população inicial de soluções;
- b) a cada iteração, as soluções são avaliadas e as melhores soluções são selecionadas;
- c) construção de um modelo probabilístico que represente a distribuição de probabilidade dessas melhores soluções, e
- d) o processo é repetido até que o critério de aceitação seja satisfeito.

Embora os Algoritmos de Estimação de Distribuição apresentem muitas vantagens, entretanto, também apresentam algumas limitações (MÜHLENBEIN; PAAß, 1996):

- a) elevado custo computacional de implementação, por causa da necessidade da construção de um modelo probabilístico para cada iteração, e
- b) perda de diversidade na população, pois, tais algoritmos geram novas soluções com base na distribuição de probabilidade das melhores soluções selecionadas previamente.

2.3.2.2. TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA - QUE NÃO USAM AMOSTRAGEM DIRETA

Entre os principais métodos que não usam amostragem direta, o mais encontrado é o método de perturbações, que apresenta um conjunto de técnicas para determinar a solução aproximada de um problema desconhecido

por meio da comparação com outro problema similar, cuja solução é conhecida (STEWART, 1990).

Assim, as técnicas de perturbações são compostas por métodos iterativos para a obtenção de soluções aproximadas de problemas que envolvem um pequeno parâmetro de perturbação por meio da série de Taylor.

Frequentemente, a expansão da série de Taylor é feita até segunda ordem, pois, são suficientes para revelar características importantes da solução de um problema (ELISHAKOFF et al., 1995).

Entretanto, a principal limitação deste método está relacionada ao tamanho das perturbações, sendo que este método está restrito a pequenas oscilações de perturbações, pois, grandes magnitudes de perturbações afetam o desempenho do método (STEWART, 1990).

Outra abordagem que pode ser destacada nos métodos que não usam amostragem direta são os métodos baseados na manipulação de operadores estocásticos ou de expansão estocástica para a quantificação de incertezas, a seguir os principais métodos são apresentados:

- a) Expansão de Neumann: o operador é expandido em uma série convergente de Neumann em termos da inversa da média do operador. A aplicação dessa técnica pode requerer manipulações simbólicas de grande complexidade (YAMAZAKI et al., 1988);
- b) Método espectral de Galerkin: projeta as variáveis aleatórias do modelo determinístico num espaço estocástico construído a partir de um conjunto de polinômios ortogonais. Este método se constitui numa generalização do Polinômio Caos clássico (BABUSKA et al., 2004), e
- c) Colocação estocástica: consiste em obter uma função de interpolação multidimensional que permita representar a solução de

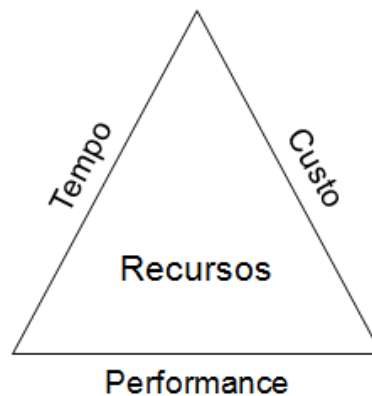
determinado sistema em função das variáveis aleatórias. Esta técnica é, conceitualmente, mais simples do que o método do Caos Polinomial de Galerkin (XIU; HESTHAVEN, 2005).

2.3.3. ANÁLISE DE *TRADE-OFF* EM GERENCIAMENTO DOS PROJETOS

O gerenciamento do projeto tem como principal objetivo controlar os recursos corporativos conforme as restrições de tempo, custo e performance (desempenho).

Esta combinação de restrições é representada na Figura 2.15 que deve ser continuamente perseguida pela equipe durante todo o ciclo de vida do projeto, e não apenas na fase de planejamento (KERZNER, 2009).

Figura 2.15. Visão geral do gerenciamento do projeto.

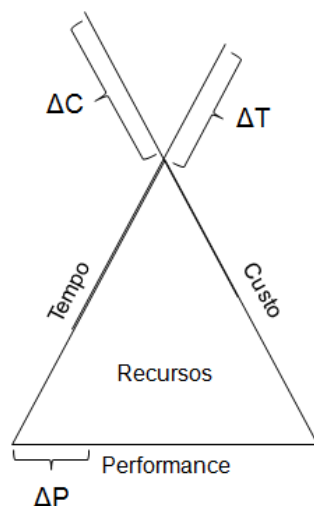


Fonte: Adaptado de KERZNER (2009).

A análise de *trade-off* é ilustrada na Figura 2.16, em que os deltas representam os desvios das estimativas originais, geralmente os desvios do tempo e do custo produzem valores maiores do que as estimativas originais, enquanto que

os desvios da performance produzem valores menores do que as estimativas originais.

Figura 2.16. Gerenciamento do projeto com o *Trade-off*.



Fonte: Adaptado de KERZNER (2009).

A análise de *trade-off* deve ser baseada nas restrições do projeto, conforme a Tabela 2.1 que ilustra os tipos de restrições normalmente impostas, que são:

- a) a maioria dos projetos de equipamentos de capital encontra-se na categoria A1 e B2, em que o tempo é fixo e o custo e a performance são variáveis;
- b) em geral, os projetos de construção civil encontram-se na categoria A2, em que o custo é o tema principal do projeto e o tempo e a performance são variáveis;
- c) os projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) encontram-se na categoria A3, sendo que, geralmente a performance é bem definida, enquanto que o tempo e o custo podem ser autorizados para serem maiores do que o cronograma e o orçamento planejados;

- d) os projetos das organizações de consultoria profissional encontram-se na categoria B1, sendo que o tempo e o custo são fixos e a performance é variável;
- e) os projetos de equipamentos de controle de poluição encontram-se na categoria B3, pois, o desempenho é atribuído por meio da legislação;
- f) para os projetos categorizados como C1, existe apenas a expectativa de sucesso total em relação ao tempo, custo e performance, e
- g) para os projetos categorizados como C2, não existem restrições, portanto, não existe análise de *trade-off*.

A Tabela 2.1 apresenta ilustra os tipos de restrições normalmente impostas aos projetos de forma geral.

Tabela 2.1. Categorias das restrições dos projetos.

	Tempo	Custo	Performance
A – Um elemento fixo			
A1	Fixo	Variável	Variável
A2	Variável	Fixo	Variável
A3	Variável	Variável	Fixo
B – Dois elementos fixos			
B1	Fixo	Fixo	Variável
B2	Fixo	Variável	Fixo
B3	Variável	Fixo	Fixo
C – Três elementos fixos ou variáveis			
C1	Fixo	Fixo	Fixo
C2	Variável	Variável	Variável

Fonte: Adaptado de KERZNER (2009).

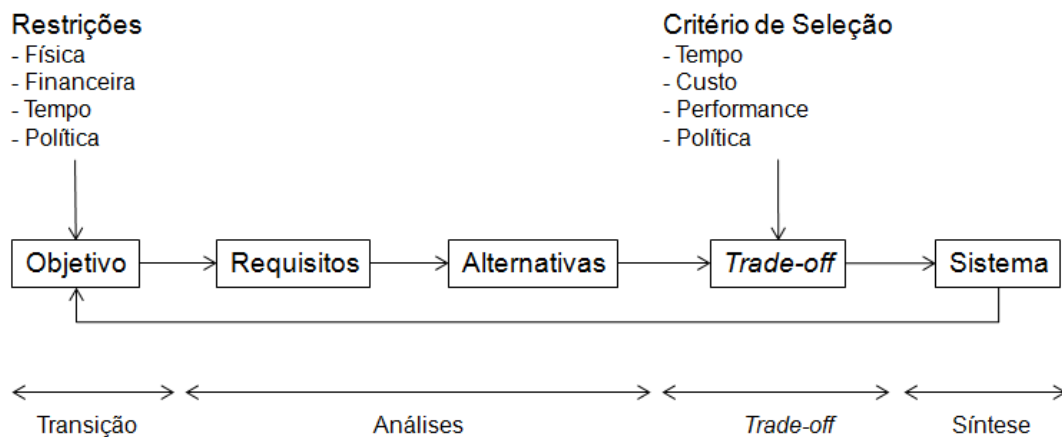
Existem muitos fatores internos e externos que forçam o *trade-off* no projeto, por exemplo, posição de mercado, reputação, rentabilidade, confiabilidade, controles, serviços, entre outros (LARSON; GRAY, 2011).

Entretanto, deve-se ressaltar que, nem sempre é possível sacrificar uma das restrições (tempo, custo e performance) sem influenciar as outras restrições.

Qualquer processo de gerenciamento do *trade-off* do tempo, custo e performance deve enfatizar uma abordagem sistêmica, reconhecendo que qualquer alteração no projeto pode facilmente afetar todo o sistema organizacional (GRAY, 2001).

A Figura 2.17 apresenta um típico modelo de abordagem de sistema, para o tratamento o *trade-off* entre o tempo, o custo e a performance dos projetos de forma geral.

Figura 2.17. Modelo de abordagem de sistema.



Fonte: Adaptado de KERZNER (2009).

Segundo Kerzner (2009), para a aplicação do modelo de abordagem de sistema no processo de tomada de decisão na análise do *trade-off*, baseado no

contexto de gerenciamento do tempo, custo e riscos dos projetos, deve-se seguir os passos descritos a seguir:

- a) reconhecimento e entendimento das bases para os conflitos do projeto;
- b) revisão dos objetivos do projeto;
- c) analisar o ambiente e o *status* do projeto;
- d) identificar as alternativas que estão em curso de ações;
- e) analisar e selecionar a melhor alternativa de *trade-off*, e
- f) revisar o plano do projeto.

Conforme afirma Kerzner (2009), a melhor maneira de apresentar a análise de *trade-off* é por meio de gráficos. Os métodos gráficos são utilizados para determinar, por exemplo, o quanto de custo deve ser adicionado para diminuir o tempo do projeto. Usando as técnicas gráficas, pode-se decidir qual dos três parâmetros deve ser fixo.

Quando a performance é fixa, o *trade-off* deve ser realizado entre o tempo e o custo, ou seja, o custo pode estar em função do tempo e o tempo pode estar em função do custo.

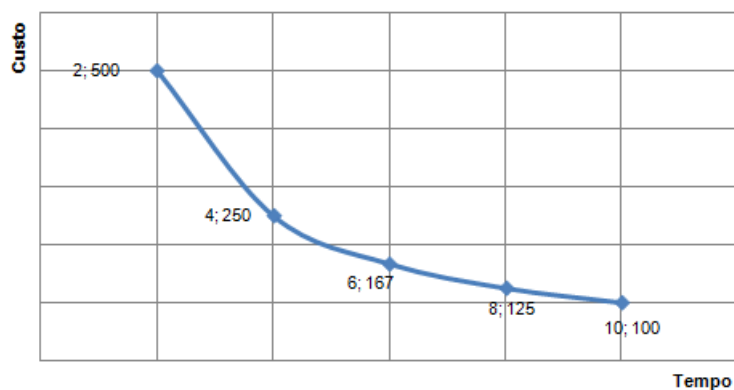
Mantendo a performance fixa, basicamente existem quatro formas de analisar o *trade-off* entre o tempo e o custo, que são :

- a) aumentando o custo, ou seja, frequentemente por meio da adição de recursos, pode-se aumentar a probabilidade de cumprir o cronograma, ou ainda diminuir o tempo do conjunto de atividades do projeto;

- b) aumentando o tempo, pode-se aumentar a probabilidade de cumprir o orçamento, ou ainda diminuir o custo do conjunto de atividades do projeto;
- c) por meio das técnicas de arranjo, nivelamento e alocação de recursos, e
- d) por meio das técnicas de otimização de cronogramas, por exemplo, com alterações na lógica de precedência entre as atividades.

A Figura 2.18 apresenta um gráfico com o *trade-off* entre a estimativa de tempo e custo de uma atividade do projeto.

Figura 2.18. Gráfico com a performance fixa e *trade-off* entre o tempo e o custo.

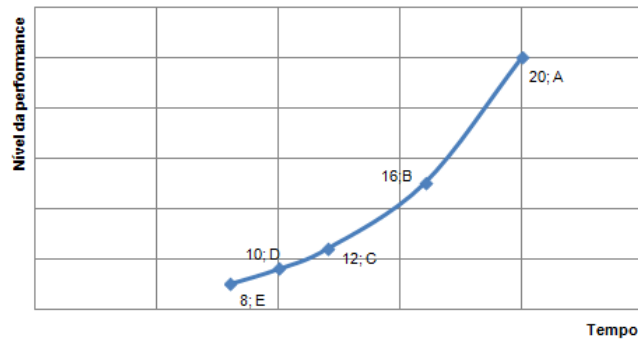


Fonte: Adaptado de KERZNER (2009).

Quando o custo é fixo, o *trade-off* deve ser realizado entre o tempo e o nível da performance, ou seja, geralmente o tempo está em função do nível da performance. Quando o custo é fixo, é imperativo que os níveis de performance estejam acordados, formalmente, entre os *stakeholders*.

Assim, a performance da atividade do projeto é sacrificada em função do tempo. A Figura 2.19 apresenta um gráfico com o *trade-off* entre a estimativa de tempo e o nível da performance de uma atividade do projeto.

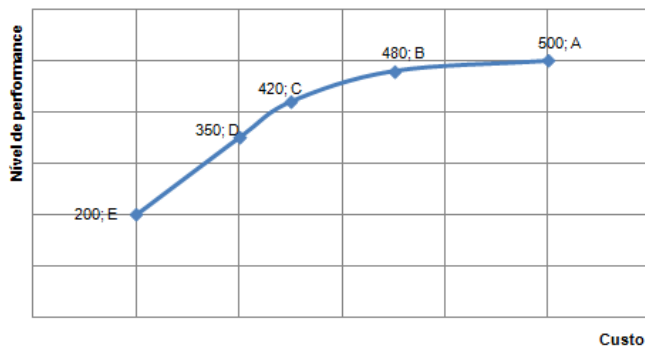
Figura 2.19. Gráfico com o custo fixo e *trade-off* entre o tempo e o nível da performance.



Fonte: Adaptado de KERZNER (2009).

Quando o tempo é fixo, o *trade-off* deve ser realizado entre o custo e o nível da performance, ou seja, geralmente o custo está em função do nível da performance. Quando o tempo é fixo, é imperativo que o nível da performance esteja acordado, formalmente, entre os *stakeholders*. Assim, a performance da atividade do projeto é sacrificada em função do custo. A Figura 2.20 apresenta um gráfico com o *trade-off* entre a estimativa do custo e o nível da performance de uma atividade do projeto.

Figura 2.20. Gráfico com o tempo fixo e *trade-off* entre o custo e o nível da performance.



Fonte: Adaptado de KERZNER (2009).

A Tabela 2.2 identifica as preferências no processo de *trade-off* de um conjunto de indústrias pesquisadas. Os dados da Tabela 2.2 refletem uma pesquisa de respostas gerais, em que foram aproximados vários fatores que afetam a tomada de decisão sobre em qual ordem os parâmetros são sacrificados no processo de *trade-off*.

Vale a ressalva de que os números (1, 2 e 3) na Tabela 2.2 indicam a ordem em que os parâmetros são sacrificados. Por exemplo, analisando a indústria de Construção segundo a Tabela 2.2, o tempo é o primeiro fator a ser sacrificado, seguido da performance e, por último, o custo é sacrificado.

Tabela 2.2. Preferência da indústria pelo *trade-off* dos projetos.

Indústria	Tempo	Custo	Performance
Construção	1	3	2
Química	2	1	3
Eletrônica	2	3	1
Automotiva	2	1	3
Processamento de dados	2	1	3
Governamental	2	1	3
Saúde (sem fins lucrativos)	2	3	1
Medicina (com fins lucrativos)	1	3	2
Nuclear	2	1	3
Plástico	2	3	1
Metalúrgica	1	2	3
Consultoria gerencial	2	1	3
Consultoria engenharia	3	1	2
Produtos de escritório	2	1	3
Ferramentas de máquinas	2	1	3
Óleo	2	1	3
Baterias primárias	1	3	2
Utilidades	1	3	2
Aeroespacial	2	1	3
Varejo	3	2	1
Financeiro	2	1	3

Fonte: Adaptado de KERZNER (2009).

3 DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS

Esta tese considera a técnica da estimativa conjugada como um artefato de gerenciamento dos projetos, que pode ser diretamente aplicada aos processos de gerenciamento do tempo, do custo e dos riscos dos projetos.

De forma resumida, a técnica da estimativa conjugada permite tratar da descrição geométrica das atividades presentes do diagrama de precedências do projeto em um sistema de coordenadas bidimensional (duração e custo).

Com a inserção das incertezas aleatórias ou variabilidades na formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, pode-se realizar o planejamento do cronograma e do orçamento do projeto considerando que as incertezas aleatórias ou variabilidades das durações influenciarão no planejamento dos custos, e de que as incertezas aleatórias ou variabilidades dos custos influenciarão no planejamento das durações do projeto.

Ainda, com a inserção das incertezas aleatórias ou variabilidades das durações e dos custos na formulação matemática, pode-se realizar a análise de *trade-off* entre as durações e os custos. Essa análise de *trade-off* proporciona uma certa liberdade a equipe do projeto durante o processo de planejamento do cronograma e orçamento do projeto.

E por fim, a técnica da estimativa conjugada, também pode ser utilizada no processo de quantificação dos riscos dos projetos. Pois, com a inserção das incertezas aleatórias ou variabilidade das durações e dos custos na formulação matemática, as durações e os custos modelados também representam a quantificação dos riscos proporcionados pelas incertezas aleatórias dos projetos.

Desta forma, com a aplicação da técnica da estimativa conjugada em conjunto com os modelos de quantificação de incertezas aleatórias descritos na seção 2.3, é possível determinar a probabilidade de ocorrências dos riscos.

Portanto, este capítulo tem como objetivo tratar dos assuntos a seguir:

- a) apresentar a adaptação do conceito de Trabalho da Mecânica Clássica para representar o Trabalho necessário para a execução de uma atividade considerando a duração, o custo e suas incertezas aleatórias ou variabilidades;
- b) apresentar o conjunto de objetivos que orientaram o desenvolvimento da técnica da estimativa conjugada, que foi baseada nos conceitos do Trabalho da Mecânica Clássica e na descrição geométrica das cadeias cinemáticas dos manipuladores robóticos, e
- c) apresentar dos componentes da técnica da estimativa conjugada modelados por meio da linguagem do IDEF0 (*ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing) Definition for Functional Modeling*), bem como sua nomenclatura e a descrição do uso da cinemática direta e inversa para a técnica da estimativa conjugada;
- d) desenvolver uma formulação matemática que proporcione a descrição do Trabalho (τ) entre duas atividades adjacentes em função das estimativas da duração, do custo e das incertezas aleatórias ou variabilidades da duração (alfa) e do custo (beta), e
- e) apresentar a formulação matemática genérica da técnica da estimativa conjugada para duas atividades adjacentes do projeto, porém, e apresentar os processos de implementação da técnica da estimativa conjugada para a cinemática direta, cinemática inversa e ainda para a quantificação dos riscos dos projetos.

3.1. CONCEITOS FÍSICOS DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS

De modo geral, os projetos consistem de um conjunto de atividades que devem ser executadas, conforme o diagrama de precedências, com o objetivo de completar esses projetos (GOLDRATT, 1997; WIESEMANN et al., 2010).

Essas atividades dos projetos apresentam como restrições as durações, os custos, a precedência e as fontes de incertezas aleatórias (variabilidades). Dessa forma, a técnica da estimativa conjugada apresentada nesta tese pode ser utilizada no planejamento dos projetos, com o objetivo de apoiar o desenvolvimento de cronogramas, orçamentos e da quantificação dos riscos dos projetos.

Portanto, esta seção tem como objetivo apresentar a adaptação do conceito de Trabalho da Mecânica Clássica para representar, por meio de uma formulação matemática, o Trabalho necessário para a execução de uma atividade do projeto, considerando a duração, o custo e suas incertezas aleatórias ou variabilidades.

3.1.1. CONCEITOS DE TRABALHO E ENERGIA PARA A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS

Esta tese assume uma adaptação dos conceitos de Trabalho e Energia da Mecânica Clássica para o Trabalho necessário para a execução de uma atividade do projeto.

Desta forma, pode-se fazer uma equivalência entre os componentes do Trabalho da Mecânica Clássica e o Trabalho necessário para a execução de uma atividade do projeto, conforme definido a seguir:

- a) corpo (objeto): representação de uma atividade do projeto;

- b) distância: representa a estimativa da duração de uma atividade do projeto;
- c) Força: alocação do custo estimado de uma atividade do projeto;
- d) Massa: conjunto de tarefas (densidade) que compõe uma atividade do projeto, e
- e) Aceleração: mudança da velocidade de alocação do custo estimado em uma atividade do projeto.

A partir das equivalências entre os componentes descritos acima, esta tese assume a definição de Trabalho e Energia para a execução de uma atividade do projeto, que são:

- a) Trabalho: quantidade do custo implementado em uma atividade do projeto durante sua execução, e
- b) Energia: o custo disponível para uma atividade do projeto com capacidade ou habilidade de realizar trabalho.

Assim, no contexto desta tese, o Trabalho (τ) necessário para a execução de uma atividade do projeto é obtido por meio do produto escalar entre os módulos dos vetores do custo (C) e da duração (T), e pelo cosseno do menor ângulo (θ) entre os dois vetores paralelos ($\cos\theta = 1$), conforme apresentado na Equação 3.1.

$$\tau = |\mathbf{C}| \cdot |\mathbf{T}| \cdot \cos\theta = C \cdot T \quad (3.1)$$

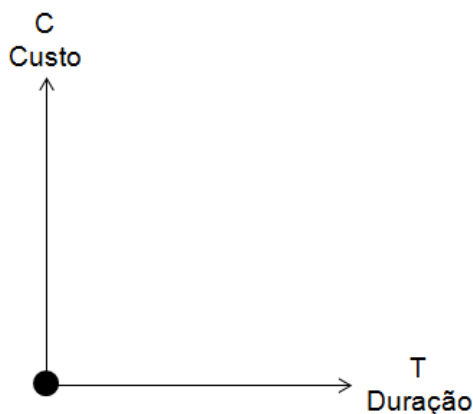
Portanto, existe uma relação inversamente proporcional entre a alocação do custo e a duração de uma atividade do projeto. Desta forma, para um dado

Trabalho a ser realizado por uma quantidade de custo a ser transferido para a execução de uma atividade do projeto, têm-se os cenários apresentados abaixo:

- a) para realizar o mesmo Trabalho em uma duração menor, é requerido uma quantidade maior do custo;
- b) para realizar o mesmo Trabalho em uma duração maior, é requerido uma quantidade menor do custo;
- c) para realizar o mesmo Trabalho em um custo menor, é requerido uma quantidade maior da duração, e
- d) para realizar o mesmo Trabalho em um custo maior, é requerido uma quantidade menor da duração.

O Trabalho para a execução de uma atividade do projeto pode ser representado por meio de um sistema de coordenadas bidimensional, em que o campo de atuação do Trabalho é delimitado pela duração (abscissa) e o custo (ordenada), conforme apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1. Sistemas de coordenadas do Trabalho: duração e custo.



Fonte: Produção do autor (2015).

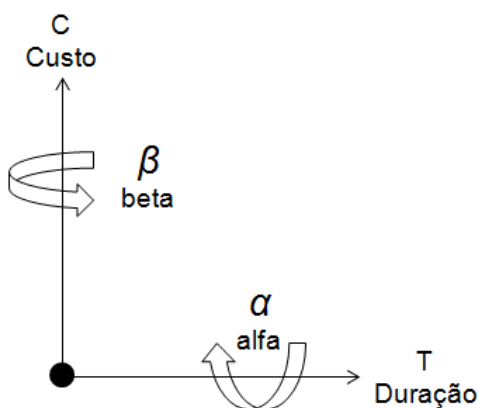
Como os projetos são empreendimentos repletos de incertezas por causa da imprevisibilidade inerente à natureza dos projetos, esta tese assume que os projetos devem ser comparados aos sistemas mecânicos não conservativos ou dissipativos.

Assim, o Trabalho (τ) necessário para a execução de uma atividade do projeto sofre influências das incertezas do tipo aleatórias ou das variabilidades das estimativas da duração (alfa) do custo (beta), conforme relatado a seguir:

- a) a incerteza aleatória ou variabilidade da estimativa da duração é representada por meio do ângulo alfa, que significa a rotação do eixo da coordenada da duração (abscissa), e
- b) a incerteza aleatória ou variabilidade da estimativa do custo é representada por meio do ângulo beta, que significa a rotação do eixo da coordenada do custo (ordenada).

A Figura 3.2 ilustra o sistema de coordenadas do Trabalho necessário para a execução de uma atividade do projeto, considerando as incertezas aleatórias ou variabilidades da duração (alfa) e do custo (beta).

Figura 3.2. Sistemas de coordenadas do Trabalho considerando as incertezas aleatórias ou variabilidades da duração (alfa) e do custo (beta).



Fonte: Produção do autor (2015).

Assim, a equação do Trabalho (τ) necessário para a execução de uma atividade do projeto pode ser reescrita de forma a considerar as incertezas aleatórias ou variabilidades das estimativas da duração (alfa) e do custo (beta), em que valem os destaques:

- a) a duração de uma atividade do projeto depende da incerteza aleatória ou da variabilidade do custo (beta) por meio da relação dos cossenos diretores;
- b) o custo de uma atividade do projeto depende da incerteza aleatória ou da variabilidade da duração (alfa) por meio da relação dos cossenos diretores, e
- c) o cosseno do menor ângulo (teta) entre os módulos dos vetores da duração e do custo é unitário ($\cos\theta = 1$).

Desta forma, o Trabalho (τ) necessário para a execução de uma atividade do projeto está em função do produto entre o cosseno diretor do custo (C) em relação à incerteza aleatória ou da variabilidade da duração (alfa), e o cosseno diretor da duração (T) em relação à incerteza aleatória ou da variabilidade do custo (beta), conforme apresentado na Equação 3.2.

$$\begin{aligned}\tau &= [C.(\cos \alpha)].[T.(\cos \beta)].\cos \theta \\ \tau &= [C.(\cos \alpha)].[T.(\cos \beta)]\end{aligned}\tag{3.2}$$

A partir da Equação 3.2, pode-se constatar que o Trabalho (τ) necessário para a execução de uma atividade do projeto, sofre influências das incertezas do tipo aleatórias ou das variabilidades das estimativas da duração (alfa) e do custo (beta), e ainda que:

- a) a duração de uma atividade do projeto sofre influência da incerteza aleatória ou da variabilidade do custo (beta), e
- b) o custo de uma atividade do projeto sofre influência da incerteza aleatória ou da variabilidade da duração (alfa).

Entretanto, a Equação 3.2 proporciona uma relação de Trabalho (τ) envolvendo os módulos das estimativas da duração e do custo bem como suas incertezas aleatórias ou variabilidades (alfa e beta) apenas para uma atividade do projeto.

Portanto, esta tese concentrou-se no desenvolvimento de uma formulação matemática para descrever o Trabalho (τ) envolvendo os módulos das estimativas da duração e do custo bem como suas incertezas aleatórias ou variabilidades (alfa e beta) entre duas atividades do projeto.

Esta formulação matemática mais adequada para ser aplicada nos projetos, nomeada de técnica da estimativa conjugada, permite percorrer todas as atividades do projeto, de maneira recursiva considerando as durações, os custos, bem como suas incertezas aleatórias ou variabilidades.

O desenvolvimento da técnica da estimativa conjugada está fundamentado no conceito de Trabalho dos projetos exposto anteriormente nesta seção, e foi viabilizado por meio dos conceitos matemáticos da descrição espacial dos manipuladores robóticos, que é descrito no próximo capítulo.

3.2. OBJETIVOS DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS

O desenvolvimento da técnica da estimativa conjugada dos projetos foi orientado para o atingimento dos dois conjuntos de objetivos descritos a seguir nesta seção.

A solução para o primeiro conjunto de objetivos foi fundamentada no conceito do Trabalho da Mecânica Clássica, em que o conceito do Trabalho do projeto assumiu a substituição da distância pela duração e da Força pelo custo.

Ainda nos conceitos da Mecânica Clássica, para esta tese, os projetos são equivalentes aos sistemas mecânicos não conservativos ou dissipativos, pois as incertezas aleatórias ou variabilidades das durações e dos custos dos projetos são consideradas como Forças externas que interferem nos objetivos do projeto (cronograma e orçamento).

A seguir, apresenta-se o primeiro conjunto de objetivos considerados no desenvolvimento da técnica da estimativa dos projetos:

- a) apresentar uma formulação matemática em que o Trabalho (τ) necessário para a execução de uma atividade do projeto, esteja em função da duração, do custo e de suas incertezas aleatórias ou variabilidades;
- b) o componente resultante ou a duração modelada está em função da estimativa da duração e da incerteza aleatória ou variabilidade do custo (β), e
- c) o componente resultante ou o custo modelado está em função da estimativa do custo e da incerteza aleatória ou variabilidade da duração (α).

A solução para o segundo conjunto de objetivos foi fundamentada no conceito da cinemática dos manipuladores robóticos apresentado no Anexo B, onde, assume-se que o diagrama de precedências do projeto é representado em um sistema de coordenadas bidimensional (duração e custo), de forma semelhante a uma cadeia cinemática aberta (série), paralela (fechada) e/ou híbrida.

Ainda nos conceitos da cadeia cinemática de manipuladores robóticos, as precedências do projeto são equivalentes aos elos do manipulador e as atividades do projeto são equivalentes às juntas do manipulador, que por causa de sua aplicabilidade, esta tese considerou apenas a junta do tipo revoluta.

A seguir, apresenta-se o segundo conjunto de objetivos considerados no desenvolvimento da técnica da estimativa dos projetos:

- a) apresentar uma formulação matemática em que a execução do Trabalho (τ) do projeto esteja em função da duração, do custo e de suas incertezas aleatórias ou variabilidades para as atividades adjacentes do projeto;
- b) o conceito de atividades adjacentes do projeto, permite que o diagrama de precedência esteja na configuração da cadeia cinemática aberta (série), ou fechada (paralela) e/ou híbrida;
- c) o conceito de atividades adjacentes do projeto, requer que exista precedência entre eles;
- d) cada atividade do projeto é representado em um sistema de coordenadas bidimensional (duração e custo);
- e) a partir de dois sistemas de coordenadas adjacentes, a transladação é representada pela distância entre as origens dos sistemas de coordenadas;
- f) a partir de dois sistemas de coordenadas adjacentes, a incerteza aleatória ou variabilidade da duração (alfa) é representada por meio da rotação do eixo da abscissa de um sistema de coordenadas em relação ao outro sistema de coordenadas, e
- g) a partir de dois sistemas de coordenadas adjacentes, a incerteza aleatória ou variabilidade do custo (beta) é representada por meio da

rotação do eixo da ordenada de um sistema de coordenadas em relação ao outro sistema de coordenadas.

3.3. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS

A técnica da estimativa conjugada trata do estudo analítico da geometria do movimento das atividades do projeto presentes no diagrama de precedências e referenciados em um sistema de coordenadas bidimensional (duração e custo).

Porém, a técnica da estimativa conjugada não trata das causas ou motivações que proporcionam tais movimentos das atividades do projeto, presentes no diagrama de precedências e referenciado em um sistema de coordenadas bidimensional (duração e custo).

Assim, esse diagrama de precedências referenciado em um sistema de coordenadas bidimensional (duração e custo) pode ser considerado como uma cadeia cinemática (aberta, fechada ou híbrida), que é formada por um conjunto de elos conectados por juntas (CRITCHLOW, 1985; RICHARD, 1982), sendo que esta cadeia cinemática possui uma extremidade fixa e a outra livre (FU et al., 1987; CRAIG, 2004).

Os tópicos a seguir, apresentam a descrição das equivalências entre os componentes da cadeia cinemática e do diagrama de precedências referenciado de um projeto:

- a) a extremidade fixa da cadeia cinemática é equivalente à atividade que representa o início do projeto;
- b) a extremidade livre da cadeia cinemática é equivalente à atividade que representa o fim ou o término do projeto;

- c) os elos da cadeia cinemática são equivalentes às precedências entre as atividades do projeto, e
- d) as juntas do tipo revoluta da cadeia cinemática são equivalentes às atividades do projeto.

A técnica da estimativa conjugada, que pode ser aplicada no planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos, utiliza o conceito da matriz (4x4) de transformação homogênea básica, para descrever o relacionamento espacial entre duas atividades adjacentes do diagrama de precedências do projeto, ou seja, necessariamente deve existir precedência entre essas duas atividades.

Cada atividade do projeto é considerada como um processo que possui um conjunto de atributos representados por:

- a) parâmetros: estimativa da duração (T), estimativa do custo (C) e o fator crítico (f);
- b) variabilidades (incertezas aleatórias): duração (ângulo alfa) e custo (ângulo beta), e
- c) variáveis: duração modelada ou executada (t) e custo modelado ou executado (c).

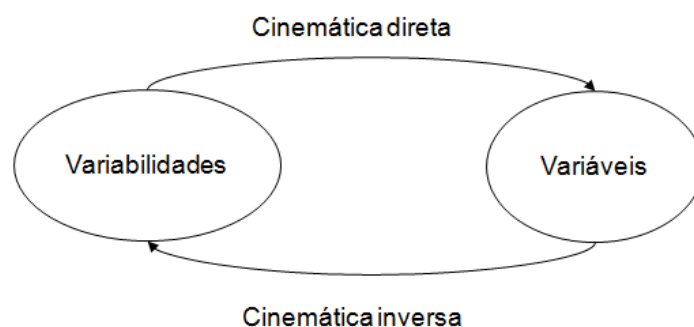
Similar aos conceitos da cinemática dos manipuladores robóticos, a técnica da estimativa conjugada pode ser aplicada por meio da cinemática direta ou da cinemática inversa quando são conhecidos os parâmetros (estimativa da duração, estimativa do custo e o fator crítico).

Na cinemática direta, a partir das variabilidades da atividade do projeto, aplicando a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, as variáveis são modeladas, ou seja, a duração e o custo são modelados para essa atividade do projeto.

Enquanto que na cinemática inversa, a partir das variáveis da atividade do projeto, aplicando a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, as variabilidades são modeladas, ou seja, as incertezas aleatórias da duração e do custo são modeladas para essa atividade do projeto.

A Figura 3.3 ilustra a dinâmica da cinemática direta e inversa da técnica da estimativa conjugada.

Figura 3.3. Dinâmica da cinemática direta e inversa da técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

Existem muitas linguagens e métodos para descrever os processos, sendo que para os casos de gerenciamento dos projetos, as linguagens e os métodos mais comuns são conhecidos por diagramas de blocos e fluxogramas (CHIN et al., 2006).

Porém, esses métodos são informais, insuficientes e inadequados quando o processo é complexo e exige uma abordagem mais completa (KHOO et al., 1998;) (CHIN et al., 2006), como é o caso do conjunto dos atributos das atividades dos projetos descritas na técnica da estimativa conjugada.

Assim, o diagrama de precedências referenciado em um sistema de coordenadas bidimensional (duração e custo) do projeto é representado por meio do método de modelagem funcional IDEF0 (OSULLIVAN, 1991; CIURANA et al., 2008), que é um método para modelar decisões, ações e atividades de um organização ou sistema (CHO; LEE, 1999; QIN et al., 2004).

O elemento básico do IDEF0 é um retângulo usado para definir cada atividade do projeto, seguido por quatro setas ao redor do retângulo, que são:

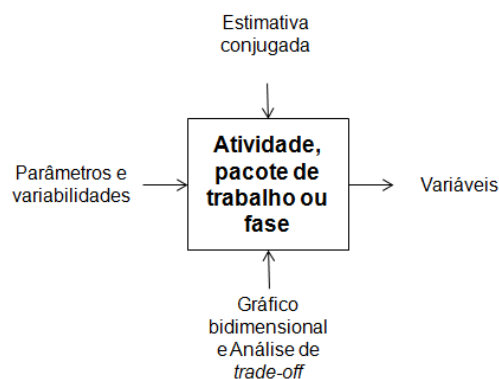
- a) entradas: os parâmetros e as variabilidades para o caso da cinemática direta, e os parâmetros e as variáveis para o caso da cinemática inversa;
- b) controles: formulação matemática da técnica da estimativa conjugada;
- c) mecanismos: gráfico bidimensional (tempo e custo) e análise de *trade-off* entre o tempo e custo, e
- d) saídas: as variáveis para o caso da cinemática direta, e as variabilidades para o caso da cinemática inversa.

A Figura 3.4 ilustra o caso do modelo da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada para uma atividade do projeto, em que:

- a) as entradas são os parâmetros e as variabilidades, que podem ser estimadas ou aproveitadas de projetos anteriores com contexto e escopo similares;
- b) o controle é a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada;

- c) os mecanismos utilizados são representados por meio do gráfico bidimensional (tempo e custo) e da análise de *trade-off* entre o tempo e custo, e
- d) as saídas são as variáveis da duração e do custo modeladas.

Figura 3.4. Cinemática direta da técnica da estimativa conjugada com a linguagem IDEF0.



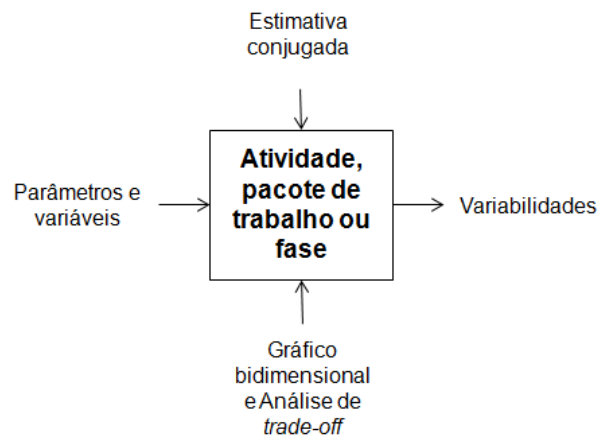
Fonte: Produção do autor (2015).

A Figura 3.5 ilustra o caso do modelo da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada para uma atividade do projeto, em que:

- a) as entradas são os parâmetros e as variáveis, que podem ser estimadas ou aproveitadas de projetos anteriores com contexto e escopo similares;
- b) o controle é a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada;
- c) os mecanismos utilizados são representados por meio do gráfico bidimensional (tempo e custo) e da análise de *trade-off* entre o tempo e custo, e

d) as saídas são as variabilidades modeladas da duração e do custo.

Figura 3.5. Cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada com a linguagem IDEF0.



Fonte: Produção do autor (2015).

3.4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS

A formulação matemática da técnica da estimativa conjugada foi desenvolvida a partir:

- a) da Equação 3.2, que descreve o Trabalho (τ) necessário para a execução de uma atividade do projeto em função das estimativas da duração, do custo e das variabilidades (incertezas aleatórias) da duração (α) e do custo (β), e
- b) dos conceitos da descrição geométrica da cinemática dos manipuladores robóticos por meio da matriz (4x4) de transformação homogênea básica apresentada no Anexo B.

O desenvolvimento foi orientado pelos dois conjuntos de objetivos descritos na seção 3.2, a fim de apresentar uma formulação matemática que proporcione a descrição do Trabalho (τ) entre duas atividades adjacentes do projeto, em função das estimativas da duração, do custo e das incertezas aleatórias ou variabilidades da duração (alfa) e do custo (beta).

Portanto, esta seção tem como objetivo tratar dos assuntos a seguir:

- a) apresentação de um exemplo de diagrama de precedências com duas atividades, a fim de proporcionar o entendimento do desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada;
- b) a partir da matriz (4x4) de transformação homogênea básica, utilizando o exemplo de diagrama de precedências com duas atividades, é desenvolvida a matriz (4x4) de transformação homogênea básica para a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, e
- c) levando em consideração o fator crítico do projeto, são desenvolvidas as formulações matemáticas para a duração, o custo e para o Trabalho necessário para a execução de duas atividades, em função da duração, do custo, de suas incertezas aleatórias e seus fatores críticos.

3.4.1. INTRODUÇÃO DA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

No desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, para facilitar o entendimento, é considerado um diagrama de precedências referenciado no sistema de coordenadas bidimensional com

apenas duas atividades, porém, poderiam ser dois pacotes de trabalho ou duas fases do projeto, vale a ressalva de que as atividades devem ser adjacentes.

A Figura 3.6 apresenta o diagrama de precedências do projeto utilizado para ilustrar o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, em que:

- a) atividade (A0) que apresenta as estimativas da duração (T_0) e do custo (C_0), o fator crítico (f_0), as variabilidades da duração ($\cos\alpha_0$) e do custo ($\cos\beta_0$), a duração modelada (t_0) e o custo modelado (c_0);
- b) atividade (A1) que apresenta as estimativas da duração (T_1) e do custo (C_1), o fator crítico (f_1), as variabilidades da duração ($\cos\alpha_1$) e do custo ($\cos\beta_1$), a duração modelada (t_1) e o custo modelado (c_1), e
- c) o gráfico bidimensional e a análise de *trade-off* são utilizadas como ferramentas de gerenciamento do tempo, custo e dos riscos dos projetos.

Figura 3.6. Diagrama de precedências utilizado como exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.

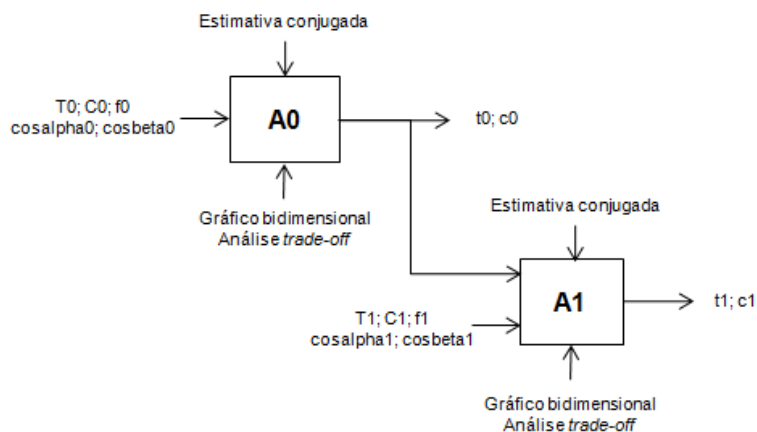


Fonte: Produção do autor (2015).

O diagrama de precedências utilizado como exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada dos projetos pode ser representado com a nomenclatura dos componentes da cinemática

direta da estimativa conjugada com a linguagem do IDEF0, conforme ilustrado na Figura 3.7.

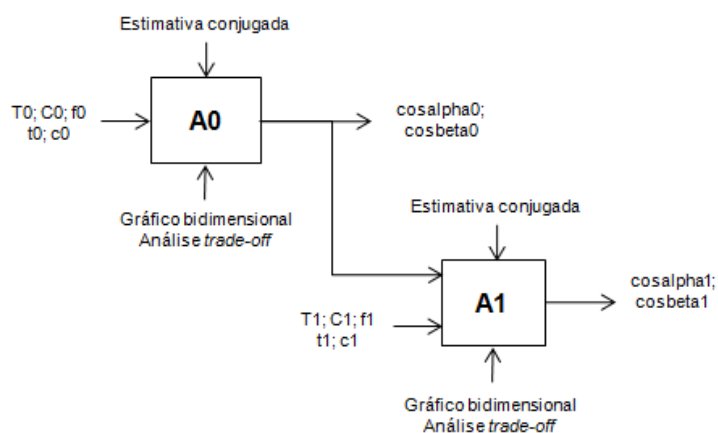
Figura 3.7. Diagrama de precedências representado com os componentes da cinemática direta da estimativa conjugada com o IDEF0.



Fonte: Produção do autor (2015).

E ainda, o diagrama de precedências utilizado como exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada dos projetos, também pode ser representado com a nomenclatura dos componentes da cinemática inversa da estimativa conjugada com a linguagem do IDEF0, conforme ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8. Diagrama de precedências representado com os componentes da cinemática inversa da estimativa conjugada com o IDEF0.



Fonte: Produção do autor (2015).

A utilização dos mecanismos representados pelo gráfico bidimensional (tempo e custo) e pela análise de *trade-off* do tempo e do custo das atividades adjacentes, é apresentada após o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.

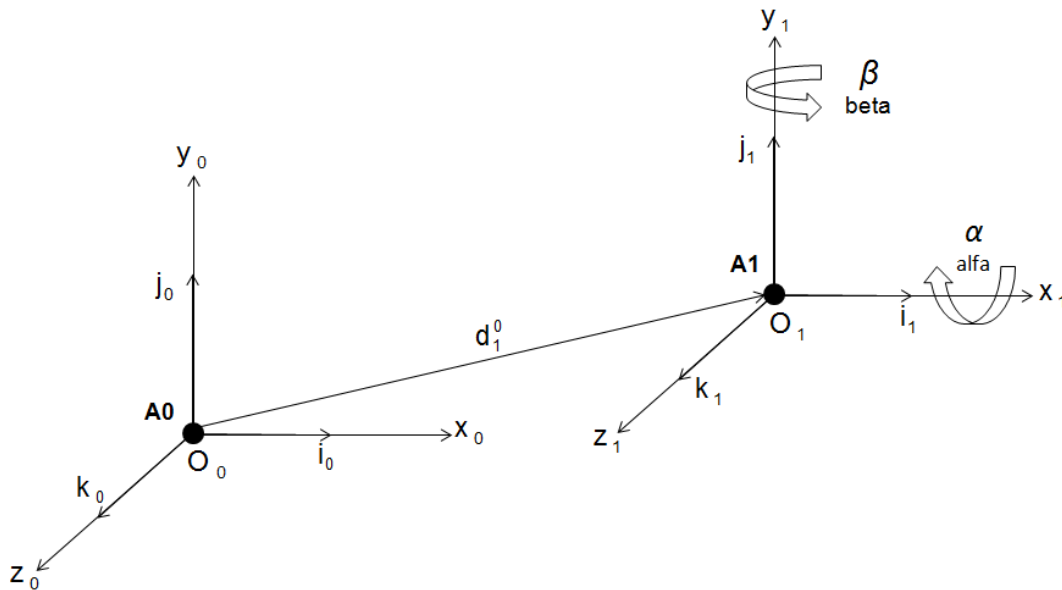
3.4.2. DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ (4X4) DE TRANSFORMAÇÃO HOMOGÊNEA BÁSICA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

O desenvolvimento da matriz (4x4) de transformação homogênea básica da técnica da estimativa conjugada ocorre a partir da análise do diagrama de precedências utilizado como exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada dos projetos, em que existem dois sistemas de coordenadas, sendo um para cada atividade do projeto em questão, sendo o:

- a) sistema de coordenadas de referência ou fixo ($O_0x_0y_0z_0$ com os vetores unitários i_0, j_0, k_0), em que a atividade (A0) encontra-se na origem deste sistema de coordenadas, e
- b) sistema de coordenadas móvel ($O_1x_1y_1z_1$ com os vetores unitários i_1, j_1, k_1), em que a atividade (A1) encontra-se na origem deste sistema de coordenadas.

A Figura 3.9, ilustra os sistemas de coordenadas para as duas atividades adjacentes pertencentes ao diagrama de precedências utilizado como exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada dos projetos.

Figura 3.9. Sistemas de coordenadas das atividades do exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

De forma resumida, o esforço é desenvolver uma formulação matemática para representar a atividade (A1) no sistema de coordenadas fixo, sendo que a atividade (A1):

- está referenciada no sistema de coordenadas móvel ($O_1x_1y_1z_1$ com os vetores unitários i_1, j_1, k_1);
- em que, a origem deste sistema de coordenadas móvel está transladado do vetor (d_1^0) do sistema de coordenadas fixo ($O_0x_0y_0z_0$ com os vetores unitários i_0, j_0, k_0), e
- este sistema de coordenadas móvel sofre as rotações proporcionadas pela incerteza aleatória ou variabilidade da duração (ângulo alfa) e da incerteza aleatória ou variabilidade do custo (ângulo beta).

Dessa forma, a partir da matriz (4x4) de transformação homogênea básica descrita no Anexo B, inicia-se o processo de desenvolvimento da matriz (4x4) de transformação homogênea da técnica da estimativa conjugada.

Ainda vale uma ressalva, pois, como a atividade (A0) encontra-se na origem do sistema de coordenadas de referência ou fixo, as estimativas da duração (T0) e o custo (C0), bem como as variabilidades da duração (cosalfa0) e do custo (cosbeta0), são consideradas como nulas. Então, para o desenvolvimento da matriz (4x4) de transformação homogênea da técnica da estimativa conjugada, deve-se seguir os próximos passos, que são:

- a) como primeiro passo, deve-se substituir a incerteza aleatória ou variabilidade da duração (cosalfa1) da atividade (A1) no eixo da abscissa do sistema de coordenadas na matriz de transformação homogênea básica, bem como, preencher a submatriz do vetor posição com elementos nulos. Vale a ressalva de que, os componentes da submatriz de transformação de perspectiva são nulos e o fator de escala é unitário. A Equação 3.3 ilustra o primeiro passo:

$$H_{x0,\alpha1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha1 & -\text{sen}\alpha1 & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha1 & \cos\alpha1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.3)$$

- b) como segundo passo, deve-se substituir os parâmetros da atividade (A1), sendo a estimativa da duração (T1) e estimativa do custo (C1), na matriz de transformação homogênea básica, respectivamente nos elementos (d_1^0x) e (d_1^0y) e o elemento da coordenada da cota (d_1^0z) deve ser preenchido com zero, bem como a incerteza aleatória ou variabilidade também deve ser preenchido com zero. Vale a ressalva de que, os componentes da submatriz de transformação de

perspectivas são nulos e o fator de escala é unitário. A Equação 3.4 ilustra o segundo passo:

$$H_{x_0, T1; y_0, C1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & T1 \\ 0 & 1 & 0 & C1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

c) como terceiro passo, deve-se realizar o produto matricial entre as matrizes das Equações 3.3 e 3.4, a Equação 3.5 ilustra o terceiro passo:

$$H_{x_0, \alpha1} \cdot H_{x_0, T1; y_0, C1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha1 & -\text{sen} \alpha1 & 0 \\ 0 & \text{sen} \alpha1 & \cos \alpha1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & T1 \\ 0 & 1 & 0 & C1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

$$H_{x_0, \alpha1} \cdot H_{x_0, T1; y_0, C1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & T1 \\ 0 & \cos \alpha1 & -\text{sen} \alpha1 & C1 \cdot \cos \alpha1 \\ 0 & \text{sen} \alpha1 & \cos \alpha1 & C1 \cdot \text{sen} \alpha1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

d) como quarto passo, deve-se substituir a incerteza aleatória ou variabilidade do custo ($\cos \beta1$) da atividade (A1) no eixo da ordenada do sistema de coordenadas na matriz de transformação homogênea básica, bem como, preencher a submatriz do vetor posição com elementos nulos. Vale a ressalva de que, os componentes da submatriz de transformação de perspectiva são nulos e o fator de escala é unitário. A Equação 3.6 ilustra o quarto passo:

$$H_{y_0, \beta1} = \begin{vmatrix} \cos \beta1 & 0 & \text{sen} \beta1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen} \beta1 & 0 & \cos \beta1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.6)$$

e) como quinto passo, deve-se realizar o produto matricial entre as matrizes das Equações 3.6 e 3.4, a Equação 3.7 ilustra o quinto passo:

$$H_{y_0, \beta_1} \cdot H_{x_0, T_1; y_0, C_1} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} \cos \beta_1 & 0 & \text{sen} \beta_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & T_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & C_1 \\ -\text{sen} \beta_1 & 0 & \cos \beta_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (3.7)$$

$$H_{y_0, \beta_1} \cdot H_{x_0, T_1; y_0, C_1} = \left[\begin{array}{cccc} \cos \beta_1 & 0 & \text{sen} \beta_1 & T_1 \cdot \cos \beta_1 \\ 0 & 1 & 0 & C_1 \\ -\text{sen} \beta_1 & 0 & \cos \beta_1 & -T_1 \cdot \text{sen} \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

f) como sexto passo, deve-se realizar a soma entre as matrizes das Equações 3.5 e 3.7, a Equação 3.8 ilustra o sexto passo:

$$H_1^0 = H_{x_0, \alpha_1} \cdot H_{x_0, T_1; y_0, C_1} + H_{y_0, \beta_1} \cdot H_{x_0, T_1; y_0, C_1} \quad (3.8)$$

$$H_1^0 = \left[\begin{array}{cccc} 1 + \cos \beta_1 & 0 & \text{sen} \beta_1 & T_1 + T_1 \cos \beta_1 \\ 0 & \cos \alpha_1 + 1 & -\text{sen} \alpha_1 & C_1 \cos \alpha_1 + C_1 \\ -\text{sen} \beta_1 & \text{sen} \alpha_1 & \cos \alpha_1 + \cos \beta_1 & C_1 \text{sen} \alpha_1 - T_1 \text{sen} \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{array} \right]$$

Portanto, a Equação 3.8 representa a matriz (4x4) de transformação homogênea básica da técnica da estimativa conjugada dos projetos, entretanto, ainda falta determinar a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, que é apresentada na próxima seção deste capítulo.

3.4.3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA DURAÇÃO E DO CUSTO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

A Equação 3.8 representa a matriz (4x4) de transformação homogênea básica da técnica da estimativa conjugada dos projetos, analisando a Equação 3.8,

dado que atividade (A1) representada no sistema de coordenadas móvel, esta tese possui como interesse a projeção da atividade (A1) no sistema de coordenadas de referência ou fixo.

Essa projeção geométrica da atividade (A1) é observada na submatriz superior direita $P(4 \times 1)$ formada por quatro elementos, mas, ainda falta uma operação com a Equação 3.8, pois, em alguns casos de projetos as influências das incertezas aleatórias ou variabilidades proporcionarão durações e custos modelados maiores do que o dobro dos valores estimados.

Frequentemente, os grandes atrasos e não cumprimento nos orçamentos são consequências de projetos com alto grau de inovação, que envolvem o desenvolvimento e domínio de tecnologias disruptivas. Porém, as causas também podem ser endereçadas a influências internas e externas, por exemplo, novas legislações, regras de mercados, capacitação dos colaboradores, entre outras.

Dessa forma, existe a necessidade de adequar a matriz (4×4) de transformação homogênea básica da técnica da estimativa conjugada para o caso dos projetos que requerem que a duração e o custo sejam maiores que os valores estimados. A Equação 3.9 ilustra a matriz (4×1) que representa o fator crítico (f) que pertence aos parâmetros do projeto.

$$f_1^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

E, realizando o produto entre as matrizes das Equações 3.8 e 3.9, então a Equação 3.10 ilustra a matriz que representa a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada dos projetos.

$$H_1^0, f_1^0 = \begin{bmatrix} 1 + \cos \beta_1 & 0 & \text{sen} \beta_1 & T_1 + T_1 \cos \beta_1 \\ 0 & \cos \alpha_1 + 1 & -\text{sen} \alpha_1 & C_1 \cos \alpha_1 + C_1 \\ -\text{sen} \beta_1 & \text{sen} \alpha_1 & \cos \alpha_1 + \cos \beta_1 & C_1 \text{sen} \alpha_1 - T_1 \text{sen} \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$H_1^0, f_1^0 = \begin{bmatrix} f(T_1 + T_1 \cos \beta_1) \\ f(C_1 \cos \alpha_1 + C_1) \\ f(C_1 \text{sen} \alpha_1 - T_1 \text{sen} \beta_1) \\ 2f \end{bmatrix}$$

Analisando a matriz da Equação 3.10 mediante o sistema de coordenadas de referência ou fixo, constata-se que esta matriz é composta por quatro elementos, sendo que:

- a) o primeiro elemento representa a projeção geométrica no eixo da abscissa;
- b) o segundo elemento representa a projeção geométrica no eixo da ordenada;
- c) o terceiro elemento representa a projeção geométrica no eixo da cota, e
- d) o quarto elemento representa a escala no sistema de coordenadas homogêneas adotado.

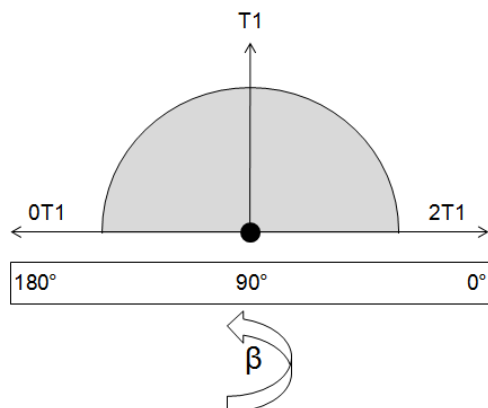
Para o contexto desta tese, apenas os dois primeiros elementos são considerados, pois, a técnica da estimativa conjugada utiliza um sistema de coordenadas bidimensional (abscissa e ordenada). A Equação 3.11 apresenta a formulação matemática para a atividade (A1), envolvendo a duração modelada ou executada (t1), a duração estimada (T1), a incerteza aleatória ou variabilidade do custo (cosbeta1) e o fator crítico da duração (ft1).

$$\begin{aligned}
 t_1 &= ft_1 \cdot (T_1 + T_1 \cdot \cos \beta_1) \\
 t_1 &= T_1 \cdot ft_1 \cdot (\cos \beta_1 + 1)
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

A Figura 3.10 ilustra o universo de valores da Equação 3.11, quando o fator crítico da duração da atividade (A1) for unitário, em que:

- a) para variabilidade do custo igual a 1 ($\cos \beta = 0^\circ$), com o fator crítico da duração unitário ($ft_1 = 1$), então a duração modelada ou executada é igual ao dobro da duração estimada ($t_1 = 2T_1$);
- b) para variabilidade do custo igual a 0 ($\cos \beta = 90^\circ$), com o fator crítico da duração unitário ($ft_1 = 1$), então a duração modelada ou executada é igual a duração estimada ($t_1 = T_1$), e
- c) para variabilidade do custo igual a -1 ($\cos \beta = 180^\circ$), com o fator crítico da duração unitário ($ft_1 = 1$), então a duração modelada ou executada é nula ($t_1 = 0$).

Figura 3.10. Universo de valores da formulação matemática da duração da técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

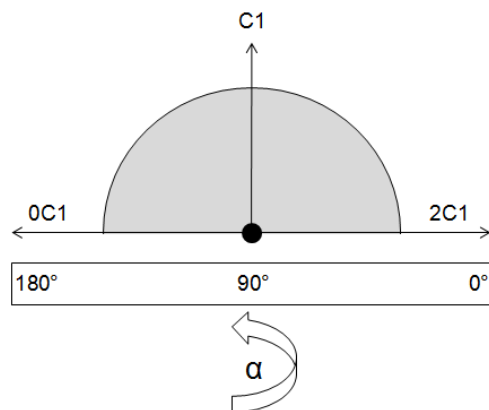
A Equação 3.12 apresenta a formulação matemática para a atividade (A1), com o custo modelado ou executado (c_1), o custo estimado (C_1), a incerteza aleatória ou variabilidade da duração ($\cos\alpha_1$) e o fator crítico do custo (fc_1).

$$\begin{aligned} c_1 &= fc_1.(C_1.\cos\alpha_1 + C_1) \\ c_1 &= C_1.fc_1.(\cos\alpha_1 + 1) \end{aligned} \quad (3.12)$$

A Figura 3.11 ilustra o universo de valores da Equação 3.12, quando o fator crítico do custo da atividade (A1) for unitário, em que:

- para variabilidade da duração igual a 1 ($\cos\alpha = 0^\circ$), com o fator crítico do custo unitário ($fc_1 = 1$), então o custo modelado ou executado é igual ao dobro do custo estimado ($c_1 = 2C_1$);
- para variabilidade da duração igual a 0 ($\cos\alpha = 90^\circ$), com o fator crítico do custo unitário ($fc_1 = 1$), então o custo modelado ou executado é igual ao custo estimado ($c_1 = C_1$), e
- para variabilidade da duração igual a -1 ($\cos\alpha = 180^\circ$), com o fator crítico do custo unitário ($fc_1 = 1$), então o custo modelado ou executado é nulo ($c_1 = 0$).

Figura 3.11. Universo de valores da formulação matemática do custo da técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

E por fim, a Equação 3.13 apresenta a formulação matemática para o Trabalho (τ) entre as atividades (A0 e A1) do projeto, em função das estimativas da duração, do custo e das incertezas aleatórias ou variabilidades da duração (alfa) e do custo (beta), bem como dos fatores críticos da duração e do custo do projeto.

$$\tau_1^0 = [T1.ft1.(cos\beta1+1)].[C1.fc1.(cos\alpha1+1)] \quad (3.13)$$

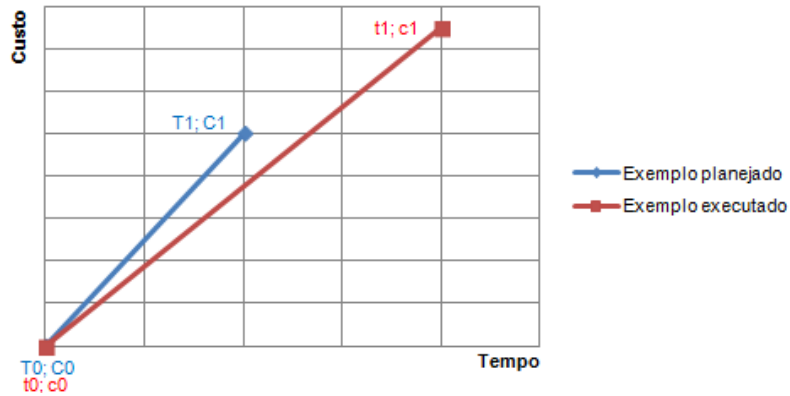
3.4.4. ANÁLISES DO GRÁFICO BIDIMENSIONAL E *TRADE-OFF* DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Na análise do gráfico bidimensional, cada atividade do projeto é representada espacialmente por um ponto no sistema de coordenadas bidimensional tempo e custo (tempo na abscissa e custo na ordenada).

Dessa maneira, o diagrama de precedências do projeto é representado espacialmente no gráfico bidimensional de forma similar a uma cadeia cinemática dos manipuladores robóticos, em que, no exemplo utilizado neste capítulo, a atividade A0 está fixa na origem do sistema de coordenadas de referência do gráfico bidimensional (tempo e custo), e a atividade A1, que está transladada por meio da necessidade da precedência, é móvel e também está representada em função do sistema de coordenadas de referência do gráfico bidimensional.

A Figura 3.12 apresenta o gráfico bidimensional planejado e executado para o exemplo utilizado no desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.

Figura 3.12. Gráfico bidimensional do exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

Enquanto que, na análise de *trade-off* entre o tempo e o custo é empregada a Equação 3.13 utilizada para descrever o Trabalho (τ) entre as atividades (A0 e A1) do projeto. Assim, a construção do gráfico da análise de *trade-off* requer que:

- a) a partir o valor modelado para Trabalho (τ) necessário para executar a atividade A1, deve-se determinar os valores extremos da curva de *trade-off* do projeto;
- b) assumindo que a variabilidade da duração seja nula ($\cos\alpha_1 = 0$), calcula-se a variabilidade do custo ($\cos\beta_1$), conforme Equação 3.14;

$$\cos\beta_1 \cong \frac{\tau_1^0}{(T1.ft1).(C1.fc1)} - 1 \quad (3.14)$$

- c) utiliza-se a variabilidade do custo ($\cos\beta_1$) para determinar o valor extremo da duração (t_1), conforme ilustrado na Equação 3.15;

$$t_1 = T1.ft1.(cos\beta_1 + 1) \quad (3.15)$$

- d) assumindo que a variabilidade do custo seja nula ($\cos\beta_1 = 0$), calcula-se a variabilidade da duração ($\cos\alpha_1$), conforme Equação 3.16, e

$$\cos\alpha_1 \cong \frac{\tau_1^0}{(T_1.ft_1).(C_1.fc_1)} - 1 \quad (3.16)$$

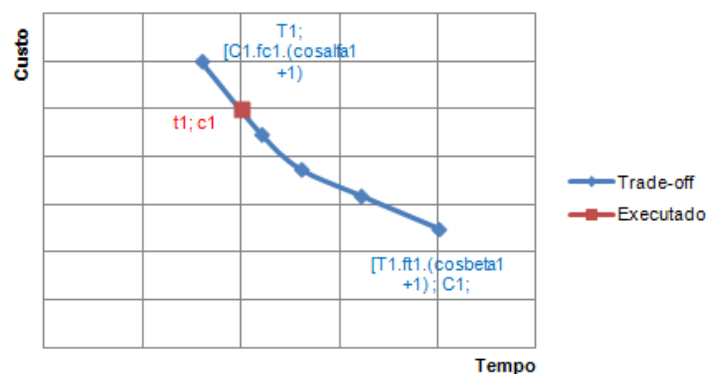
- e) utiliza-se a variabilidade da duração ($\cos\alpha_1$) para determinar o valor extremo do custo (c_1), conforme ilustrado na Equação 3.17.

$$c_1 = C_1.fc_1.(cos\alpha_1 + 1) \quad (3.17)$$

A Figura 3.13 apresenta o gráfico da análise de *trade-off* para o exemplo utilizado no desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, para:

- trade-off* do projeto com as atividades A1 e A0 do projeto, e
- ponto executado da atividade A1 do projeto.

Figura 3.13. Gráfico da análise de *trade-off* do exemplo para o desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

3.5. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA GENÉRICA E PROCESSOS DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS

O desenvolvimento da técnica da estimativa conjugada dos projetos foi apresentado em um exemplo de projeto cujo diagrama de precedências possuía duas atividades sequenciais com um tipo de duração e um tipo de custo.

A questão da existência da precedência entre as atividades foi uma condição necessária para a aplicação do conceito da matriz (4x4) de transformação homogênea básica no desenvolvimento da formulação matemática do Trabalho (τ) da técnica da estimativa conjugada dos projetos.

Entretanto, a técnica da estimativa conjugada pode ser aplicada no planejamento de projetos que apresentem mais de um tipo de duração, mais de um tipo de custo, bem como estejam representados por diagramas de precedências nas configurações cinemáticas de cadeia aberta (série), cadeia fechada (paralela) e híbrida (série e paralela).

Assim, esta seção trata dos assuntos:

- a) apresentar a formulação matemática genérica da técnica da estimativa conjugada para duas atividades adjacentes do projeto com o objetivo de ilustrar a possibilidade de aplicação em projetos com mais de um tipo de duração e com mais de um tipo de custo, e
- b) apresentar os processos de implementação da técnica da estimativa conjugada para a cinemática direta, cinemática inversa e ainda para a quantificação dos riscos dos projetos.

3.5.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA GENÉRICA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

A representação da matriz (4x4) de transformação homogênea básica da técnica da estimativa conjugada dos projetos é expressa por meio da forma genérica apresentada na Equação 3.18.

$$A_i^j = \{[H_i^j(x, \alpha_i^j) \cdot H_i^j(T_i^j; C_i^j)] + [H_i^j(y, \beta_i^j) \cdot H_i^j(T_i^j; C_i^j)]\} \cdot f_i^j \quad (3.18)$$

Sendo que:

- a) i - representa o conjunto das durações presentes nas atividades do projeto ($i = 1, 2, \dots, n$);
- b) j - representa o conjunto dos custos presentes nas atividades do projeto ($j = 1, 2, \dots, m$);
- c) A_i^j - matriz de transformação homogênea básica da técnica da estimativa conjugada dos projetos;
- d) $H_i^j(x, \alpha_i^j)$ - matriz de transformação homogênea básica com rotação α_i^j no eixo da abscissa (x);
- e) $H_i^j(T_i^j; C_i^j)$ - matriz de transformação homogênea básica sem rotação representando a transladação com a duração T_i^j e o custo R_i^j ;
- f) $H_i^j(y, \beta_i^j)$ - matriz de transformação homogênea básica com rotação β_i^j no eixo da ordenada (y);
- g) T_i^j - representa a estimativa da duração da atividade;
- h) C_i^j - representa a estimativa do custo da atividade;

- i) f_i^j - representa o fator crítico da atividade, este fator é necessário para o caso da atividade ter duração e custos maiores que o dobro da estimativa;
- j) α_i^j - representa a incerteza da duração, e
- k) β_i^j - representa a incerteza do custo.

Portanto, a Equação 3.19 representa de forma genérica, a formulação matemática para a atividade do projeto envolvendo a duração modelada ou executada (t_i^j), a duração estimada (T_i^j), a incerteza aleatória ou variabilidade do custo ($\cos \beta_i^j$) e o fator crítico da duração (ft_i^j).

$$t_i^j = T_i^j . ft_i^j . (\cos \beta_i^j + 1) \quad (3.19)$$

E, a Equação 3.20 apresenta de forma genérica a formulação matemática para a atividade do projeto envolvendo o custo modelado ou executado (c_i^j), o custo estimado (C_i^j), a incerteza aleatória ou variabilidade da duração ($\cos \alpha_i^j$) e o fator crítico do custo (fc_i^j).

$$c_i^j = C_i^j . fc_i^j . (\cos \alpha_i^j + 1) \quad (3.20)$$

E por fim, o resultado modelado para o projeto, é obtido por meio da soma dos resultados individuais das durações e dos custos para cada atividade, considerando os tipos de durações e tipos de custos.

3.5.2. PROCESSOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Esta seção apresenta os processos para a implementação da técnica da estimativa conjugada para apoiar o planejamento dos cronogramas, dos orçamentos e o processo de quantificação dos riscos dos projetos.

As equações ou formulações da técnica da estimativa conjugada devem ser implementadas com base nas informações disponíveis da estrutura analítica do projeto (EAP), da árvore do produto ou do *software*, diagrama de precedências, da identificação dos riscos, da análise qualitativa dos riscos e de outros ativos proporcionados pelos processos de gerenciamento do projeto. Para ilustrar os processos de implementação da técnica da estimativa conjugada dos projetos, faz-se necessário ressaltar algumas observações:

- a) a identificação dos tipos das durações e dos custos das atividades dos projetos, deve ser parte da política organizacional;
- b) a identificação das variabilidades das durações e dos custos das atividades do cronograma do projeto, deve ser parte da política organizacional;
- c) a identificação do valor do fator crítico das atividades dos projetos, deve ser parte da política organizacional, e
- d) por fim, o diagrama de precedências do projeto pode apresentar atividades apenas na configuração da cinemática direta, ou atividades apenas na configuração da cinemática inversa, ou ainda atividades na configuração da cinemática direta e inversa.

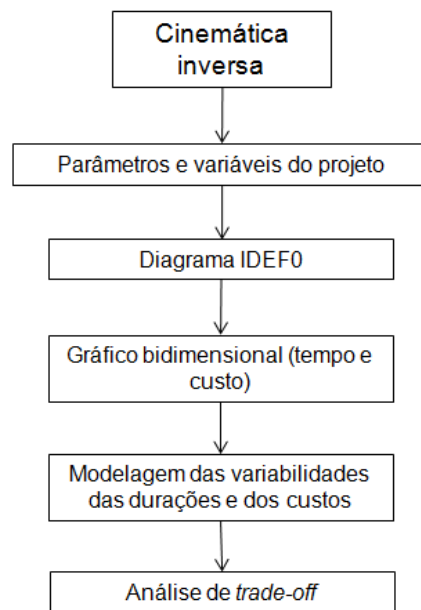
3.5.2.1. PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DA CINEMÁTICA INVERSA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Esta seção apresenta o processo para a implementação da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada para o planejamento de cronogramas e orçamentos dos projetos, conforme descrito nos passos a seguir e ilustrado na Figura 3.14:

- a) passo 1 – identificar os parâmetros (estimativas das durações e dos custos), as variáveis (durações e custos modelados ou executados), e os fatores críticos das atividades;
- b) passo 2 - determinar o diagrama IDEF0 com os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e das variáveis (modelados ou executados) das atividades do projeto com a configuração da cinemática inversa;
- c) passo 3 – apresentar o gráfico bidimensional para os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e variáveis (modeladas ou executadas) das atividades do projeto;
- d) passo 4 – por meio das equações ou formulações da técnica da estimativa conjugada, modelar as variabilidades das estimativas das durações e dos custos das atividades, e
- e) passo 5 – realizar a análise de *trade-off* entre a duração e o custo das atividades do projeto.

A Figura 3.14 ilustra os passos do processo de implementação da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada dos projetos.

Figura 3.14. Processo de implementação da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

3.5.2.2. PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DA CINEMÁTICA DIRETA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

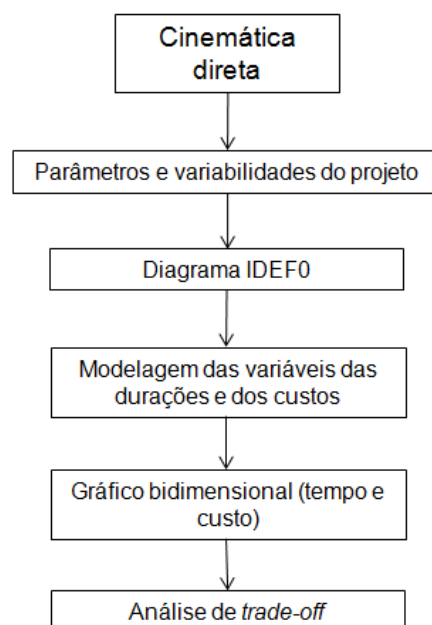
Esta seção apresenta o processo para a implementação da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada para o planejamento dos cronogramas e dos orçamentos dos projetos, conforme descrito nos passos a seguir e ilustrado na Figura 3.15:

- a) passo 1 – identificar os parâmetros (estimativas das durações e dos custos), as variabilidades das durações ($\cos\alpha$) e dos custos ($\cos\beta$), e os fatores críticos das atividades do projeto;
- b) passo 2 - determinar o diagrama IDEF0 com os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e das variabilidades das durações ($\cos\alpha$) e dos custos ($\cos\beta$) das atividades do projeto com a configuração da cinemática direta da técnica de estimativa conjugada;

- c) passo 3 – por meio das equações ou formulações da técnica da estimativa conjugada, modelar as variáveis das durações e dos custos das atividades do projeto;
- d) passo 4 – apresentar o gráfico bidimensional (tempo e custo) para os valores das durações e dos custos planejados, modelados e executados das atividades do projeto, e
- e) passo 5 – realizar a análise de *trade-off* entre a duração e o custo das atividades do projeto.

A Figura 3.15 ilustra os passos do processo de implementação da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada dos projetos.

Figura 3.15. Processo de implementação da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

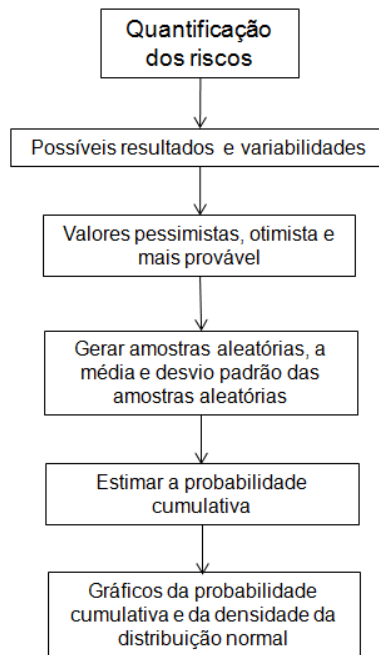
3.5.2.3. PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA PARA A QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS

Esta seção apresenta o processo para a quantificação dos riscos utilizando a técnica da estimativa conjugada, a fim de colaborar com o planejamento de cronogramas e dos orçamentos dos projetos, conforme descrito nos passos a seguir e ilustrado na Figura 3.16:

- a) passo 1 – identificar o conjunto de possíveis resultados para a duração e o custo das atividades do projeto, pode ser implementado para a cinemática direta e inversa;
- b) passo 2 - determinar o valor pessimista, otimista e mais provável da duração e do custo, por meio das formulações matemáticas da técnica da estimativa conjugada;
- c) passo 3 – por meio de um gerador automático de números pseudo aleatórios, simular as amostras aleatórias para as durações e os custos das atividades do projeto, conforme o grau de confiança e a margem de erro máximo da estimativa requerida. Esta tese utilizou o *software* Microsoft Excel;
- d) passo 4 – estimar a distribuição de probabilidade contínua para as durações e os custos, cuja forma é determinada por sua média e desvio padrão, a fim de estimar a probabilidade cumulativa do valor que se deseja. Esta tese utilizou o *software* Microsoft Excel, e
- e) passo 5 – apresentar os gráficos da probabilidade cumulativa do risco da duração e do custo das atividades do projeto, bem como os gráficos da densidade da probabilidade da distribuição normal do risco da duração e do custo.

A Figura 3.16 ilustra os passos do processo de implementação da técnica da estimativa conjugada para a quantificação dos riscos.

Figura 3.16. Processo de implementação da técnica da estimativa conjugada para a quantificação dos riscos.



Fonte: Produção do autor (2015).

4 IMPLEMENTAÇÃO E VERIFICAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a implementação e a verificação da técnica da estimativa conjugada. Assim, o capítulo está organizado conforme as seções descritas abaixo:

- a) apresentar uma introdução da implementação da técnica da estimativa conjugada para os satélites CBERS-3 e 4;
- b) apresentar a implementação da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada no CBERS-3 para modelar as incertezas das durações e dos custos;
- c) apresentar a implementação da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada no CBERS-4 para modelar as durações e os custos, e então realizar a comparação entre os valores modelados e executados das durações e dos custos do CBERS-4 com o propósito de verificar a aplicação da técnica da estimativa conjugada, e
- d) por fim, apresentar a aplicação da técnica da estimativa conjugada e do PERT no processo de quantificação dos riscos da etapa de AIT do CBERS-4.

4.1. INTRODUÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA NO PROGRAMA CBERS

Inicialmente é apresentada uma introdução da implementação da técnica da estimativa conjugada para os satélites da segunda geração do programa CBERS 3 e 4 (*China-Brazil Earth-Resources Satellites*). O programa CBERS foi idealizado para atender as necessidades da China e do Brasil referente ao serviço de observação da Terra. Assim, são apresentados os assuntos:

- a) resumo sobre a parceria entre China e Brasil no programa CBERS;
- b) apresentação da delimitação da implementação da técnica da estimativa conjugada no programa CBERS 3 e 4;
- c) os estados do AIT dos satélites CBERS 3 e 4 no BACCC, e
- d) contextualização para a implementação da técnica da estimativa conjugada para a etapa de AIT dos satélites CBERS 3 e 4.

4.1.1. BREVE RESUMO SOBRE O PROGRAMA CBERS

A parceria entre a China e o Brasil para o desenvolvimento e a construção de satélites de sensoriamento para observação da Terra, teve início em 1988 com a primeira geração dos satélites CBERS (1, 2 e 2B). O investimento de aproximadamente 300 milhões de dólares para cada satélite foi dividido em 70% para a China e 30% para o Brasil (INPE, 2011).

Em 2002, o acordo foi renovado para o desenvolvimento e construção da segunda geração de satélites CBERS (3 e 4), com novas cargas úteis e com a divisão de investimento e responsabilidades de 50% para a China e 50% para o Brasil. Infelizmente o CBERS 3 não entrou em operação por falha do veículo lançador, e o CBERS-4 foi lançado com sucesso em dezembro de 2014 e encontra-se em operação (INPE, 2011).

Os satélites CBERS-3 e 4 representam uma evolução em relação aos satélites CBERS-1, 2 e 2B. Para os CBERS-3 e 4 são utilizadas no módulo da carga útil quatro câmeras (Câmera Pancromática e Multiespectral - PAN, Câmera Multiespectral Regular - MUX, Imageador Multiespectral e Termal - IRS, e Câmera de Campo Largo - WFI) com desempenhos geométricos e radiométricos melhorados. A Figura 4.1 apresenta a ilustração dos satélites CBERS-3 e 4.

Figura 4.1. Ilustração do satélite CBERS da segunda geração.



Fonte: INPE (2011).

4.1.2. DELIMITAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA NO PROGRAMA CBERS

Seguem algumas observações sobre o planejamento e a execução dos satélites CBERS 3 e 4 utilizados no contexto desta tese:

- a) os satélites foram desenvolvidos e construídos conforme o ciclo de vida dos projetos espaciais da ESA;
- b) para o contexto desta tese, a estimativa conjugada é implementada apenas na campanha de lançamento dos satélites, sendo no final da fase D, mais precisamente na revisão de aceitação (AR – *Acceptance Review*);
- c) a campanha de lançamento dos satélites está dividida em duas etapas, sendo a primeira com a montagem, integração e teste (AIT – *Assembly, Integration and Tests*) dos CBERS 3 e 4 no centro espacial chinês (BACCC – *Beijing Aerospace Command and Control Center*), e a segunda com a montagem, integração e teste dos CBERS 3 e 4 no centro de lançamento de satélites da China (TSLC – *Taiyuan Satellite Launch Center*);

- d) no contexto desta tese, a estimativa conjugada é implementada apenas na etapa de AIT dos CBERS 3 e 4 realizada no centro espacial chinês (BACCC), e
- e) basicamente, a etapa de AIT dos CBERS 3 e 4 no centro espacial chinês é composta de quatro estados (A, B, C e D), juntamente com seus subestados (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1 e D2).

4.1.3. DESCRIÇÃO DOS ESTADOS DA ETAPA DE AIT DOS CBERS 3 E 4 NO BACCC

Os satélites CBERS 3 e 4 foram transportados para centro espacial em Beijing, onde foram montados, integrados e testados eletricamente, e então, foram desmontados e enviados para a centro de lançamento de satélites em Taiyuan.

O estado A do AIT dos satélites CBERS 3 e 4 realizado no centro espacial chinês, pode ser sintetizado em quatro principais testes elétricos, descritos a seguir:

- a) integração da distribuição de energia para todas as unidades;
- b) integração e verificação das interfaces dos subsistemas, bem como das funções de telemetria (TM) e telecomando (TC);
- c) integração e verificação das interfaces das cargas úteis, bem como das funções de telemetria (TM) e telecomando (TC), e
- d) verificações feitas no modo normal ou crítico, sem a bateria.

O estado B do AIT dos satélites CBERS 3 e 4 realizado no centro espacial chinês, pode ser sintetizado em dois principais testes elétricos envolvendo a

interface entre os módulos de serviço (plataforma) e das cargas úteis (satélite) por meio de cabos elétricos, que são:

- a) verificação das funções e desempenhos dos subsistemas individuais, e
- b) verificação das funções e desempenhos dos subsistemas integrados.

O estado C do AIT dos satélites CBERS 3 e 4 realizado no centro espacial chinês, pode ser sintetizado em dois principais testes elétricos envolvendo a interface entre os módulos de serviço (plataforma) e das cargas úteis (satélite) por meio de rádio frequência, conforme descrito abaixo:

- a) verificação das funções e desempenhos dos subsistemas integrados por meio de rádio frequência utilizando cabos elétricos, e
- b) verificação das funções e desempenhos dos subsistemas integrados por meio de rádio frequência utilizando as antenas.

O estado D do AIT dos satélites CBERS 3 e 4 realizado no centro espacial chinês, pode ser sintetizado em dois principais testes elétricos com o satélite fechado, que são:

- a) verificação das funções e desempenhos dos subsistemas integrados com o satélite fechado, e
- b) verificação das funções e desempenhos dos subsistemas integrados com o satélite fechado, revestido com a multi camada de isolamento (MLI - *Multi Layer Insulation*) e o painel solar integrado (SAG – *Solar Array Generator*).

4.1.4. CONTEXTO DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA NA ETAPA DE AIT DOS CBERS 3 E 4 NO BACCC

No contexto desta tese, para a aplicação da estimativa conjugada na campanha de lançamento, mais precisamente, na etapa de AIT dos satélites CBERS 3 e 4 no centro espacial chinês, foram assumidas algumas contextualizações descritas a seguir (INPE, 2011):

- a) foram considerados os estados em alto nível, ou seja, os estados (A, B, C e D) para a montagem, integração e testes elétricos dos satélites CBERS 3 e 4;
- b) os estados (A, B, C e D) são sequenciais, entretanto, a técnica de estimativa conjugada pode ser aplicada em diagramas de precedências com estados, fases e atividades simultâneas, paralelas e/ou híbridas;
- c) a unidade de medida do cronograma está em dias para o tempo planejado, executado e modelado, desconsiderando a identificação dos meses do ano;
- d) o custo total de cada CBERS 3 e 4 é da ordem de 250 milhões de dólares, sendo 125 milhões de dólares para cada país (China e Brasil);
- e) entretanto, não foi possível obter os custos planejados e executados dos satélites CBERS 3 e 4 divididos por estados da campanha de lançamento, sendo que a informação disponível é a quantidade de colaboradores especializados do INPE que participaram do AIT da campanha de lançamento;
- f) assim, a unidade de medida do orçamento é o custo por especialista para o custo planejado, executado e modelado conforme o número

de colaboradores especializados do INPE que atuou na etapa de AIT dos satélites CBERS 3 e 4 no centro espacial chinês;

- g) as informações sobre as durações e a quantidade de especialistas de cada estado do AIT dos CBERS 3 e 4 no BACCC foram obtidas por meio de entrevistas informais com os membros das equipes que participaram dessas campanhas;
- h) essas entrevistas ocorreram nos meses de setembro e outubro de 2015 nas dependências do LIT do INPE, em que gentilmente e de maneira solícita, os membros das equipes que participaram dessas campanhas forneceram informações para a construção dos cronogramas e dos orçamentos planejados e executados para cada estado do AIT do CBERS 3 e 4 no BACCC, e
- i) esta tese assume que, a duração é de apenas um tipo, bem como o custo é de apenas um tipo, dessa forma, os índices (i) e (j) da Equação 3.18 foram suprimidos da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.

4.2. IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA NO CBERS-3

Esta seção objetiva apresentar a implementação da técnica da estimativa conjugada para o primeiro satélite (CBERS-3) da segunda geração do programa CBERS, a fim de modelar as variabilidades (incertezas aleatórias) das estimativas das durações e dos custos para a etapa de AIT do CBERS-3 na campanha de lançamento realizada no centro espacial chinês.

Baseado em entrevistas informais realizadas com os membros das equipes do LIT do INPE, foi possível determinar os cronogramas planejado e executado do satélite CBERS-3 referente à campanha de lançamento, mais precisamente

para o AIT do CBERS-3 no BACCC. Ainda, baseado nesse conjunto de entrevista informais no LIT do INPE, também foi possível determinar a quantidade de especialistas do INPE para a composição dos orçamentos planejado e executado da campanha do AIT do CBERS-3 no BACCC.

A campanha de lançamento do satélite CBERS-3 foi marcada por vários atrasos, entretanto, o principal atraso foi provocado por componentes responsáveis pela conversão de energia elétrica. Tais conversores têm a função de adequar a voltagem do satélite às necessidades de seus subsistemas. Infelizmente, apesar de todos os testes realizados na etapa de AIT no LIT (Laboratório de Integração e Testes) do INPE no Brasil, os problemas surgiram na etapa de AIT da campanha de lançamento no BACCC.

Com o objetivo de implementar e verificar a técnica de estimativa conjugada, o atraso devido aos conversores de energia durante os estados do AIT do CBERS-3 no BACCC, foi desconsiderado do cronograma, dessa forma, os satélites CBERS 3 e 4 ficaram com contexto e escopo similares. Vale a ressalva de que os atrasos fazem parte das incertezas epistemológicas que podem abordadas com os critérios de determinação dos fatores críticos da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada.

Então, aplica-se o conceito da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada para a campanha de lançamento na etapa de AIT no BACCC para o satélite CBERS-3, a fim de:

- a) apresentar as durações e os custos (quantidade de pessoas) planejados e executados para a campanha de lançamento na etapa de AIT no BACCC para o satélite CBERS-3. Vale a ressalva de que as informações foram obtidas por meio de entrevistas informais com os membros da equipe do LIT do INPE, realizados nos meses de setembro e outubro de 2015;

- b) determinar o diagrama IDEF0 para as informações das durações e dos custos planejados e executados, e também determinam-se os valores dos fatores críticos das durações e dos custos. Neste caso a representação será do tipo cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada;
- c) determinar o gráfico bidimensional (tempo e custo) da etapa de AIT no BACCC para o satélite CBERS-3. Também, a partir dos conceitos da técnica da estimativa conjugada, são realizados alguns comentários para ilustrar os motivos relacionados aos atrasos e ao não cumprimento do orçamento;
- d) modelar as variabilidades das durações e dos custos dos estados, bem como do AIT do CBERS-3 no BACCC. Nesta seção, também é modelado o Trabalho necessário para executar os estados da etapa de AIT do CBERS-3, bem são determinadas as curvas de análise de *trade-off* entre as durações e os custos dos estados e da etapa de AIT do CBERS-3, e
- e) analisar criticamente as curvas de *trade-offs* com o conjunto de pares de valores (duração e custo), que atendem o valor do Trabalho necessário para a execução dos estados e da etapa de AIT do CBERS-3.

4.2.1. APRESENTAÇÃO ESTRUTURADA DAS DURAÇÕES E DOS CUSTOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC

Os parâmetros dos estados do AIT do CBERS-3 são obtidos por meio da análise das durações planejadas, e os custos planejados por meio da estimativa da quantidade de pessoas especializadas.

Assim, o satélite CBERS-3 apresentou estimativas de duração total planejada de 151 dias e o custo por especialista total planejado de 34, sendo que:

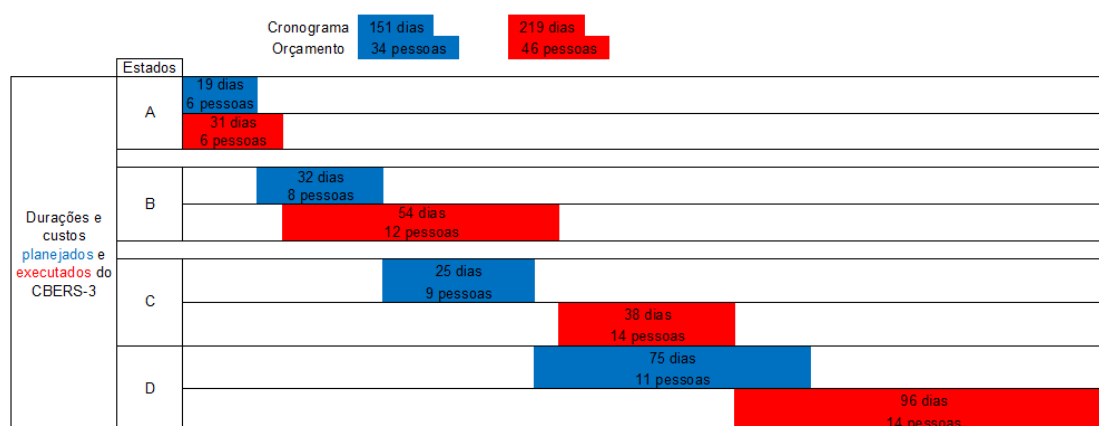
- a) duração planejada do estado A de 19 dias (TA), e custo por especialista planejado do estado A de 6 especialistas (CA);
- b) duração planejada do estado B de 32 dias (TB), e custo por especialista planejado do estado B de 8 especialistas (CB);
- c) duração planejada do estado C de 25 dias (TC), e custo por especialista planejado do estado C de 9 especialistas (CC), e
- d) duração planejada do estado D de 75 dias (TD), e custo por especialista planejado do estado D de 11 especialistas (CD).

E as variáveis dos estados do AIT do CBERS-3 são obtidas por meio da análise das durações executadas, e o custo por meio da média da quantidade de pessoas especializadas. Assim, o satélite CBERS-3 apresentou duração total executada de 219 dias e o custo por especialista total executado de 46, sendo que:

- a) duração executada do estado A de 31 dias (tA), e custo por especialista executado do estado A de 6 especialistas (cA);
- b) duração executada do estado B de 54 dias (tB), e custo por especialista executado do estado B de 12 especialistas (cB);
- c) duração executada do estado C de 38 dias (tC), e custo por especialista executado do estado C de 14 especialistas (cC), e
- d) duração executada do estado D de 96 dias (tD), e custo por especialista executado do estado D de 14 especialistas (cD).

A Figura 4.2 apresenta as durações e os custos (quantidade de pessoas) planejados e executados para a campanha de lançamento da etapa de AIT no BACCC para o satélite CBERS-3. O gráfico na cor azul é referente às durações e aos custos planejados, e o gráfico na cor vermelha é referente às durações e aos custos executados.

Figura 4.2. Durações e custos planejados e executados da etapa de AIT do CBERS-3 no BACCC.



Fonte: adaptado do INPE (2011).

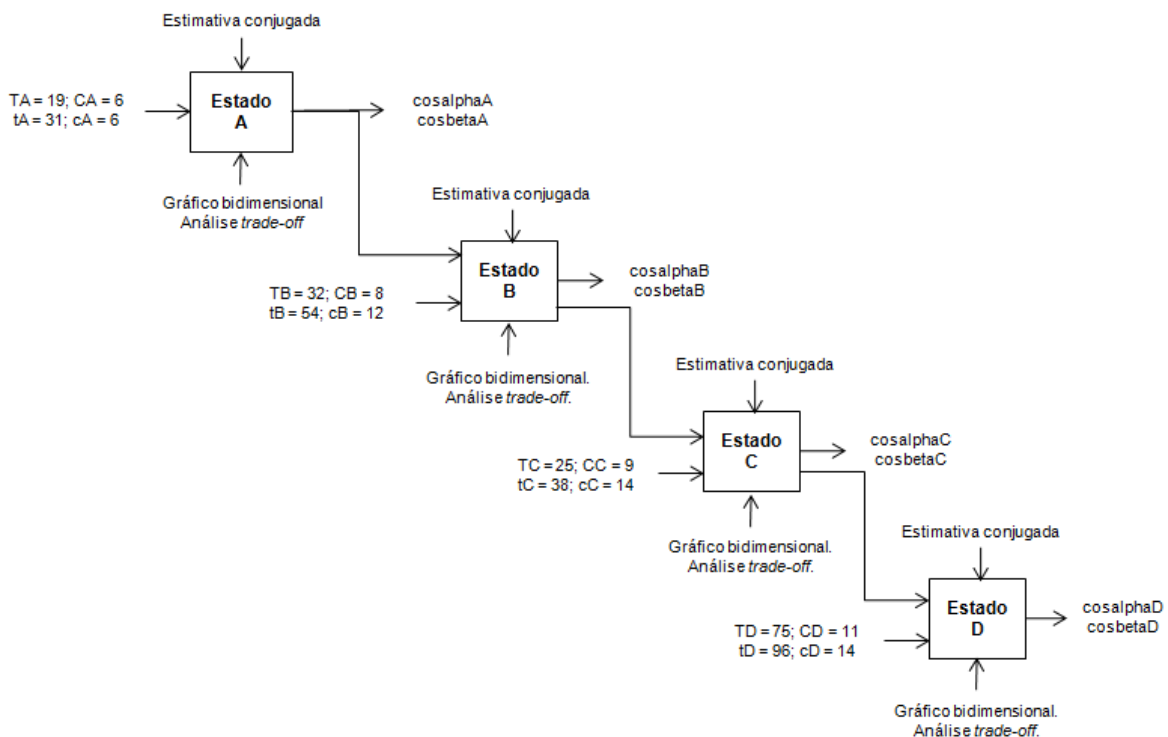
4.2.2. DIAGRAMA IDEF0 PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC

A Figura 4.3, apresenta o diagrama IDEF0 com os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e das variáveis (executados) dos estados do satélite CBERS-3 para a etapa de AIT no centro espacial chinês para a campanha de lançamento, com a configuração da cinemática inversa da técnica de estimativa conjugada. Seguem algumas observações e comentários:

- o fator crítico da duração e do custo do estado A, B, C e D deve ser considerado como unitário, sendo omitido no diagrama IDEF0;

- b) o gráfico bidimensional (tempo e custo) e a análise de *trade-off* são utilizados como ferramentas de gerenciamento de projeto, e
- c) a técnica da estimativa conjugada é aplicada para modelar as variabilidades das durações e dos custos, bem como para a duração e o custo etapa de AIT (cosalfa e cosbeta).

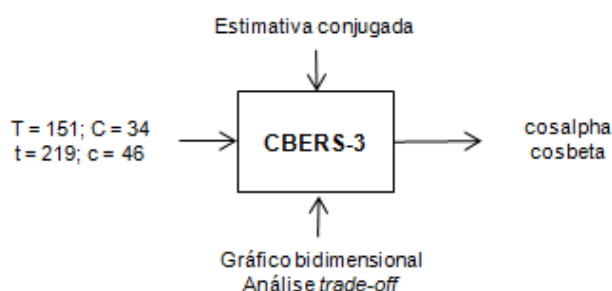
Figura 4.3. Diagrama IDEF0 dos estados do AIT do CBERS-3 no BACCC.



Fonte: Produção do autor (2015).

A Figura 4.4, apresenta o diagrama IDEF0 com os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e variáveis (executados) da etapa de AIT do satélite CBERS-3 no centro espacial chinês, com a configuração da cinemática inversa da técnica de estimativa conjugada.

Figura 4.4. Diagrama IDEF0 da etapa de AIT do CBERS-3 no BACCC.



Fonte: Produção do autor (2015).

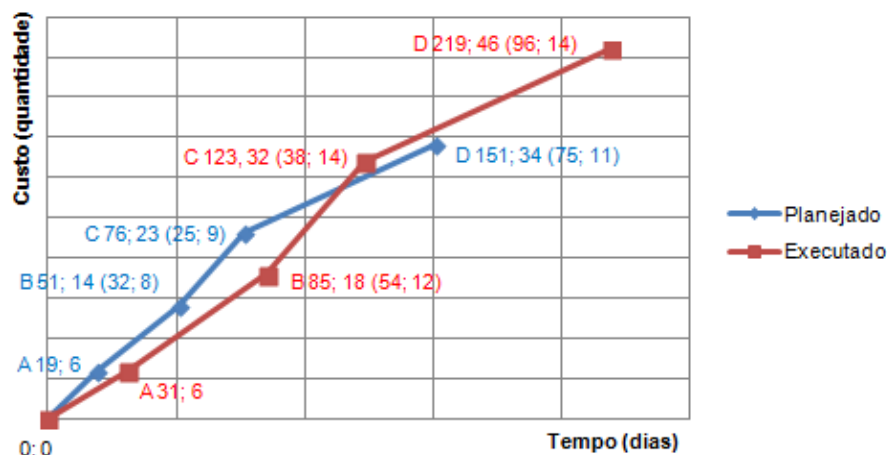
4.2.3. GRÁFICO BIDIMENSIONAL PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC

A Figura 4.5, apresenta o gráfico bidimensional para os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e variáveis (executados) dos estados do satélite CBERS-3 para a etapa de AIT no centro espacial chinês para a campanha de lançamento, com a configuração da cinemática inversa da técnica de estimativa conjugada.

Seguem algumas observações e comentários:

- a) os estados do AIT do CBERS-3 são espacialmente identificados no sistema de coordenadas bidimensional (tempo e custo);
- b) o gráfico na cor azul é referente às durações e aos custos planejados, e o gráfico na cor vermelha é referente às durações e aos custos executados, e
- c) os pares (duração e custo) são identificados com a soma das durações e dos custos, e em parênteses com a duração e o custo do ponto.

Figura 4.5. Gráfico bidimensional (tempo e custo) do AIT do CBERS-3 no BACCC.



Fonte: Produção do autor (2015).

Analisando o gráfico da Figura 4.5, constata-se que existem diferenças entre a curva planejada e a executada para o AIT do CBERS-3. Segundo os conceitos da técnica da estimativa conjugada:

- a) o estado A executado foi concluído com duração maior do que o planejado, ou seja, o estado foi concluído com atraso. O atraso está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa do custo do estado A;
- b) o estado B executado foi concluído com duração maior do que o planejado, ou seja, o estado foi concluído com atraso. O atraso está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa do custo do estado B;
- c) o estado B executado foi concluído com custo maior do que o planejado, ou seja, o estado foi concluído acima do custo planejado. O não cumprimento do orçamento está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa da duração do estado B;

- d) o estado C executado foi concluído com duração maior do que o planejado, ou seja, o estado foi concluído com atraso. O atraso está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa do custo do estado C;
- e) o estado C executado foi concluído com custo maior do que o planejado, ou seja, o estado foi concluído acima do custo planejado. O não cumprimento do orçamento está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa da duração do estado C;
- f) o estado D executado foi concluído com duração maior do que o planejado, ou seja, o estado foi concluído com atraso. O atraso está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa do custo do estado D, e
- g) o estado D executado foi concluído com custo maior do que o planejado, ou seja, o estado foi concluído acima do custo planejado. O não cumprimento do orçamento está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa da duração do estado D.

4.2.4. MODELAGEM DAS VARIABILIDADES E ANÁLISE DE *TRADE-OFF* PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC

Com as informações apresentadas no diagrama IDEF0 e no gráfico bidimensional, por meio da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada são modeladas as variabilidades das estimativas das durações e dos custos dos estados da etapa de AIT do CBERS-3 no BACCC, bem como é realizada a análise de *trade-off* entre a duração e o custo dos estados.

Segundo Kerzner (2009), o *trade-off* é baseado nas restrições dos projetos (tempo, custo e performance) para projetos relacionados a P&D (pesquisa e desenvolvimento), como é o caso do satélite CBERS-3, usualmente a performance é bem definida, porém, o tempo e o custo podem assumir valores diferentes do planejado, geralmente, maiores do que o cronograma e o orçamento. Abaixo é apresentada a modelagem das variabilidades e a análise de *trade-off* para o estado A de AIT do CBERS-3.

A variabilidade da estimativa do custo do estado A ($\cos\beta_A$) depende da estimativa da duração planejada e da duração executada, assim, a variabilidade da estimativa do custo do estado A é apresentada pela Equação 4.1.

$$\begin{aligned}
 t_A &= TA \cdot ft_A (\cos\beta_A + 1) \\
 31 &= 19 \cdot (\cos\beta_A + 1) \\
 \cos\beta_A &= \frac{31}{19} - 1 \cong 0,62
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

A Equação 4.1, declara que a variabilidade da estimativa do custo do estado A ($\cos\beta_A = 0,62$) e a estimativa da duração de 19 dias, proporcionaram uma duração executada do estado A de 31 dias.

Enquanto que, a variabilidade da duração do estado A ($\cos\alpha_A$) depende da estimativa do custo planejado e do custo executado, assim, a variabilidade da estimativa da duração do estado A é apresentada pela Equação 4.2.

$$\begin{aligned}
 c_A &= CA \cdot fc_A (\cos\alpha_A + 1) \\
 6 &= 6 \cdot (\cos\alpha_A + 1) \\
 \cos\alpha_A &= \frac{6}{6} - 1 = 0
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

A Equação 4.2, declara que a variabilidade da estimativa da duração do estado A ($\cos\alpha_A = 0$) e a estimativa do custo de 6 especialistas, proporcionaram um custo executado do estado A de 6 especialistas.

A partir das Equações 3.11 e 3.12, que envolvem as estimativas planejadas da duração e do custo, bem como suas variabilidades, pode-se realizar a análise de *trade-off* do estado A do AIT do satélite CBERS-3 no BACCC.

Assumindo que o Trabalho (τ_A) realizado para completar o estado A seja o produto entre as Equações 3.11 e 3.12, considerando as estimativas planejadas da duração e do custo, bem como suas variabilidades modeladas, a Equação 4.3 apresenta o Trabalho (τ_A) do estado A.

$$\begin{aligned}\tau_A &= [TA.ft_A(\cos\beta_A + 1)].[CA.fc_A(\cos\alpha_A + 1)] \\ \tau_A &= [19.(0,62 + 1)].[6.(0 + 1)] \\ \tau_A &= 30,78.6 \cong 184 \text{ [dias .especialistas]}\end{aligned}\tag{4.3}$$

Com o propósito de traçar o gráfico com o *trade-off* entre a duração e o custo do estado A do AIT do satélite CBERS-3 no BACCC, deve-se determinar os pontos extremos da curva de *trade-off*.

Assumindo que a variabilidade da estimativa da duração do estado A seja igual a zero ($\cos\alpha_A = 0$), a Equação 4.4 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa do custo do estado A ($\cos\beta_A$).

$$\begin{aligned}\tau_A &= [TA.ft_A(\cos\beta_A + 1)].[CA.fc_A(\cos\alpha_A + 1)] \\ 184 &= [19.(\cos\beta_A + 1)].[6.(0 + 1)] \\ \cos\beta_A &= \left(\frac{184}{114}\right) - 1 \cong 0,62\end{aligned}\tag{4.4}$$

A partir da Equação 3.11, é possível modelar a estimativa da duração (t_A) do estado A para a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_A = 0,61$). A Equação 4.5 apresenta a estimativa da duração para o estado A com a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_A = 0,61$).

$$\begin{aligned} t_A &= TA.ft_A(\cos\beta_A + 1) \\ t_A &= 19.(0,62 + 1) \\ t_A &\cong 31 \text{ dias} \end{aligned} \tag{4.5}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa de custo de 6 especialistas, a estimativa da duração do estado A é de 31 dias.

Assumindo que a variabilidade da estimativa do custo do estado A seja igual a zero ($\cos\beta_A = 0$), a Equação 4.6 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa da duração do estado A ($\cos\alpha_A$).

$$\begin{aligned} \tau_A &= [TA.ft_A(\cos\beta_A + 1)].[CA.fc_A(\cos\alpha_A + 1)] \\ 184 &= [19.(0 + 1)].[6.(\cos\alpha_A + 1)] \\ \cos\alpha_A &= \left(\frac{184}{114}\right) - 1 \cong 0,62 \end{aligned} \tag{4.6}$$

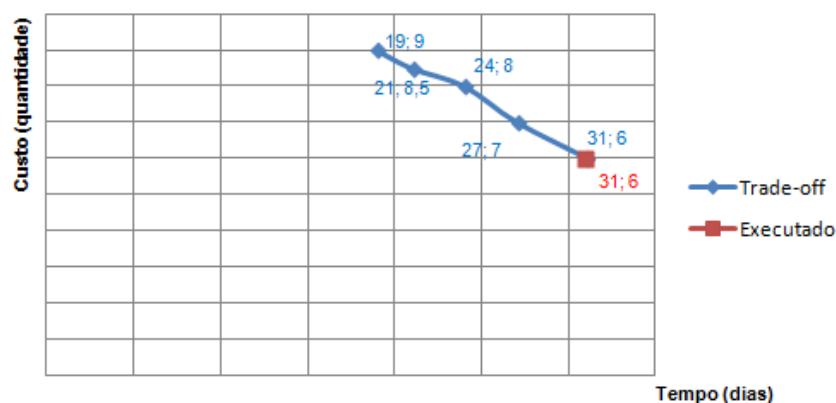
A partir da Equação 3.12, é possível modelar a estimativa do custo (c_A) do estado A para a variabilidade da estimativa da duração ($\cos\alpha_A = 0,62$). A Equação 4.7 apresenta a estimativa do custo do estado A para a variabilidade da estimativa da duração ($\cos\alpha_A = 0,62$).

$$\begin{aligned} c_A &= CA.fc_A(\cos\alpha_A + 1) \\ c_A &= 6.(0,62 + 1) \\ c_A &\cong 9 \text{ especialistas} \end{aligned} \tag{4.7}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa da duração de 19 dias, a estimativa do custo do estado A é de 9 especialistas. A Figura 4.6

apresenta o *trade-off* (tempo e custo) para o estado A do AIT do satélite CBERS-3.

Figura 4.6. *Trade-off* (tempo e custo) do estado A do AIT do satélite CBERS-3.



Fonte: Produção do autor (2015).

A modelagem das variabilidades e a geração do gráfico de *trade-off* dos demais estados bem como para a etapa de AIT, segue a sequência realizada para o estado A. Assim, as variabilidades modeladas para os demais estados bem como para a etapa de AIT são apresentados na Tabela 4.1.

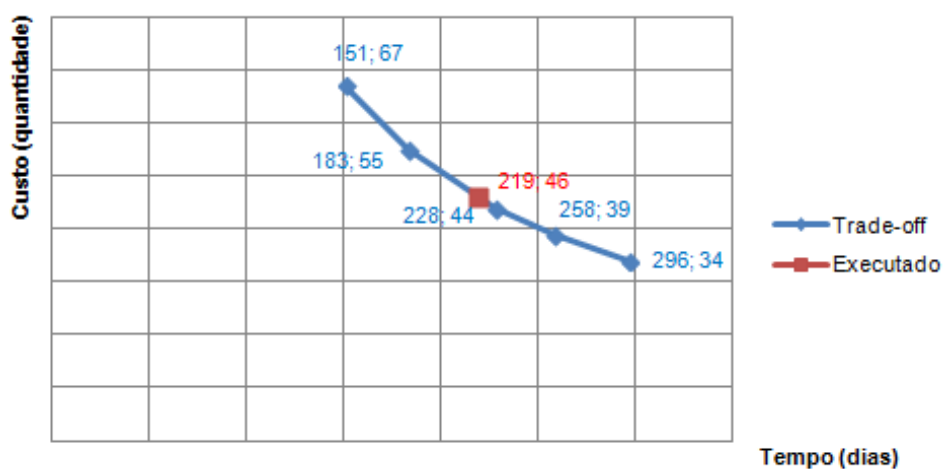
Tabela 4.1. Atributos dos estados e da etapa de AIT do CBERS-3.

AIT	Parâmetros			Variabilidades Modeladas		Variáveis	
	T	C	f	cosalfa	cosbeta	t	c
A	19	6	1	0	0,62	31	6
B	32	8	1	0,5	0,69	54	12
C	25	9	1	0,56	0,52	38	14
D	75	11	1	0,27	0,28	96	14
Etapa	151	34	1	0,35	0,45	219	46

Fonte: Produção do autor (2015).

Enquanto que a Figura 4.7 apresenta o gráfico de *trade-off* para a etapa de AIT do satélite CBERS-3.

Figura 4.7. *Trade-off* (tempo e custo) da etapa de AIT do satélite CBERS-3.



Fonte: Produção do autor (2015).

4.2.5. COMENTÁRIOS DA ANÁLISE DE *TRADE-OFF* PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-3 NO BACCC

Por meio da análise de *trade-off* para a etapa de AIT do CBERS-3 no BACCC, pode-se afirmar que:

- a) a incerteza aleatória da duração, representada pela variabilidade da estimativa da duração, afetou o valor do custo executado;
- b) a incerteza aleatória do custo, representada pela variabilidade da estimativa do custo, afetou o valor da duração executada;
- c) assumindo que o Trabalho executado é o produto entre a duração e o custo, pode-se obter o conjunto de pares (tempo e custo) para representar as curvas de análise de *trade-off*;
- d) o valor modelado da etapa de AIT é igual a soma dos valores modelados (duração e custo) de cada estado, e

- e) as variabilidades modeladas das estimativas das durações e dos custos tornam-se ativos de processos organizacionais, e poderão ser utilizadas para colaborar no processo de planejamento de cronogramas, orçamentos e quantificação dos riscos de futuras campanhas de lançamento.

4.3. CINEMÁTICA DIRETA DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC

Esta seção tem como objetivo a verificação da técnica da estimativa conjugada por meio da implementação da cinemática direta desta técnica para o segundo satélite (CBERS-4) da segunda geração do programa CBERS.

Como os satélites CBERS-3 e 4 possuem escopo e contexto similares, as estimativas das durações e dos custos são iguais para os dois satélites. Enquanto que, as variabilidades (incertezas aleatórias) das estimativas das durações e dos custos do satélite CBERS-3 são utilizadas para modelar as durações e os custos da etapa de AIT do CBERS-4 na campanha de lançamento realizada no centro espacial chinês.

Assim, esses valores modelados das durações e dos custos da etapa de AIT do CBERS-4, por meio da análise da curva de *trade-off*, são comparados com os valores executados das durações e dos custos da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC. Desta forma, aplica-se o conceito da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada para a campanha de lançamento na etapa de AIT no BACCC para o satélite CBERS-4, a fim de:

- a) apresentar as durações e os custos (quantidade de pessoas) planejados para a campanha de lançamento na etapa de AIT no BACCC para o satélite CBERS-4. Vale a ressalva de que as

informações são as mesmas do satélite CBERS-3, e foram obtidas por meio de entrevistas informais com os membros do LIT;

- b) determinar o diagrama IDEF0 a partir das informações das durações e dos custos planejados do AIT do CBERS-4, das variabilidades e dos fatores críticos das durações e dos custos do CBERS-3;
- c) modelar as durações e os custos dos estados do AIT do CBERS-4, a partir das durações e dos custos planejados para a etapa de AIT do CBERS-4, das variabilidades e dos fatores críticos das durações e dos custos da etapa de AIT do CBERS-3;
- d) determinar o gráfico bidimensional (tempo e custo) da etapa de AIT no BACCC para o satélite CBERS-4, para as durações e os custos planejados, modelados e executados;
- e) realizar a análise de *trade-off* entre os valores das durações e dos custos modelados e executados da etapa de AIT do CBERS-4, com o objetivo de verificar a técnica da estimativa conjugada, e
- f) analisar criticamente os resultados das análises de *trade-offs*, a fim de constatar a verificação da técnica da estimativa conjugada.

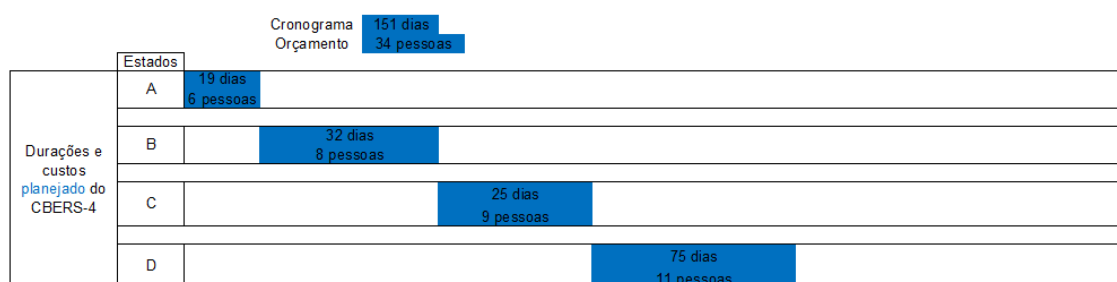
4.3.1. APRESENTAÇÃO ESTRUTURADA DAS DURAÇÕES E DOS CUSTOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC

Os parâmetros dos estados do AIT do CBERS-4 são obtidos por meio da análise das durações planejadas e os custos planejados por meio da estimativa da quantidade de pessoas especializadas, conforme os valores estimados para o CBERS-3. Assim, o satélite CBERS-4 possui estimativas de duração total planejada de 151 dias e de custo por especialista total planejado de 34, sendo que:

- a) duração planejada do estado A de 19 dias (TA), e custo planejado do estado A de 6 especialistas (CA);
- b) duração planejada do estado B de 32 dias (TB), e custo planejado do estado B de 8 especialistas (CB);
- c) duração planejada do estado C de 25 dias (TC), e custo planejado do estado C de 9 especialistas (CC), e
- d) duração planejada do estado D de 75 dias (TD), e custo planejado do estado D de 11 especialistas (CD).

A Figura 4.8 apresenta as durações e os custos (quantidade de pessoas) planejados para a campanha de lançamento na etapa de AIT no BACCC para o satélite CBERS-4. O gráfico na cor azul é referente às durações e aos custos planejados.

Figura 4.8. Durações e custos planejados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.



Fonte: adaptado do INPE (2011).

4.3.2. DIAGRAMA IDEF0 PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC

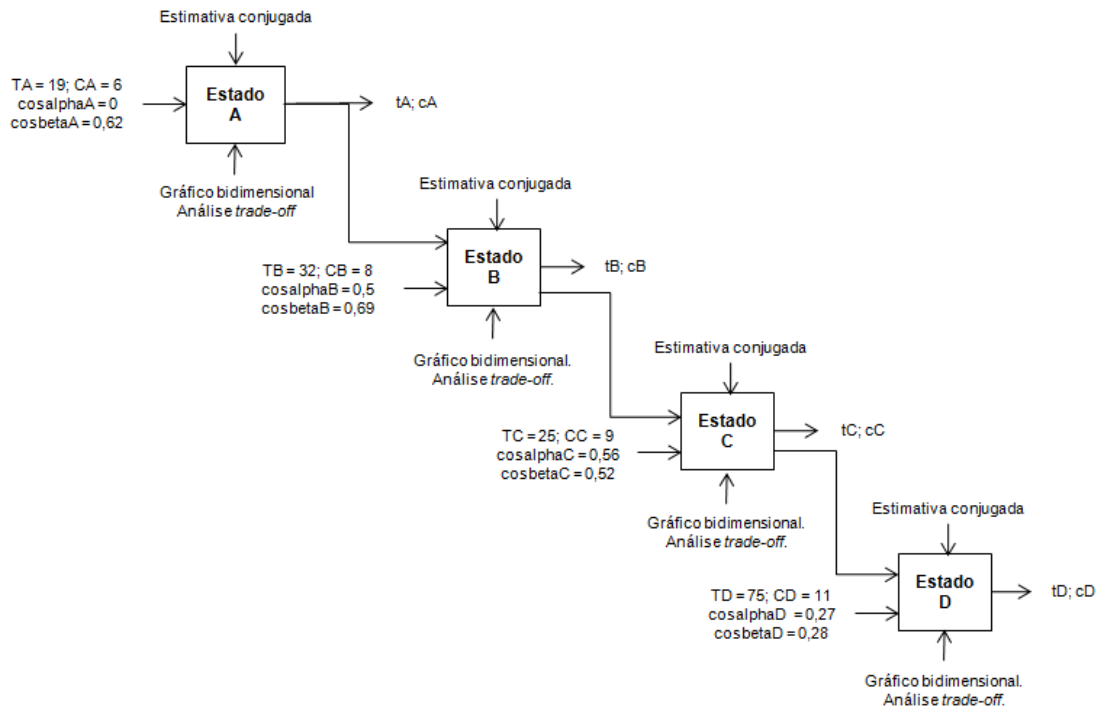
A Figura 4.9, apresenta o diagrama IDEF0 com os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e das variabilidades modeladas (incertezas aleatórias) dos estados do satélite CBERS-4 para a etapa de AIT no centro

espacial chinês para a campanha de lançamento, com a configuração da cinemática direta da técnica de estimativa conjugada.

Seguem algumas observações e comentários:

- a) variabilidade da duração ($\text{cos}\alpha_A = 0$) e a variabilidade do custo ($\text{cos}\beta_A = 0,62$) para o estado A para a etapa de AIT do CBERS-4;
- b) variabilidade da duração ($\text{cos}\alpha_B = 0,5$) e a variabilidade do custo ($\text{cos}\beta_B = 0,69$) para o estado B para a etapa de AIT do CBERS-4;
- c) variabilidade da duração ($\text{cos}\alpha_C = 0,56$) e a variabilidade do custo ($\text{cos}\beta_C = 0,52$) para o estado C para a etapa de AIT do CBERS-4;
- d) variabilidade da duração ($\text{cos}\alpha_D = 0,27$) e a variabilidade do custo ($\text{cos}\beta_D = 0,28$) para o estado D para a etapa de AIT do CBERS-4;
- e) variabilidade da duração ($\text{cos}\alpha = 0,35$) e a variabilidade do custo ($\text{cos}\beta = 0,45$) para a etapa de AIT do CBERS-4;
- f) os fatores críticos das durações e dos custos dos estados A, B, C e D são considerados como ($t_A = t_C = t_B = t_D = t_A = t_C = t_B = t_D = 1$), sendo omitidos no diagrama IDEF0;
- g) o gráfico bidimensional (tempo e custo) e a análise de *trade-off* são utilizados como ferramentas de gerenciamento de projeto, e
- h) a técnica da estimativa conjugada é aplicada para modelar as variáveis das durações (t_A, t_B, t_C e t_D) e dos custos (c_A, c_B, c_C , e c_D), bem como para a duração (t) e o custo (c) etapa de AIT.

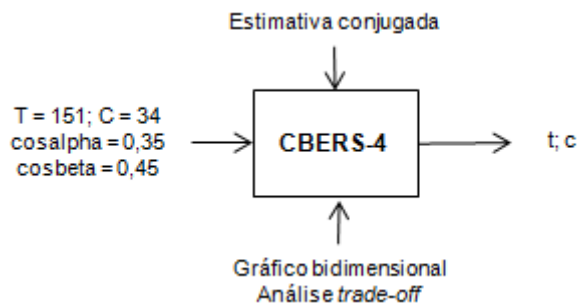
Figura 4.9. Diagrama IDEF0 dos estados do AIT do CBERS-4 no BACCC.



Fonte: Produção do autor (2015).

A Figura 4.10, apresenta o diagrama IDEF0 com os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e das variabilidades (incertezas aleatórias) da etapa de AIT do satélite CBERS-4 no centro espacial chinês, com a configuração da cinemática direta da técnica de estimativa conjugada.

Figura 4.10. Diagrama IDEF0 da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.



Fonte: Produção do autor (2015).

4.3.3. MODELAGEM DAS DURAÇÕES E DOS CUSTOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC

Para modelar as durações e os custos dos estados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, assumindo que o contexto e o escopo são similares para os satélites CBERS-3 e 4, a técnica da estimativa conjugada deve utilizar:

- a) os valores estimados ou planejados das durações e dos custos para os estados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, e
- b) os valores modelados das variabilidades das durações e dos custos para os estados da etapa de AIT do CBERS-3 no BACCC.

Abaixo é apresentada a modelagem das durações e dos custos para o estado A de AIT do CBERS-4.

Para modelar a duração e o custo do estado A da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, deve-se assumir que:

- a) a variabilidade modelada da duração do estado A do CBERS-3 ($\cos\alpha_A = 0$);
- b) a variabilidade modelada do custo do estado A do CBERS-3 ($\cos\beta_A = 0,62$);
- c) as estimativas planejadas da duração ($T_A = 19$ dias) e do custo ($CA = 6$ especialistas) do estado A do CBERS-4, e
- d) os fatores críticos são unitários ($ft_A = fc_A = 1$) do estado A do CBERS-4.

A Equação 4.8 apresenta a duração modelada do estado A do AIT do CBERS-4 no BACCC.

$$\begin{aligned}
 tA &= TA.ftA.(cos\beta A + 1) \\
 tA &= 19.(0,62 + 1) \\
 tA &\cong 31 \text{ dias}
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

A Equação 4.9 apresenta o custo modelado do estado A do AIT do CBERS-4 no BACCC.

$$\begin{aligned}
 cA &= CA.fcA.(cos\alpha A + 1) \\
 cA &= 6.(0 + 1) \\
 cA &\cong 6 \text{ especialistas}
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

As modelagens das durações e dos custos dos demais estados bem como para a etapa são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Atributos dos estados e da etapa de AIT do CBERS-4.

AIT	Parâmetros			Variabilidades		Variáveis Modeladas	
	T	C	f	cosalfa	cosbeta	t	c
A	19	6	1	0	0,62	31	6
B	32	8	1	0,5	0,69	54	12
C	25	9	1	0,56	0,52	38	14
D	75	11	1	0,27	0,28	96	14
Etapa	151	34	1	0,35	0,45	219	46

Fonte: Produção do autor (2015).

4.3.4. GRÁFICO BIDIMENSIONAL PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC

Esta seção tem como objetivo apresentar o gráfico bidimensional (tempo e custo) para os valores das durações e dos custos planejados, modelados e executados para os estados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.

O satélite CBERS-4 apresenta a duração planejada total de 151 dias e orçamento planejado total de 34 especialistas, a seguir são apresentados os valores planejados das durações e dos custos dos estados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC:

- a) duração planejada do estado A de 19 dias (TA), custo planejado do estado A de 6 especialistas (CA);
- b) duração planejada do estado B de 32 dias (TB), custo planejado do estado B de 8 especialistas (CB);
- c) duração planejada do estado C de 25 dias (TC), custo planejado do estado C de 9 especialistas (CC), e
- d) duração planejada do estado D de 75 dias (TD), custo planejado do estado D de 11 especialistas (CD).

O satélite CBERS-4 apresenta a duração modelada total de 219 dias e orçamento modelado total de 46 especialistas, a seguir são apresentados os valores modelados das durações e dos custos dos estados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC:

- a) duração modelada do estado A de 31 dias (tA), custo modelado do estado A de 6 especialistas (cA);

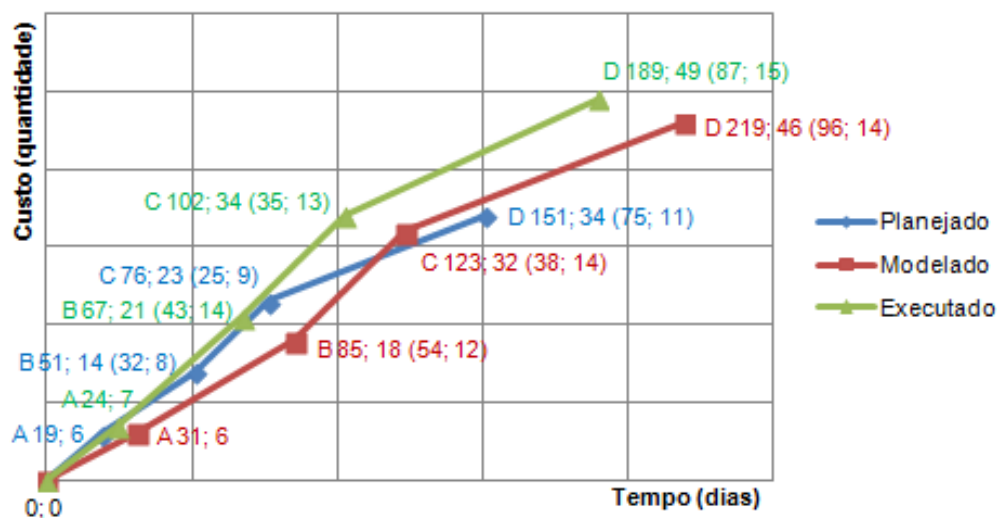
- b) duração modelada do estado B de 54 dias (tB), custo modelado do estado B de 12 especialistas (cB);
- c) duração modelada do estado C de 38 dias (tC), custo modelado do estado C de 14 especialistas (cC), e
- d) duração modelada do estado D de 96 dias (tD), custo modelado do estado D de 14 especialistas (cD).

O satélite CBERS-4 apresenta a duração executada total de 189 dias e orçamento executado total de 49 especialistas, a seguir são apresentados os valores executados das durações e dos custos dos estados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC:

- a) duração executada do estado A de 24 dias, custo executado do estado A de 7 especialistas;
- b) duração executada do estado B de 43 dias custo executado do estado B de 14 especialistas;
- c) duração executada do estado C de 35 dias, custo executado do estado C de 13 especialistas, e
- d) duração executada do estado D de 87 dias, custo executado do estado D de 15 especialistas.

A Figura 4.11 apresenta o gráfico bidimensional (tempo e custo) com os valores das durações e dos custos planejados, modelados e executados para os estados da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.

Figura 4.11. Gráfico bidimensional (planejado, modelado e executado) dos estados do AIT do CBERS-4 no BACCC.



Fonte: Produção do autor (2015).

4.3.5. COMENTÁRIOS SOBRE A VERIFICAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Os satélites CBERS-3 e 4, que foram planejados e executados, correspondem à segunda geração de satélites de observação da Terra da parceria entre a China e o Brasil. Seguem alguns comentários sobre a verificação da técnica da estimativa conjugada dos projetos:

- a) a técnica da estimativa conjugada confirma a hipótese de que as variabilidades (incertezas aleatórias) das estimativas das durações afetam os valores executados dos custos do projeto;
- b) a técnica da estimativa conjugada confirma a hipótese de que as variabilidades (incertezas aleatórias) das estimativas dos custos afetam os valores executados das durações do projeto;

- c) a análise de *trade-off*, proporcionada pela inserção das variabilidades das estimativas no desenvolvimento dos cronogramas e orçamentos, possibilita um gerenciamento mais efetivo dos recursos dos projetos. Entretanto, não diminui a importância do processo de estimativas dos projetos, ao contrário, ressalta a necessidade de que esse processo seja realizado com elevado nível de atenção e respeitando as restrições organizacionais;
- d) a precisão das estimativas modeladas pela técnica da estimativa conjugada, depende do tipo e da técnica utilizada nas estimativas durante o planejamento das durações e dos custos;
- e) a técnica da estimativa conjugada foi verificada por meio dos exemplos dos satélites CBERS-3 e 4, que foram planejados e executados. A verificação foi realizada no final da fase D do projeto dos satélites, mais precisamente ao final da revisão de aceitação (AR) da etapa de AIT no centro espacial chinês (BACCC);
- f) as informações sobre as durações planejadas e executadas (cronogramas em dias) e os custos planejados e executados (quantidade de especialistas do INPE), foram obtidas por meio de entrevistas informais realizadas entre setembro e outubro de 2015 com as equipes do LIT do INPE, que participaram das campanhas dos lançamentos;
- g) tomando como base o cronograma e o orçamento planejado e executado do CBERS-3, por meio das equações da técnica da estimativa conjugada, foi possível calcular as variabilidades das durações e dos custos, que foram utilizados para calcular o Trabalho necessário para executar os estados do AIT do CBERS-3 no BACCC;

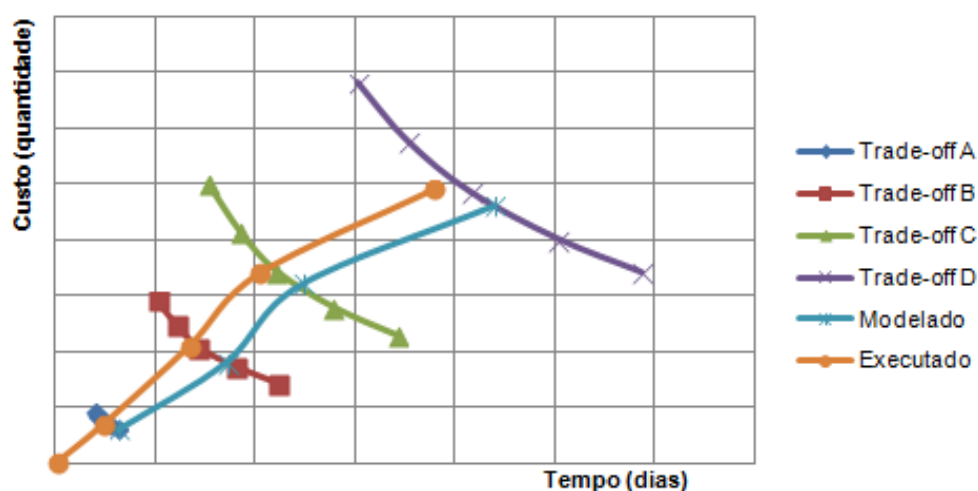
- h) a partir do cronograma e do orçamento planejado do AIT do CBERS-4, das variabilidades modeladas e dos valores calculados do Trabalho para a execução dos estados do AIT do CBERS-3, foram modeladas as durações e os custos, bem como geradas as curvas de *trade-offs* para os estados do AIT do CBERS-4;
- i) a curva de *trade-off* representa o conjunto de pontos ou pares de durações e custos, que satisfazem o valor do Trabalho necessário para a execução dos estados do AIT dos CBERS;
- j) a verificação da técnica da estimativa conjugada é realizada por meio da constatação de que os pontos ou pares de durações e custos executados dos estados do AIT do CBERS-4 estão próximos da curvas de *trade-off* dos estados de AIT do CBERS-4, e
- k) apesar da verificação ter ocorrido por meio de exemplos de projetos com escopo e contexto idênticos, a técnica da estimativa conjugada apresenta potencial de aplicação em projetos inéditos.

E por fim, a verificação da técnica da estimativa conjugada dos projetos é verificada com o resultado da análise com todas as curvas de *trade-offs* apresentadas na Figura 4.12, em que:

- a) os valores modelados das durações e dos custos pertencem as curvas de *trade-offs*. Esse resultado já era esperado, pois, as curvas de *trade-offs* e os valores modelados foram baseados no mesmo conjunto de dados estimados e executados do satélite CBERS-3, e
- b) os valores executados estão bem próximos das curvas de *trade-offs*, podendo concluir que a execução foi realizada em menos tempo do que o modelado, entretanto a execução consumiu mais especialista do que o modelado.

A Figura 4.12 apresenta o resultado da análise com todas as curvas de *trade-offs* para os estados e para a etapa de AIT do CBERS-4.

Figura 4.12. Resultado da análise com todas as curvas de *trade-offs* dos estados e da etapa de AIT do CBERS-4.



Fonte: Produção do autor (2015).

4.4. QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DA DURAÇÃO E DO CUSTO PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC

A técnica da estimativa conjugada também pode ser utilizada para a quantificação dos riscos (incertezas aleatórias) dos projetos, sendo que, com as ferramentas estatísticas pode-se estimar a probabilidade de ocorrência de um evento onde o conjunto de possíveis resultados é conhecido.

Esta seção tem como objetivo apresentar a quantificação dos riscos para a duração e o custo da etapa de AIT do CBERS-4 no centro espacial chinês, em que, a quantificação dos riscos é realizada por meio da simulação com o

método de Monte Carlo, que é considerado como a principal técnica de programação estocástica com amostragem direta. Assim, este capítulo trata dos assuntos:

- a) apresentar o *software* Microsoft Excel como opção para efetuar a simulação do método de Monte Carlo no processo de quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC;
- b) aplicar a simulação do método de Monte Carlo por meio do *software* Microsoft Excel utilizando a técnica da estimativa conjugada, a fim de estimar a quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC;
- c) aplicar a simulação do método de Monte Carlo por meio do *software* Microsoft Excel utilizando a técnica da estimativa PERT, a fim de estimar a quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, e
- d) analisar os resultados dos riscos quantificados da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, entre as técnicas da estimativa conjugada e do PERT.

4.4.1. SIMULAÇÃO MONTE CARLO COM O MICROSOFT EXCEL

A lógica do método de Monte Carlo é conhecida desde o século XIX, entretanto, o método ficou popular por meio do trabalho de John Von Neumann e Stanislaw Ulam, publicado em 1949 com a aplicação do método de Monte Carlo no projeto da bomba atômica dos Estados Unidos da América (DEVROYE,1986).

O método de Monte Carlo pode ser descrito como uma ferramenta estatística, com aplicações em diversos segmentos da ciência e da engenharia, a fim de simular problemas representados por processos estocásticos por meio de uma sequência de números aleatórios (FRERY,1992).

Nos métodos convencionais, o processo físico é descrito por meio das equações diferenciais que representam o comportamento do sistema, enquanto que no método de Monte Carlo o processo físico é simulado diretamente, ou seja, não necessita do uso das equações diferenciais (RIPLEY, 1987).

Como esta tese aborda as durações e os custos como variáveis aleatórias contínuas, assim, é requerido que as durações e os custos sejam descritas por funções densidades de probabilidade, que frequentemente, são representadas por meio de uma distribuição normal ou beta (DEVROYE,1986).

Assim, o método de Monte Carlo consiste na simulação de variáveis aleatórias contínuas, que correspondem aos riscos das durações e dos custos dos projetos. Tais simulações estocásticas utilizam algum tipo de gerador de números aleatórios. Vale a ressalva de que, tais geradores são baseados em mecanismos determinísticos e iterativos, portanto a nomenclatura mais adequada seria de geradores de números pseudoaleatórios, pois esses mecanismos geram números com comportamento similar aos números efetivamente aleatórios (BUSTOS; FRERY,1992).

Entretanto, pode-se assumir que esses números gerados possuem as propriedades básicas necessárias de um número puramente aleatório, tais como a uniformidade no intervalo unitário e a independência entre sequências de valores (RIPLEY, 1987).

O método de Monte Carlo assume que, quanto maior for o número da amostra da variável aleatória contínua, maior será a precisão da estimativa da probabilidade de ocorrência do risco simulado (DEVROYE,1986). A Equação

4.10 apresenta a estimativa do número mínimo necessário de amostras ou iterações, em que:

- a) número de amostras (N);
- b) desvio padrão da amostra (σ);
- c) margem de erro ou erro máximo de estimativa (E), identifica a diferença máxima entre a média amostral e a verdadeira média populacional, e
- d) valor crítico (Z), que corresponde ao grau de confiança desejado, sendo 90% de confiança (1,645), 95% de confiança (1,96) e 99% de confiança (2,575).

$$N = \left(\frac{Z \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (4.10)$$

Existem várias ferramentas comerciais para simular o método de Monte Carlo. Seguem as principais:

- a) *Operational Risk* da organização Numerical Technologies;
- b) @Risk da organização Palisade;
- c) *Crystal Ball* da organização Oracle;
- d) *ModelRisk* da organização Vose, e
- e) Excel da organização Microsoft.

Com o propósito de realizar uma simulação simples, porém com confiabilidade, esta tese realizou a quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de

AIT do CBERS-4 no BACCC para a técnica da estimativa conjugada e do PERT, por meio das ferramentas do *software* Microsoft Excel.

A seguir, é apresentado o conjunto de passos para aplicar o Excel no processo de quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC:

- a) identificar o conjunto de possíveis resultados para a duração do projeto, a partir do valor planejado da duração da etapa de AIT do CBERS-4, bem como de sua variabilidade;
- b) identificar o conjunto de possíveis resultados para o custo do projeto, a partir do valor planejado do custo da etapa de AIT do CBERS-4, bem como de sua variabilidade;
- c) determinar o valor pessimista, otimista e mais provável da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada e com a técnica PERT;
- d) baseado no valor pessimista e otimista da duração e do custo, utilizar a função de geração de números aleatórios contínuos do Excel, para gerar o conjunto de valores aleatórios contínuos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4;
- e) determinar a média e o desvio padrão para o conjunto de valores aleatórios contínuos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4;
- f) verificar se o número de amostras dos valores aleatórios contínuos da duração e do custo está adequado conforme o grau de confiança e a margem de erro máximo da estimativa por meio da Equação 4.9;
- g) aplicar a função distribuição normal do Microsoft Excel, que representa uma distribuição de probabilidade contínua cuja forma é

determinada por sua média e desvio padrão. Essa função retorna a probabilidade cumulativa ou acumulada do valor que se deseja;

- h) então, apresentam-se os gráficos da probabilidade cumulativa ou acumulada do risco da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, e
- i) e por fim, apresentam-se os gráficos da densidade da probabilidade da distribuição normal do risco da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.

4.4.2. QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC COM A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Esta seção tem como objetivo realizar a quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC com a técnica da estimativa conjugada.

A quantificação dos riscos é obtida pela técnica da programação estocástica com amostragem direta com o método de Monte Carlo, em que a simulação foi efetuada com o uso da função de distribuição normal do *software* Microsoft Excel, a fim de:

- a) apresentar a probabilidade de ocorrência do valor do custo executado da etapa de AIT do CBERS-4 ser menor do que o valor do custo modelado (mais provável) com a técnica da estimativa conjugada, e
- b) apresentar a probabilidade de ocorrência do valor da duração executada da etapa de AIT do CBERS-4 ser menor do que o valor da duração modelada (mais provável) com a técnica da estimativa conjugada.

Dessa forma, são seguidos os passos da seção 4.4.1 para realizar a quantificação dos riscos da duração e do custo com a técnica da estimativa conjugada, em que a simulação foi realizada com o *software* Microsoft Excel.

4.4.2.1. GERAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DO CBERS-4 COM A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Baseado nas informações utilizadas na cinemática direta do CBERS-4, assume-se o conjunto de valores para a duração e o custo, que são:

- a) duração estimada ou planejada de 151 dias;
- b) variabilidade modelada da duração ($\cos\alpha = 0,35$);
- c) custo estimado ou planejado de 34 especialistas, e
- d) variabilidade modelada do custo ($\cos\beta = 0,45$).

Conforme as Equações 3.11 e 3.12 da técnica da estimativa conjugada, a seguir são apresentados os valores mais prováveis, otimistas e pessimistas para duração e o custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC:

- a) duração modelada ou mais provável de 219 dias, sendo a soma entre a duração estimada de 151 dias e o produto da duração estimada de 151 dias com a variabilidade do custo ($\cos\beta = 0,45$);
- b) duração estimada otimista de 151 dias, sendo a soma entre a duração estimada de 151 dias e o produto da duração estimada de 151 com a variabilidade do custo ($\cos\beta = 0$);

- c) duração estimada pessimista de 296 dias, sendo a soma entre a duração estimada de 151 dias e o produto da duração estimada de 151 dias com a variabilidade do custo ($\text{cosbeta} = 0,95$);
- d) custo modelado ou mais provável de 46 especialistas, sendo a soma entre o custo estimado de 34 especialistas e o produto do custo estimado de 34 especialistas com a variabilidade da duração ($\text{cosalfa} = 0,35$);
- e) custo estimado otimista de 34 especialistas, sendo a soma entre o custo estimado de 34 especialistas e o produto do custo estimado de 34 especialistas com a variabilidade da duração ($\text{cosalfa} = 0$), e
- f) custo estimado pessimista de 67 especialistas, sendo a soma entre o custo estimado de 34 especialistas e o produto do custo estimado de 34 especialistas com a variabilidade da duração ($\text{cosalfa} = 0,95$).

Então, utilizam-se os valores pessimista e otimista da duração para a aplicação da função de geração de números aleatórios contínuos do Excel com 500 amostras ou iterações para a simulação do risco da duração, assim, foram obtidos os valores da média e do desvio padrão:

- a) média de 209 dias para a amostra de 500 iterações dos números aleatórios contínuos da duração, e
- b) desvio padrão de 40,7 dias para a amostra de 500 iterações dos números aleatórios contínuos da duração.

Entretanto, faz-se necessário verificar se as 500 amostras são suficientes para a simulação da probabilidade de ocorrência do risco da duração, portanto, a Equação 4.11 apresenta a estimativa do número mínimo necessário de

amostras ou iterações para a simulação do risco da duração, considerando 99% de grau de confiança (2,575) e a margem de erro máximo da estimativa (5 dias).

$$N = \left(\frac{2,575 \cdot 40,7}{5} \right)^2 \cong 439,3 \text{ amostras} \quad (4.11)$$

Assim, as 500 amostras utilizadas na simulação do risco da duração são suficientes para atender número mínimo necessário de amostras, conforme o grau de confiança (2,575) e a margem de erro máximo da estimativa (5 dias).

E, utilizam-se os valores pessimista e otimista do custo para a aplicação da função de geração de números aleatórios contínuos do Excel com 250 amostras ou iterações para a simulação do risco do custo, assim, foram obtidos os valores da média e do desvio padrão:

- a) média de 53,7 especialistas para a amostra de 250 iterações dos números aleatórios contínuos do custo, e
- b) desvio padrão de 5,9 especialistas para a amostra de 250 iterações dos números aleatórios contínuos do custo.

Entretanto, faz-se necessário verificar se as 250 amostras são suficientes para a simulação da probabilidade de ocorrência do risco do custo, portanto, a Equação 4.12 apresenta a estimativa do número mínimo necessário de amostras ou iterações para a simulação do risco do custo, considerando 99% de grau de confiança (2,575) e a margem de erro máximo da estimativa (1 especialista).

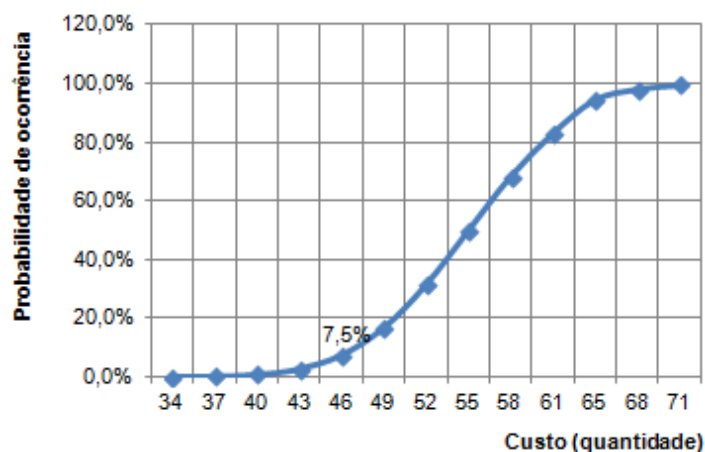
$$N = \left(\frac{2,575 \cdot 5,9}{1} \right)^2 \cong 230,8 \text{ amostras} \quad (4.12)$$

Assim, as 250 amostras utilizadas na simulação do risco do custo são suficientes para atender número mínimo necessário de amostras, conforme o grau de confiança (2,575) e a margem de erro máximo da estimativa (1 especialista).

4.4.2.2. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DOS RISCOS DO CBERS-4 COM A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Com a aplicação da função da distribuição normal do Excel, a Figura 4.13 apresenta o gráfico com a probabilidade cumulativa para a simulação do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4. O gráfico da Figura 4.13 indica a probabilidade de ocorrência estimada de 7,5% de ocorrer um custo menor do que o custo modelado (mais provável) de 46 especialistas.

Figura 4.13. Probabilidade do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

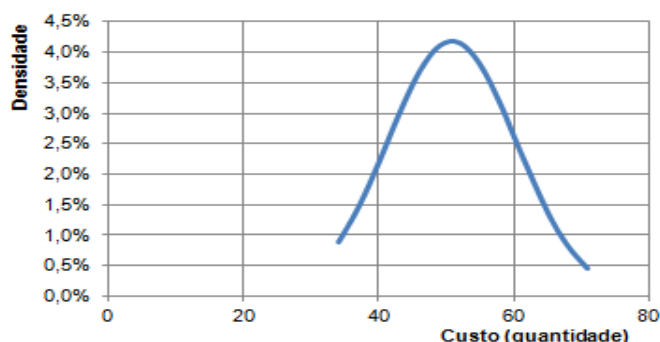
Com base na análise da Figura 4.13, pode-se concluir que a chance do valor do custo executado ser maior do que o valor do custo estimado (mais provável) é de 92,5%, o que foi constatado, pois, o valor do custo executado foi de 49

especialistas, enquanto que o valor do custo estimado (mais provável) foi de 46 especialistas.

E, por fim, apresenta-se o gráfico da densidade da probabilidade da distribuição normal do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.

Conforme a simulação do Excel ilustrada na Figura 4.14, pode-se verificar que a maior densidade da distribuição normal do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, ocorre em torno do valor do custo modelado (mais provável) de 46 especialistas.

Figura 4.14. Distribuição normal do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada.

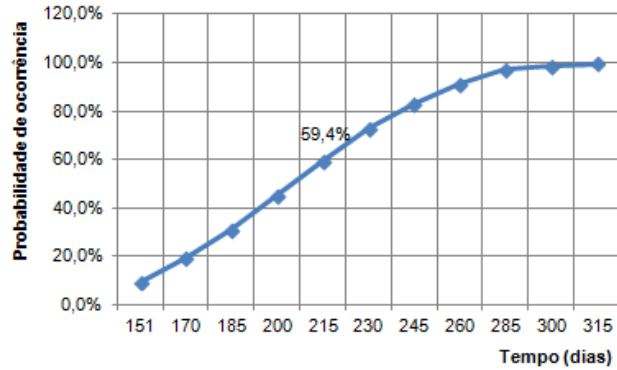


Fonte: Produção do autor (2015).

Após a determinação da probabilidade de ocorrência do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4, novamente aplica-se a função da distribuição normal do Excel para determinar a probabilidade de ocorrência do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4.

O gráfico da Figura 4.15 indica uma probabilidade de ocorrência estimada de 59,4% de ocorrer um valor da duração executada menor do que o valor da duração modelada (mais provável) de 219 dias.

Figura 4.15. Probabilidade do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada.

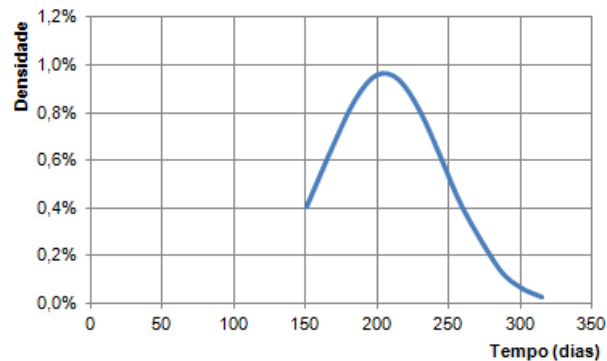


Fonte: Produção do autor (2015).

Com base na análise da Figura 4.15, pode-se concluir que a chance do valor da duração executada ser menor do que o valor da duração estimada (mais provável) é de 59,4%, o que foi constatado, pois, o valor da duração executada foi de 189 dias, e o valor da duração estimada foi de 219 dias.

E a Figura 4.16 apresenta a densidade da probabilidade da distribuição normal do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, em que pode-se verificar que a maior densidade ocorre em torno de 219 dias.

Figura 4.16. Distribuição do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica da estimativa conjugada.



Fonte: Produção do autor (2015).

4.4.3. QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS PARA A ETAPA DE AIT DO CBERS-4 NO BACCC COM A TÉCNICA PERT

Esta seção tem como objetivo realizar a quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC com a técnica PERT. A quantificação dos riscos é obtida pela técnica da programação estocástica com amostragem direta com o método de Monte Carlo, em que a simulação foi efetuada com o uso da função de distribuição normal do *software* Microsoft Excel, a fim de:

- a) apresentar a probabilidade de ocorrência do valor do custo executado da etapa de AIT do CBERS-4 ser menor do que o valor do custo modelado (mais provável) com a técnica PERT, e
- b) apresentar a probabilidade de ocorrência do valor da duração executada da etapa de AIT do CBERS-4 ser menor do que o valor da duração modelada (mais provável) com a técnica PERT.

Dessa forma, são seguidos os passos da seção 4.4.1 para realizar a quantificação dos riscos da duração e do custo com a técnica PERT, em que a simulação foi realizada com o *software* Microsoft Excel.

4.4.3.1. GERAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DO CBERS-4 COM A TÉCNICA PERT

Baseado nas informações utilizadas na cinemática direta do CBERS-4, assume-se o conjunto de valores para a duração e o custo:

- a) duração estimada ou planejada de 151 dias;
- b) variabilidade modelada da duração ($\text{cosalfa} = 0,35$);

- c) custo estimado ou planejado de 34 especialistas, e
- d) variabilidade modelada do custo ($\text{cosbeta} = 0,45$).

Aplicando o conceito da técnica PERT, a seguir são apresentados os valores mais prováveis, otimistas e pessimistas para duração e o custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC:

- a) duração modelada ou mais provável de 204 dias, sendo a soma entre a duração estimada de 151 dias e o produto da duração estimada de 151 dias com a variabilidade da duração ($\text{cosalfa} = 0,35$ ou 35% do valor estimado);
- b) duração estimada otimista de 151 dias, sendo a soma entre a duração estimada de 151 dias e o produto da duração estimada de 151 dias com a variabilidade da duração ($\text{cosalfa} = 0$ ou 0% do valor estimado);
- c) duração estimada pessimista de 296 dias, sendo a soma entre a duração estimada de 151 dias e o produto da duração estimada de 151 dias com a variabilidade da duração ($\text{cosalfa} = 0,95$ ou 95% do valor estimado);
- d) custo modelado ou mais provável de 49 especialistas, sendo a soma entre o custo estimado de 34 especialistas e o produto do custo estimado de 34 especialistas com a variabilidade do custo ($\text{cosbeta} = 0,45$ ou 45% do valor estimado);
- e) custo estimado otimista de 34 especialistas, sendo a soma entre o custo estimado de 34 especialistas e o produto do custo estimado de 34 especialistas com a variabilidade do custo ($\text{cosbeta} = 0$ ou 0% do valor estimado), e

- f) custo estimado pessimista de 67 especialistas, sendo a soma entre o custo estimado de 34 especialistas e o produto do custo estimado de 34 especialistas com a variabilidade do custo (cosbeta = 0,95 ou 95% do valor estimado).

Então, utilizam-se os valores pessimista e otimista da duração para a aplicação da função de geração de números aleatórios contínuos do Excel com 500 amostras ou iterações para a simulação do risco da duração, assim, foram obtidos os valores da média e do desvio padrão:

- a) média de 223 dias para a amostra de 500 iterações dos números aleatórios contínuos da duração, e
- b) desvio padrão de 41,6 dias para a amostra de 500 iterações dos números aleatórios contínuos da duração.

Entretanto, faz-se necessário verificar se as 500 amostras são suficientes para a simulação da probabilidade de ocorrência do risco da duração.

Portanto, a Equação 4.13 apresenta a estimativa do número mínimo necessário de amostras ou iterações para a simulação do risco da duração, considerando 99% de grau de confiança (2,575) e a margem de erro máximo da estimativa (5 dias).

$$N = \left(\frac{2,575 \cdot 41,6}{5} \right)^2 \cong 458,8 \text{ amostras} \quad (4.13)$$

Assim, as 500 amostras utilizadas na simulação do risco da duração são suficientes para atender número mínimo necessário de amostras, conforme o grau de confiança (2,575) e a margem de erro máximo da estimativa (5 dias).

E, utilizam-se os valores pessimista e otimista do custo para a aplicação da função de geração de números aleatórios contínuos do Excel com 600 amostras ou iterações para a simulação do risco do custo, assim, foram obtidos os valores da média e do desvio padrão:

- a) média de 50,1 especialistas para da amostra de 600 iterações dos números aleatórios contínuos do custo, e
- b) desvio padrão de 9,4 especialistas para a amostra de 600 iterações dos números aleatórios contínuos do custo.

Entretanto, faz-se necessário verificar se as 600 amostras são suficientes para a simulação da probabilidade de ocorrência do risco do custo.

Portanto, a Equação 4.14 apresenta a estimativa do número mínimo necessário de amostras ou iterações para a simulação do risco do custo, considerando 99% de grau de confiança (2,575) e a margem de erro máximo da estimativa (1 especialista).

$$N = \left(\frac{2,575 \cdot 9,4}{1} \right)^2 \cong 585,9 \text{ amostras} \quad (4.14)$$

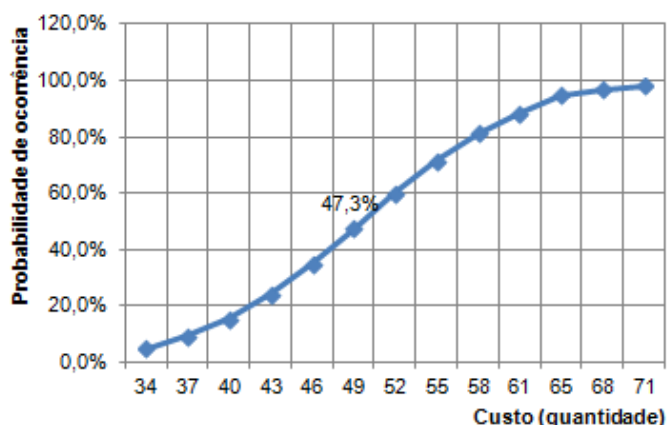
Assim, as 600 amostras utilizadas na simulação do risco do custo são suficientes para atender número mínimo necessário de amostras, conforme o grau de confiança (2,575) e a margem de erro máximo da estimativa (1 especialista).

4.4.3.2. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DOS RISCOS DO CBERS-4 COM A TÉCNICA PERT

Com a aplicação da função da distribuição normal do Excel, a Figura 4.17 apresenta o gráfico com a probabilidade cumulativa para a simulação do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4.

O gráfico da Figura 4.17 indica a probabilidade de ocorrência estimada de 47,3% de ocorrer um custo executado menor do que o valor do custo modelado (mais provável) de 49 especialistas.

Figura 4.17. Probabilidade do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica PERT.



Fonte: Produção do autor (2015).

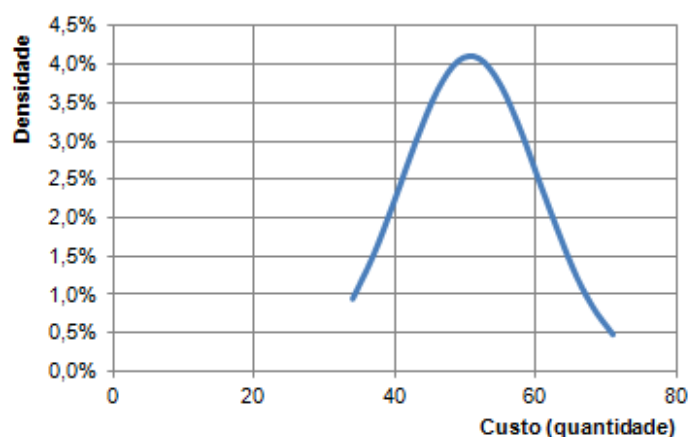
Com base na análise da Figura 4.17, pode-se concluir que a chance do valor do custo executado ser maior do que o valor do custo estimado (mais provável) é de 52,7%, ou seja, bem próximo de uma indefinição com 50% de chance do valor do custo executado ser maior do que o valor do custo estimado, e com 50% do valor do custo executado ser menor do que o valor do custo estimado.

O que foi constatado, pois, o valor do custo executado foi de 49 especialistas, enquanto que o valor do custo estimado (mais provável) também foi de 49 especialistas.

E por fim, apresenta-se o gráfico da densidade da probabilidade da distribuição normal do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC.

Conforme a simulação do Excel ilustrada na Figura 4.18, pode-se verificar que a maior densidade da distribuição normal do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, ocorre em torno de 49 especialistas.

Figura 4.18. Distribuição normal do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica PERT.

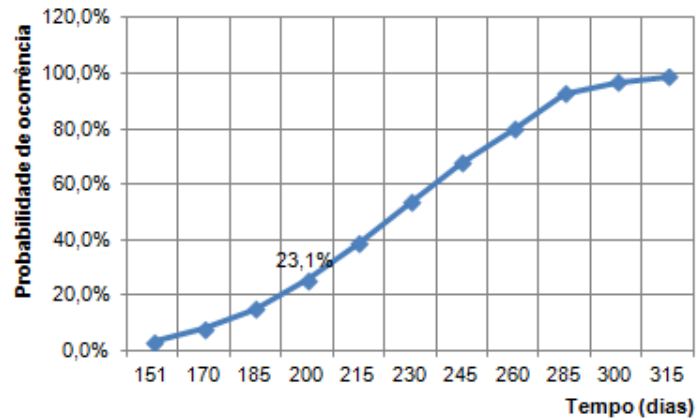


Fonte: Produção do autor (2015).

E, a Figura 4.19 apresenta o gráfico com a probabilidade cumulativa para a simulação do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4.

O gráfico indica uma probabilidade de ocorrência estimada de 23,1% de ocorrer uma duração executada menor do que o valor da duração modelada (mais provável) de 204 dias.

Figura 4.19. Probabilidade do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica PERT.

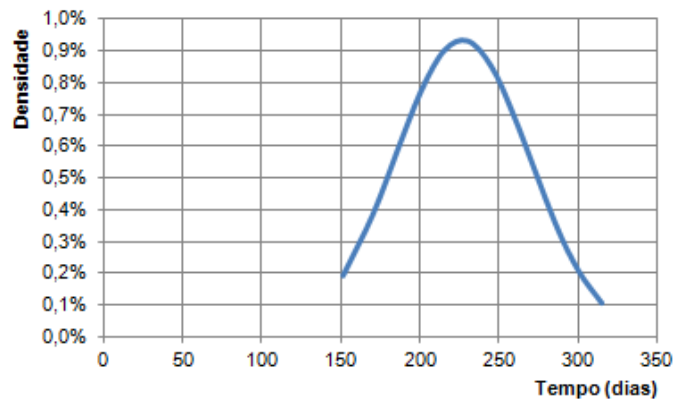


Fonte: Produção do autor (2015).

Com base na análise da Figura 4.19, pode-se concluir que a chance do valor da duração executada ser maior do que o valor da duração estimada (mais provável) é de 76,9%. Entretanto, foi constatado que o valor da duração executada foi de 189 dias, enquanto que o valor da duração estimada foi de 204 dias.

E, apresenta-se o gráfico da densidade da probabilidade da distribuição normal do risco da duração, conforme a simulação do Excel ilustrada na Figura 4.20, em que, pode-se verificar que a maior densidade ocorre em torno de 204 dias.

Figura 4.20. Distribuição do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 com a técnica PERT.



Fonte: Produção do autor (2015).

4.4.4. ANÁLISE DA QUANTIFICAÇÃO DOS RISCOS DO AIT DO CBERS-4 ENTRE AS TÉCNICAS DA ESTIMATIVA CONJUGADA E PERT

Esta seção tem como objetivo analisar os resultados da quantificação dos riscos da duração e do custo da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC entre as técnicas da estimativa conjugada e do PERT.

A quantificação dos riscos é obtida pela técnica da programação estocástica com amostragem direta com o método de Monte Carlo, em que a simulação foi efetuada com o uso da função de distribuição normal do *software* Microsoft Excel, a fim de:

- a) apresentar e analisar as probabilidades de ocorrências do custo executado da etapa de AIT do CBERS-4 ser menor do que o custo estimado (mais provável) de 46 especialistas para a técnica da estimativa conjugada, e ser menor do que o custo estimado (mais provável) de 49 especialistas para a técnica do PERT, e
- b) apresentar e analisar as probabilidades de ocorrências da duração executada da etapa de AIT do CBERS-4 ser menor do que a duração estimada (mais provável) de 219 dias para a técnica da estimativa conjugada, e ser menor do que a duração estimada (mais provável) de 204 dias com a técnica do PERT.

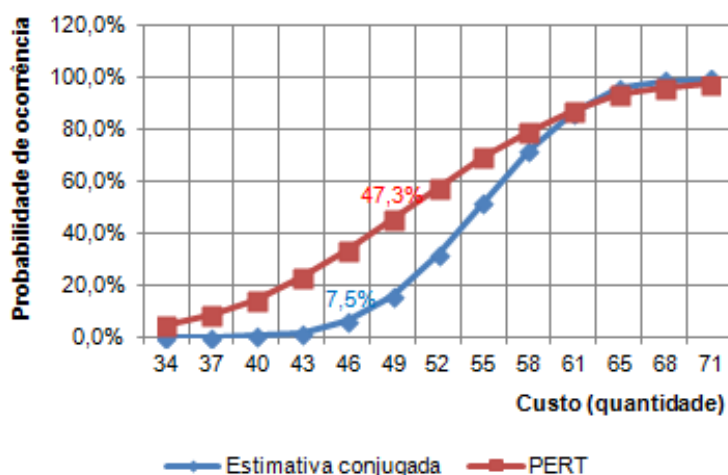
4.4.4.1. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO RISCO DO CUSTO DO CBERS-4 ENTRE AS TÉCNICAS DA ESTIMATIVA CONJUGADA E PERT

Com a aplicação da função da distribuição normal do Excel, a Figura 4.21 apresenta o gráfico com a probabilidade cumulativa para a simulação do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4.

O gráfico na cor azul é referente à técnica da estimativa conjugada e apresenta uma probabilidade de ocorrência estimada de 7,5% de ocorrer um custo executado menor do que o valor do custo estimado (mais provável) de 46 especialistas.

Enquanto que o gráfico na cor vermelha é referente à técnica PERT e apresenta uma probabilidade de ocorrência estimada de 47,3% de ocorrer um custo executado menor do que o custo estimado (mais provável) de 49 especialistas.

Figura 4.21. Probabilidade do risco do custo da etapa de AIT do CBERS-4 entre as técnicas da estimativa conjugada e PERT.



Fonte: Produção do autor (2015).

Com base no valor do custo executado de 49 especialistas da etapa de AIT do CBERS-4 no BACCC, para este exemplo, destacam-se os comentários a seguir:

- a) a técnica da estimativa conjugada apresentou uma probabilidade de ocorrência estimada de 7,5% de ocorrer um custo executado menor do que o custo estimado (mais provável) de 46 especialistas;
- b) a técnica PERT apresentou uma probabilidade de ocorrência estimada de 47,3% de ocorrer executado um custo menor do que o custo estimado (mais provável) de 49 especialistas, e
- c) portanto, a técnica da estimativa conjugada é mais adequada, pois, apresentou uma probabilidade de ocorrência de 7,5% do valor do custo executado ser menor do que o valor do custo estimado (mais provável). Em que, pode-se constatar que o valor do custo executado foi de 49 especialistas, enquanto que o valor do custo estimado (mais provável) foi de 46 especialistas.

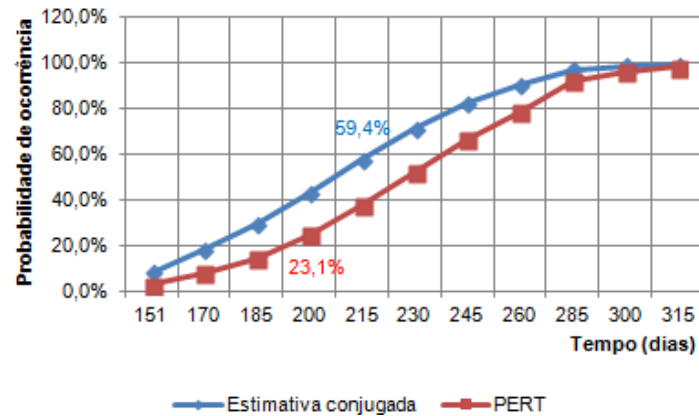
4.4.4.2. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO RISCO DA DURAÇÃO DO CBERS-4 ENTRE AS TÉCNICAS DA ESTIMATIVA CONJUGADA E PERT

Com a aplicação da função da distribuição normal do Excel, a Figura 4.22 apresenta o gráfico com a probabilidade cumulativa para a simulação do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4.

O gráfico na cor azul é referente à técnica da estimativa conjugada e apresenta uma probabilidade de ocorrência estimada de 59,4% de ocorrer uma duração executada menor do que o valor da duração estimada (mais provável) de 219 dias.

Enquanto que o gráfico na cor vermelha é referente à técnica PERT e apresenta uma probabilidade de ocorrência estimada de 23,1% de ocorrer uma duração executada menor do que o valor da duração estimada (mais provável) de 204 dias.

Figura 4.22. Probabilidade do risco da duração da etapa de AIT do CBERS-4 entre as técnicas da estimativa conjugada e PERT.



Fonte: Produção do autor (2015).

Com base no valor da duração executada de 189 dias da etapa de AIT do CBERS-4 no BACC, para este exemplo, destacam-se os comentários a seguir:

- a) a técnica da estimativa conjugada apresentou uma probabilidade de ocorrência estimada de 59,4% de ocorrer uma duração executada menor do que o valor da duração estimada (mais provável) de 189 dias;
- b) a técnica PERT apresentou uma probabilidade de ocorrência estimada de 23,1% de ocorrer uma duração executada menor do que o valor da duração estimada (mais provável) de 189 dias, e
- c) portanto, a técnica da estimativa conjugada é mais adequada, pois, apresentou uma probabilidade de ocorrência de 59,4% do valor da duração executada ser menor do que o valor da duração estimada (mais provável). Em que, pode-se constatar que o valor da duração executada foi de 189 dias, enquanto que o valor da duração estimada (mais provável) foi de 219 dias.

5 DISCUSSÕES SOBRE A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA DOS PROJETOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais avaliações e discussões sobre a técnica da estimativa conjugada dos projetos apresentada nesta tese, conforme os assuntos a seguir:

- a) promover a discussão sobre a implementação da técnica da estimativa conjugada no planejamento dos projetos;
- b) comparar a técnica da estimativa conjugada com as demais técnicas, a fim de ressaltar as principais vantagens da estimativa conjugada, e
- c) sintetizar as observações e as limitações da técnica da estimativa conjugada apresentada nesta de tese.

5.1. DISCUSSÃO SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Para a efetiva implementação da técnica da estimativa conjugada no planejamento do cronograma, orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos, independente do tipo ou segmento da organização, a equipe do projeto deve fomentar e seguir os processos dos ativos organizacionais que promovem o apoio necessário para utilizar a técnica da estimativa conjugada, podendo destacar os processos dos ativos organizacionais descritos a seguir:

- a) a determinação dos tipos de recursos, custos e durações das atividades do projeto deve ser parte dos ativos organizacionais;
- b) a definição das variabilidades das durações e dos custos das atividades do projeto deve ser parte dos ativos organizacionais, e

- c) o critério do valor do fator crítico das atividades do projeto deve ser parte dos ativos organizacionais.

De forma geral, existem duas situações em que a técnica da estimativa conjugada pode ser aplicada, conforme descrito abaixo:

- a) na configuração da cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada, a partir dos valores planejados e executados das durações e dos custos, aplicando as Equações 3.11 e 3.12 são modelados os valores das variabilidades das durações e dos custos do projeto. Essas variabilidades podem ser utilizadas como ativos organizacionais para o planejamento de cronogramas, orçamentos e quantificação dos riscos de projetos futuros, e
- b) na configuração da cinemática direta da técnica da estimativa conjugada, a partir dos valores planejados das durações e dos custos e dos valores das variabilidades das durações e dos custos, aplicando as Equações 3.11 e 3.12 são modelados os valores das durações e dos custos do projeto. Esses valores das durações e dos custos são utilizados no planejamento de cronogramas, orçamentos e quantificação dos riscos do projeto.

Com base nos ativos organizacionais, como a estrutura analítica do projeto, árvore do produto, calendário de recursos, diagrama de precedências, identificação e análise qualitativa dos riscos, entre outros, as Equações 3.11 e 3.12 da técnica da estimativa conjugada devem ser utilizadas com o propósito de colaborar e aprimorar com o planejamento do cronograma, orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos.

5.2. COMPARAÇÃO ENTRE A TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA E AS DEMAIS TÉCNICAS DE ESTIMATIVAS

Pode-se afirmar que, independente do tipo de indústria ou setor, as técnicas de estimativas são necessárias e estratégicas no processo de planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos (incertezas aleatórias) dos projetos.

Assim, esta seção tem como objetivo destacar as principais diferenças e vantagens da técnica da estimativa conjugada em relação às técnicas, modelos, métodos e abordagens apresentadas no Capítulo 2.

Dessa forma, as principais colaborações da técnica da estimativa conjugada são apresentadas a seguir:

- a) a demais técnicas estão concentradas no ambiente da pesquisa operacional e da programação de máquinas (HANS et al., 2007; BESIKCI et al., 2015), enquanto que a técnica da estimativa conjugada apresenta um método de estimativas e quantificação dos riscos sobre a perspectiva do gerenciamento dos projetos;
- b) as técnicas de estimativas atuais são baseadas nos modelos estocástico do RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*) por meio de simulações computacionais com o objetivo de determinar a probabilidade de ocorrências destas incertezas tratadas como variáveis aleatórias para a programação de projetos (HERROELEN; LEUS, 2005; BESIKCI et al., 2015). Na técnica da estimativa conjugada apresentada nesta tese, o diagrama de precedências do projeto é considerado como uma cadeia cinemática (aberta, fechada e/ou híbrida) e representado em um sistema de coordenadas bidimensional (tempo e custo), cujas formulações matemáticas envolvem as durações e os custos planejados e executados, bem como suas variabilidades ou incertezas aleatórias;

- c) os projetos estão frequentemente sujeitos a muitas fontes de incertezas durante a execução, mas, a maioria das técnicas de estimativas tratam apenas de uma fonte de incerteza, sendo geralmente a duração da atividade do projeto (MARAVAS; PANTOUVAKIS, 2012; BESIKCI et al., 2015). Enquanto que a técnica da estimativa conjugada considera como fonte de incertezas aleatórias os vários tipos de durações e os custos dos projetos;
- d) Herroelen e Leus (2005) ressaltam a necessidade da geração de um planejamento proativo em combinação com os mecanismos de reparos reativos. Assim, a técnica da estimativa conjugada proporciona essa combinação entre os métodos proativos e reativos, pois, as configurações da cinemática direta e inversa proporcionam o *trade-off* entre as durações e os custos do projeto ou entre vários projetos em um ambiente de multiprojetos, e
- e) o diagrama de precedência dos projetos é representado, principalmente, por redes do tipo atividade no nó, entretanto, essa representação é insuficiente ou inadequada quando as atividades do projeto possuem um conjunto de atributos (GODINHO; BRANCO, 2012; CREEMERS et al., 2015). Assim, na técnica da estimativa conjugada os atributos das atividades do projeto são representados com o modelo funcional da linguagem IDEF0.

5.3. OBSERVAÇÕES E LIMITAÇÕES DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA

Esta seção tem como objetivo apresentar as observações, as restrições e as limitações da técnica da estimativa conjugada para as atividades do planejamento do cronograma, orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos, conforme descrito abaixo:

- a) esta tese apresentou um modelo analítico para ser aplicado no planejamento dos projetos, mais precisamente na modelagem das estimativas de durações e custos para serem utilizados no planejamento de cronogramas, orçamentos da quantificação dos riscos (incertezas aleatórias) dos projetos;
- b) deve-se ressaltar que um modelo é uma representação da realidade ou de um fenômeno social, portanto, os resultados modelados do projeto devem ser analisados criticamente pela equipe de planejamento do projeto, a fim de garantir a compatibilidade dos resultados e a confiabilidade do cronograma, orçamento e da quantificação dos riscos dos projetos;
- c) entre os tipos e as fontes de incertezas, esta tese considerou apenas a incerteza do tipo aleatória ou variabilidade das durações e dos custos dos projetos;
- d) vale ressaltar que estas incertezas aleatórias ou variabilidades estão mais presentes na fase de planejamento do projeto e diminuem ao longo da execução do projeto, sendo que, a formulação matemática desenvolvida por esta tese comprovou que a incerteza aleatória do custo influencia a estimativa da duração e que a incerteza aleatória da duração influencia a estimativa do custo do projeto;
- e) a técnica da estimativa conjugada foi implementada e verificada ao final da fase D do ciclo de vida dos satélites CBERS-3 e 4, mais precisamente antes da revisão de aceitação dos satélites. Esta tese optou em utilizar os satélites da segunda geração do programa CBERS, pois, atualmente representam o principal projeto de desenvolvimento do INPE na área de satélites de observação da Terra, e por causa da facilidade em obter as informações das durações e dos custos planejados dos satélites CBERS-3 e 4;

- f) para a implementação da técnica da estimativa conjugada é requerido que a organização esteja comprometida com a determinação e manutenção de políticas para a identificação dos tipos das durações e dos custos, de suas variabilidades, bem como dos fatores críticos das atividades dos projetos;
- g) a técnica da estimativa conjugada foi implementada e verificada em exemplos de projetos conhecidos (satélites CBERS-3 e 4) com contexto e escopo similares, entretanto, a técnica apresenta potencial para ser utilizada em projetos inéditos;
- h) a técnica da estimativa conjugada foi implementada e verificada em exemplos de projetos conhecidos (satélites CBERS-3 e 4) com diagramas de precedências na configuração da cadeia cinemática aberta. Porém, a técnica pode ser utilizada em projetos com diagramas de precedências também na configuração da cadeia cinemática fechada e/ou híbrida;
- i) para a quantificação de como a variabilidade do tempo influencia no tempo modelado, a sugestão desta tese é que seja empregada a técnica da estimativa conjugada com outra técnica, por exemplo o PERT que apresenta a estimativa do tempo com base em sua variabilidade, e
- j) para a quantificação de como a variabilidade do custo influencia no custo modelado, a sugestão desta tese é que seja empregada a técnica da estimativa conjugada com outra técnica, por exemplo o PERT que apresenta a estimativa do custo com base em sua variabilidade.

6 CONCLUSÕES

Com a apresentação da técnica da estimativa conjugada para o planejamento dos projetos, esta tese cumpriu seus objetivos, de forma que desenvolveu, implementou e verificou um novo método para apoiar o planejamento de cronogramas, orçamentos e da quantificação dos riscos (incertezas aleatórias) dos projetos.

O desenvolvimento da formulação matemática da técnica da estimativa conjugada foi baseado no conceito da cinemática dos manipuladores robóticos, sendo que, o diagrama de precedências do projeto foi considerado com uma cadeia cinemática, que pode estar na configuração aberta (série), fechada (paralela) e/ou híbrida.

As atividades do diagrama de precedências do projeto são representadas por pares de pontos em um sistema de coordenadas bidimensional, cuja abscissa é o tempo ou a duração e a ordenada é o custo. Assim, a técnica da estimativa conjugada proporciona ferramentas analíticas e gráficas para:

- a) modelar o relacionamento entre a duração executada ou modelada, a duração planejada ou estimada e a variabilidade do custo entre duas atividades do diagrama de precedência do projeto;
- b) modelar o relacionamento entre o custo executado ou modelado, o custo planejado ou estimado e a variabilidade da duração entre duas atividades fases do diagrama de precedência do projeto, e
- c) proporcionar um planejamento efetivo para o cronograma e o orçamento do projeto, por meio das ferramentas do gráfico bidimensional (tempo e custo) e dos gráficos de análises de *trade-offs* entre duas atividades do diagrama de precedência do projeto.

Assim, o principal interesse da técnica da estimativa conjugada é a descrição espacial da atividade fim do projeto em relação ao sistema de coordenadas bidimensional (tempo e custo) de referência, que possui como origem a atividade de início do projeto.

Portanto, a técnica da estimativa conjugada pode ser considerada como um artefato para o planejamento do cronograma, do orçamento e da quantificação dos riscos de projetos, oferecendo as vantagens descritas abaixo:

- a) a partir dos valores estimados ou planejados das durações e dos custos e dos valores de suas variabilidades, aplicando a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, modelam-se os valores executados ou previstos para as durações e os custos do projeto;
- b) a partir dos valores estimados ou planejados das durações e dos custos e de seus valores executados ou modelados, aplicando a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada, modelam-se as variabilidade das durações e dos custos do projeto, e
- c) a partir dos métodos de programação estocástica que usam amostragem direta ou que não usam amostragem direta e dos valores modelados por meio da técnica da estimativa conjugada, com o uso de simulações computacionais são geradas as estimativas da probabilidade de ocorrência dos riscos dos projetos.

6.1. RECOMENDAÇÕES

E por fim, a seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros, com o propósito de continuação da linha de pesquisa tratada nesta tese.

Vale ressaltar que estas sugestões são frutos da opinião do autor desta tese, das observações e colaborações dos professores que participaram das bancas ao longo do cumprimento das exigências do programa de pós-graduação do INPE, bem como dos diversos colegas do LIT, que gentilmente, colaboraram com a oferta das informações sobre o planejamento e a execução dos satélites CBERS-3 e 4 durante a campanha de lançamento no centro espacial chinês.

A seguir são apresentadas as sugestões para continuação desta tese:

- a) sistematização da técnica da estimativa conjugada em um *software*, de forma a automatizar os processos da cinemática direta e inversa e da quantificação dos riscos, bem como da geração dos gráficos bidimensional e da análise de *trade-off*;
- b) aprofundamento da identificação dos tipos das durações e dos custos e suas variabilidades, com o propósito de aprimorar a formulação matemática da técnica da estimativa conjugada;
- c) desenvolver formulação matemática das variabilidades das durações e dos custos por meio do produto vetorial, em que as incertezas aleatórias são representadas com os conceitos do Torque da Mecânica Clássica;
- d) desenvolver formulação para a dinâmica do projeto a fim de proporcionar a modelagem da duração e do custo conforme a alteração de suas variabilidades ao longo do tempo;
- e) fomentar a identificação dos valores dos fatores críticos das fontes de incertezas, a fim de melhor adequar a técnica da estimativa conjugada;
- f) estabelecer um processo de validação da técnica da estimativa conjugada com a utilização de conjuntos de dados de projetos por meio de simulações computacionais de forma a comparar os

resultados estimados da técnica proposta nesta tese e os resultados modelados com uma ou mais técnicas apresentadas no Capítulo 2;

- g) a técnica da estimativa conjugada foi desenvolvida para atividades com precedências do tipo término-início, desta forma, fica a oportunidade da implementação com outros tipos de precedências, como início-início, término-término, início-término, bem como, com técnicas de antecipação ou atraso da precedência entre as atividades, e
- h) e por fim, desenvolver, implementar e verificar uma formulação matemática envolvendo a duração, o custo, e a performance, bem como suas respectivas variabilidades, de forma a modelar o relacionamento em um sistema de coordenadas tridimensionais (tempo, custo e performance).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUTALEBI, R. S.; NAJAFI, A. A.; GHORASHI, B. Solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem using two multi objective evolutionary algorithms. **African Journal of Business Management**, v. 6, pp. 4057–4065, 2012.

ALEXANDER, L. Successfully implementing strategic decision. **Long Range Planning**, v. 18, n. 3, pp 91-97, 1985.

ARANDA, J. L. E.; RÓDENAS, R. G.; FLORES, M. C. R.; GARCÍA, M. L. L.; ÂNGULO, E. High-speed railway scheduling based on user preferences. **European Journal of Operational Research**, v. 246, pp. 772-786, 2015.

ARCHER, S. **Stochastic resource constrained project scheduling with stochastic task insertions problems**. PhD Thesis, University of Central Florida, Orlando, Florida, 2008.

ARRUDA, H. H. **Programação de projetos sob restrições de recursos e incertezas com utilização de lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

ATKINSON, R.; CRAWFORD, L.; WARD, S. Fundamental uncertainties in projects and the scope of project management. **International Journal of Project Management**, v. 24, pp. 687–698, 2006.

BABUSKA, I.; TEMPONE, R.; ZOURARIS, G. E. Galerkin Finite Element Approximations of Stochastic Elliptic Partial Differential Equations. **SIAM Journal on Numerical Analysis**, v. 42, n. 2, pp. 800–825, 2004.

BACH, L.; GENDREAU, M.; WØHLK, S. Freight railway operator timetabling and engine scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 241, pp. 309-319, 2015.

BALUJA, S. **Population-Based incremental learning: a method for integrating genetic search based function optimization and competitive learning**. Carnegie Mellon University, 1994. Technical Report.

BARTELS, J. H.; ZIMMERMANN, J. Scheduling tests in automotive R&D projects. **European Journal of Operational Research**, v. 193, pp. 805-819, 2009.

BEANE, T. P.; ENNIS, D. M. Market Segmentation: a review. **European Journal of Marketing**, v. 21, pp. 20-42, 1987.

BEERBÜHL, S. S.; FRÖHLING, M.; SCHULTMANN, F. Combined scheduling and capacity planning of electricity-based ammonia production to integrate renewable energies. **European Journal of Operational Research**, v. 241, pp. 851-862, 2015.

BENAVIDES, A. J.; RITT, M.; MIRALLES, C. Flow shop scheduling with heterogeneous workers. **European Journal of Operational Research**, v. 237, pp. 713-720, 2014.

BERGH, J. V.; BELIËN, J.; BRUECKER, P.; DEMEULEMEESTER, E.; BOECK, L. Personnel scheduling: A literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 226, pp. 367–385, 2013.

BERGHMAN, L.; LEUS, R. Practical solutions for a dock assignment problem with trailer transportation. **European Journal of Operational Research**, v. 246, pp. 787-799, 2015.

BESIKCI, U.; BILGE, U.; ULUSOY, G. Multi-mode resource constrained multi-project scheduling and resource portfolio problem. **European Journal of Operational Research**, v. 240, pp. 22–31, 2015.

BIDOT, J. **A general framework integrating techniques for scheduling under uncertainty**. PhD thesis, Toulouse Polytechnique National Institute, 2005.

BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. **European Journal of Operational Research**, v. 202, pp. 15-627, 2010.

BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. **European Journal of Operational Research**, v. 244, pp. 675-689, 2015.

BOCTOR, F. F. Heuristics for scheduling projects with resource restrictions and several resource-duration modes. **International Journal of Production Research**, v. 31, n. 11, pp. 2547-2558, 1993.

BRESINA, J.; DEARDEN, R.; MEULEAU, N.; SMITH, D.; WASHINGTON, R. Planning under continuous time and resource uncertainty: A challenge for AI. In: CONFERENCE ON UNCERTAINTY IN AI, 19., 2002, Edmonton. **Proceedings...** Edmonton Alberta, 2002, p. 77-84.

BRISKORN, D.; CHOI, B. C.; LEE, K. LEUNG, J.; PINEDO, M. Complexity of single machine scheduling subject to nonnegative inventory constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 207, pp. 605–619, 2010.

BRCIC, M.; KALPIC, D.; FERTALJ, K. Resource Constrained Project Scheduling under Uncertainty: A Survey. In: CENTRAL EUROPEAN CONFERENCE ON INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS, 23., 2012, Varazdin, Croatia. **Proceedings...** Varazdin: University of Zagreb, 2012. p. 401-409.

BROWNING, T. R.; YASSINE, A. A. Resource-Constrained Multi-Project Scheduling: Priority Rule Performance Revisited. **International Journal of Production Economics**, v. 126, n. 2, pp. 212-228, 2010.

BUSTOS, O. H.; FRERY, A. C. **Simulação estocástica**: teoria e algoritmos. Rio de Janeiro: IMPA, 1992.

CAMPOS, A.; BUDDE, C.; HESSELBACH, J. A type synthesis method for hybrid robot structures. **Mechanism and Machine Theory**, v. 43, p. 984–995, 2008.

CAPEK, R.; SUCHA, P.; HANZALEK, Z. Production scheduling with alternative process plans. **European Journal of Operational Research**, v.217, pp. 300-311, 2012.

CHEN, C. T.; ASKIN, R. G. Project Selection, Scheduling and Research Allocation with Time Dependent Returns. **European Journal of Operational Research**, v. 193, n. 1 pp. 23-34, 2009.

CHEN, L.; LANGEVIN, A.; LU, Z. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal. **European Journal of Operational Research**, v. 225, pp. 142-152, 2013.

CHIN, K.S.; ZU, X.; MOK, C.K.; TAM, H.Y. Integrated integration definition language (IDEF0) and colored Petri nets (CPN) modeling and simulation tool: a study on mould-making process. **International Journal of Production Research**, v. 44, pp. 3179–3205, 2006.

CHO, H.; LEE, I. Integrated framework of IDEF modeling methods for structured design of shop floor control systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 12, n. 2, pp. 113-128, 1999.

CIURANA, J.; GARCIA-ROMEUA, M. L.; FERRER, I.; CASADESUS, S. M. A model for integrating process planning and production planning and control in machining processes. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, n. 4, pp. 532-544, 2008.

COELHO, J.; VANHOUCHE, M. Multi-mode resource-constrained project scheduling using RCPSP and SAT solvers. **European Journal of Operational Research**, v. 213, pp. 73–82, 2011.

CONTADOR, J. L. **Gerenciamento de projetos com PERT/CPM**. In: _____. Gestão de operações. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1997.

CRAIG, J. J. **Introduction to robotics – mechanical and control**. 3. ed. Prentice Hall, 2004. Hardcover.

CRAWFORD, L. Balancing strategy and delivery: the executive view. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 119, n. 19, pp. 857-866, 2014.

CREEMERS, S.; REYCK, B.; LEUS, R. Project planning with alternative technologies in uncertain environments. **European Journal of Operational Research**, v. 242, pp. 465–476, 2015.

CRITCHLOW, A. **Introduction to robotics**. New York. Macmillan, 1985.

CUKIERMAN, Z. S. O. **Modelo PERT/CPM aplicado a projetos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Riechmann & Affonso, 2000.

DAY, G. S.; SCHOEMAKER, P. J.; GUNTHER, R. E. **Gestão de tecnologias emergentes: a visão da Wharton School**. Porto Alegre: Bookman, 2003.

DASGUPTA, B.; MRUTHYUNJAYA, T. S. The Stewart platform manipulator: a review. **Mechanism and Machine Theory**, v. 25, p. 15–40, 2000.

DEMEULEMEESTER, E. L.; HERROELEN, W. S. An Efficient Optimal Solution Procedure for the Preemptive Resource-Constrained Scheduling Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 90, n. 2, pp. 334-348, 1996.

DEVROYE, L. **Non-uniform random variate generation**. New York: Springer-Verlag, 1986.

DUFFY, M. **Managing projects**. 6. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. **ECSS-M-ST-10C**. Space project management - project planning and implementation. 2008.

_____. **ECSS-M-ST-60C**. Space project management – cost and schedule management. 2008.

ELISHAKOFF, I.; REN, Y.; SHINOZUKA, M. Improved finite element method for stochastic problems. **Chaos, Solitons and Fractals**, v. 5, n. 5, pp. 833 – 846, 1995.

ELMAGHRABY, S. E. On the fallacy of averages in project risk management. **European Journal of Operational Research**, v. 165, pp. 307–313, 2005.

ENBERG, C. Enabling knowledge integration in competitive R&D projects - The management of conflicting logics. **International Journal of Project Management**, v. 30, n. 7, pp. 771-780, 2012.

EVANS, J. R.; OLSON, D. L. **Introduction to simulation and risk analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

FENTON, N. E.; PFLEEGER, S. L. **Software metrics**: a rigorous and practical approach. Boston: PWS Publishing, 1997.

FIGIELSKA, E. A heuristic for scheduling in a two-stage hybrid flowshop with renewable resources shared among the stages. **European Journal of Operational Research**, v. 236, pp. 433-444, 2014.

FU, K. S.; GONZALEZ, R. C.; LEE, C. S. G. **Robotics**: control, sensing, vision and intelligence. New York, McGraw-Hill book company, 1987.

GERSTL, E.; MOSHEIOV, G. Due-window assignment with identical jobs on parallel uniform machines. **European Journal of Operational Research**, v. 229, pp. 41-47, 2013.

GHADDAR, B.; SAWAYA, J. N.; KISHIMOTO, A.; TAHERI, N.; ECK, B. A Lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. **European Journal of Operational Research**, v. 241, pp. 490-501, 2015.

GHAREHGOZLI, A. H.; YU, Y.; KOSTER, R.; UDDING, J. T. An exact method for scheduling a yard crane. **European Journal of Operational Research**, v. 235, pp. 431-447, 2014.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. 8. reimpressão. São Paulo: Atlas, 2006.

GO, H.; KIM, J. S.; LEE, D. H. Operation and preventive maintenance scheduling for containerships: Mathematical model and solution algorithm. **European Journal of Operational Research**, v. 229, pp. 626-636, 2013.

GODINHO, P.; BRANCO, F. G. Adaptive Policies for Multi-Mode Project Scheduling under Uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n. 3, pp. 553-562, 2012.

GOEL, A.; MEISEL, F. Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization. **European Journal of Operational Research**, v. 231, pp. 210-228, 2013.

GOEL, V.; SLUSKY, M.; HOEVE, W. J.; FURMAN, K. C.; SHAO, Y. Constraint programming for LNG ship scheduling and inventory management. **European Journal of Operational Research**, v. 241, pp. 662-673, 2015.

GOLDRATT, E. M. **Critical chain**. Massachusetts, USA: North River Press, 1997.

GONZALEZ, P. P.; FRAMINAN, J. M. A common framework and taxonomy for multicriteria scheduling problems with interfering and competing jobs: Multi-agent scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 235, pp. 1–16, 2014.

GRAY, N. S. Secrets to creating the elusive accurate estimate. **PM Network**, v. 15, n. 8, p. 56-64, 2001.

GRUNDY, T. Strategy Implementation and Project Management. **International Journal of Project Management**, v. 16, n. 1, pp. 43-50, 1998.

HANS, E. W.; HERROELEN, W.; LEUS, R.; WULLINK, G. A Hierarchical Approach to Multi-Project Planning under Uncertainty. **The International Journal of management Science**, v. 35, n. 5, pp. 563-577, 2007.

HAO, J.; LIU, M.; JIANG, S.; WU, C. A soft decision based two layered scheduling approach for uncertain steelmaking continuous casting process. **European Journal of Operational Research**, v. 244, pp. 966-979, 2015.

HARTMANN, S.; BRISKORN, D. A Survey of Variants and Extensions of the Resource Constrained Project Scheduling Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 207, n. 1, pp. 1-14, 2010.

HASSANZADEH, F.; NEMATI, H.; SUN, M. Robust optimization for interactive multiobjective programming with imprecise information applied to R&D project portfolio selection. **European Journal of Operational Research**, v. 238, n. 1, pp. 41-53, 2014.

HERROELEN, W.; REYCK, B.; DEMEULEMEESTER, E. Resource-constrained project scheduling: A survey of recent developments. **Computers & Operations Research**, v. 25, pp. 279–302, 1998.

HERROELEN, W.; LEUS, R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials, **European journal of operational research**, v. 165, n. 2, pp. 289- 306, 2005.

HILLSON, D. **Effective opportunity management for projects**: exploiting positive risk. Taylor and Francis Group, 2004.

HOSSEININASAB, S. M.; BOUSHEHRI, S. N. S. Integration of selecting and scheduling urban road construction projects as a time dependent discrete network design problem. **European Journal of Operational Research**, v. 246, pp. 762-771, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Plano Diretor 2011 – 2015**. São José dos Campos: Ministério da Ciência, Tecnologia e Informação, 2011.

ISO 10006. **Diretrizes para o Gerenciamento da Qualidade de Projetos**. International Organization for Standardization. 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION..**ISO 21500 - ORIENTAÇÕES SOBRE GERENCIAMENTO DE PROJETOS**. 2012.

JAEHN, F.; NEUMANN, S. Airplane boarding. **European Journal of Operational Research**, v. 244, pp. 339-359, 2015.

JIANG, C.; ZHANG, Z. G.; ZHANG, Q. F.; HAN, X.; XIE, H.C.; LIU, J. A new nonlinear interval programming method for uncertain problems with dependent interval variables. **European Journal of Operational Research**, v. 238, pp. 245–253, 2014.

JONES, C. **Estimating software costs**. New York: McGraw-Hill, 1998.

KAN, S. H. **Metrics and models in software quality engineering**. Boston: AddisonWesley, 1995.

KASTOR, A.; SIRAKOULIS, K. The Effectiveness of Resource Levelling Tools for Resource Constraint Project Scheduling Problem. **International Journal of Project Management**, v. 27, pp. 493-500, 2009.

KERZNER, H. **Project Management: a system approach to planning, scheduling and controlling**. 10. ed. John Wiley & Sons Inc, 2009.

KHOO, L. P.; ANG, C. L.; ZHANG, J. Adapting IDEF0 modelling to perform manufacturing diagnosis. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 14, n. 12, pp 928-934, 1998.

KIBBLE, T. W. B.; BERKSHIRE, F. H. **Classical mechanics**. 5. ed, Imperial College Press, 2004.

KIM, B. I.; KIM, S.; PARK, J. A school bus scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 218, pp. 577-585, 2012.

KLERIDES, E.; HADJICONSTANTINO, E. A decomposition-based stochastic programming approach for the project scheduling problem under time/cost

trade-off settings and uncertain durations. **Computers and Operations Research**, v. 37, pp. 2131–2140, 2010.

KNOTTS, G.; DROR, M.; HARTMAN, B. Agent-based project scheduling. **IIE Transactions**, v. 32, n.5, pp. 387–401, 2000.

KOLISCH, R. Managing project uncertainty advances in project management, by D. Cleden. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 18, pp. 5537, 2010.

KURFESS, T. R. **Robotics and automation handbook**. CRC Press LLC, 2005.

LAMGHARI, A.; DIMITRAKOPOULOS, R. A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 222, pp.642-652, 2012.

LARSON, E. W.; GRAY, C. F. **Project management: the managerial process**. 5. ed. McGraw Hill/Irwin series, 2011.

LIPSCHUTZ, S. **Álgebra linear**. 4. ed. Bookman, 2011. Coleção Schaum.

LIU, J.; LI, Q.; WANG, Y. Risk analysis in ultra deep scientific drilling project – A fuzzy synthetic evaluation approach. **International Journal of Project Management**, v. 31, pp. 449–458, 2013.

LOVA, A.; TORMOS, P.; BARBER, F. Multi-mode resource constrained project scheduling: Scheduling schemes, priority rules and mode selection rules. **Inteligencia Artificial**, v. 30, pp. 69–86, 2006.

MARAVAS, A.; PANTOUVAKIS, J. Project cash flow analysis in the presence of uncertainty in activity duration and cost. **International Journal of Project Management**, v. 30, pp. 374–384, 2012.

MARTINELLI, G.; EIDSVIK, J.; HAUGE, R. Dynamic decision making for graphical models applied to oil exploration. **European Journal of Operational Research**, v. 230, pp. 688-702, 2013.

MOHANTY, R. P.; AGARWAL, R.; CHOUDHURY, A. K.; TIWARI, M. K. A fuzzy ANP-based approach to R&D project selection: A case study. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 24, pp. 5199-5216, 2005.

MOKHTARI, H.; AGHAIE, A.; RAHIMI, J.; MOZDGIR, A. Project Time-Cost *trade-off* scheduling: A Hybrid Optimization Approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 50, n. 5-8, pp. 811-822, 2010.

MORAIS, C. H. B. **Gerenciamento de ambientes multiprojetos pelo método da corrente crítica em empresas brasileiras – um estudo de multicascos**. 2011. 157p. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MORI, M.; TSENG, C. A genetic algorithm for the multi-mode resource constrained project scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 100, pp. 134–141, 1997.

MORRIS, P.; JAMIESON, A. **Translating corporate strategy into project strategy, realizing corporate strategy through project management**. Project Management Institute, 2004.

MÜHLENBEIN, H.; PAAß, G. From recombination of genes to the estimation of distributions. **Evolutionary Computation**, 1996.

NABER, A.; KOLISCH, R. MIP models for resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles. **European Journal of Operational Research**, v. 239, pp. 335–348, 2014.

NASA. **Systems engineering handbook**. Washington: National Aeronautics and Space Administration Headquarters, 2007.

NGUYEN, A. T.; NGUYEN, L. D.; HOAI, L. L.; DANG, C. N. Quantifying the complexity of transportation projects using the fuzzy analytic hierarchy process. **International Journal of Project Management**, v. 33, pp. 1364-1376, 2015.

OSULLIVAN, D. Project management in manufacturing using IDEF0. **International Journal of Project Management**, v. 9, pp. 162-169, 1991.

ÖZDAMAR, L.; ERTEM, M. A. Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics. **European Journal of Operational Research**, v. 244, pp. 55-65, 2015.

PALILLO, S.; AGUILAR, A. Sobre la Organización de la Frase: Estructura Argumental y Distribución de Información. In: Rogieri, P.; Pérez, L. **Retóricas del Decir: Language, verdad y creencia em La escritura acadêmica**. Rosario: Humanidades y Artes, 2012.

PAN, Q.; RUIZ, R. Local search methods for the flowshop scheduling problem with flowtime minimization. **European Journal of Operational Research**, v. 222, pp. 31–43, 2012.

PASSOS, F. G. **Modelo proposto para seleção, priorização e programação de projetos em ambientes de múltiplos projetos com restrição de recursos**. 125 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - , Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

PECHT, E.; TISHLER, A.; WEINGOLD, N. On the Choice of Multi-Task R&D Defense Projects: A Case Study of the Israeli Missile Defense System. **Defence and Peace Economics**, v. 24, n. 5, pp. 429-448, 2013.

PETEGHEM, V.; VANHOUCKE, M. A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 201, pp. 409–418, 2010.

PETEGHEM, V. V.; VANHOUCKE, M. An experimental investigation of metaheuristics for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem on new dataset instances. **European Journal of Operational Research**, v. 235, pp. 62–72, 2014.

PMBOK. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos**. 5. ed. Project Management Institute, 2014.

PRESSMAN, R. S. **Engenharia de software**. São Paulo: Makron Books, 1995

PRITCHAR, G. Stochastic inflow modeling for hydropower scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 246, pp. 496-504, 2015.

QIN, S. F.; HARRISON, R.; WEST, A. A.; WRIGHT, D. K. Development of a novel simulation modeling system for distributed manufacturing, **Computers in Industry**, v. 54, n. 1, pp. 69–81, 2004.

RAESFELD, A.; GEURTS, P.; JANSEN, M. When is a network a nexus for innovation? A study of public nanotechnology R&D projects in the Netherlands. **Industrial Marketing Management**, v. 41, n. 5, pp. 752-758, 2012.

RANJBAR, M.; REYCK, B.; KIANFAR, F. A hybrid scatter-search for the discrete time/resource *trade-off* problem in project scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 193, pp. 35–48, 2009.

REYCK, B.; LEUS, R. R&D project scheduling when activities may fail. **IIE Transactions**, v. 40, n. 4, pp. 367-384, 2008.

RICHARD, P. **Robot manipulators** - mathematics, programming and control. Cambridge, Mass: MIT Press, 1982.

RIPLEY, B. D. **Stochastic Simulation**. New York: Wiley, 1987.

ROCKAFELLAR, R. T.; ROYSET, J. O.; MIRANDA, S. I. Superquantile regression with applications to buffered reliability, uncertainty quantification, and conditional value-at-risk. **European Journal of Operational Research**, v. 234, pp. 140–154, 2014.

SARQUIS, A. B. **Estratégia de marketing de serviços: a prática da segmentação, diferenciação e posicionamento das agências de comunicação de Santa Catarina**. 2006. Tese (Doutorado em Administração) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006.

SHENHAR, A. J.; DVIR, D.; LEVY, O.; MALTZ, A. C. Project success: a multidimensional strategic concept. **Long Range Planning**, v. 34, n. 6, pp. 699-725, 2001.

SOBEL, M. J.; SZMEREKOVSKY, J. G.; TILSON, V. Scheduling projects with stochastic activity duration to maximize expected net present value. **European Journal of Operational Research**, v. 198, pp. 697-705, 2009.

SOLAK, S.; CLARKE, J. B.; JOHNSON, E. L.; BARNES, E. R. Optimization of R&D project portfolios under endogenous uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 207, pp. 420-433, 2010.

STEWART, G. W. Stochastic perturbation theory. **SIAM Review**, v. 32, n. 4, p. 579–610, 1990.

STORK, F. **Stochastic resource-constrained project scheduling**. PhD Thesis, Technical University at Berlin, Berlin, Germany, 2001.

THOMAS, A.; VENKATESWARAN, J.; SINGH, G.; KRISHNAMOORTHY, M. A resource constrained scheduling problem with multiple independent producers and a single linking constraint: A coal supply chain example. **European Journal of Operational Research**, v. 36, pp. 946–956, 2014.

TKINDT, V.; BILLAUT, J. C. **Multicriteria scheduling**: theory, models and algorithms. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002.

TSAI, L. W. **Robotic analysis**: the mechanics of serial and parallel manipulators. Wiley-Interscience, 1999.

VALLS, V.; PEREZ, A.; QUINTANILLA, S. Skilled workforce scheduling in Service Centres. **European Journal of Operational Research**, v. 193, pp. 791-804, 2009.

VERMA, D.; MISHRA, A.; SINHA, K. K. The development and application of a process model for R&D project management in a high tech firm: A field study. **Journal of Operations Management**, v. 29, n. 5, pp. 462-476, 2011.

VOSE, D. **Risk analysis**: a quantitative guide. 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2000.

VONDER, S. V.; DEMEULEMEESTER, E.; HERROELEN, W. LEUS, R. The *trade-off* between stability and makespan in resource-constrained project scheduling. **International Journal of Production Research**, v. 44, pp. 215–236, 2006.

WARD, S.; CHAPMAN, C. Transforming project risk management into project uncertainty management. **International Journal of Project Management**, v. 21, pp. 97–105, 2003.

WEBER, K. C.; ROCHA, A. R. C.; NASCIMENTO, C. J. **Qualidade e produtividade em software**. São Paulo: Makron Books, 2001.

WIESEMANN, W.; KUHN, D.; RUSTEM, B. Maximizing the net present value of a project under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 02, pp. 356–367, 2010.

XIONG, F.; XING, K.; WANG, F. Scheduling a hybrid assembly-differentiation flowshop to minimize total flow time. **European Journal of Operational Research**, v. 240, pp. 338-354, 2015.

XIU, D.; HESTHAVEN, J. S. High-Order Collocation Methods for Differential Equations with Random Inputs. **SIAM Journal on Scientific Computing**, v. 27, n. 3, pp. 1118–1139, 2005.

XU, J.; ZHENG, H.; ZENG, Z.; WU, S.; SHEN, M. Discrete time–cost–environment *trade-off* problem for large-scale construction systems with multiple modes under fuzzy uncertainty and its application to Jinping-II Hydroelectric Project. **International Journal of Project Management**, v. 30, pp. 950–966, 2012.

YAMAZAKI, F.; MEMBER, A.; SHINOZUKA, M. Neumann Expansion for Stochastic Finite Element Analysis. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 114, n. 8, pp. 1335–1354, 1988.

ZHANG, J.; ELMAGHRABY, S. E. The relevance of the “alphorn of uncertainty” to the financial management of projects under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 238, pp. 65–76, 2014.

ANEXO A – BIBLIOMETRIA COM O BANCO DE DADOS DA WEB OF SCIENCE

As informações apresentadas neste Anexo têm como principal objetivo posicionar os principais assuntos abordados nesta tese em relação à produção acadêmica e científica. Para melhor organização desta bibliometria foram utilizadas as palavras-chave escolhidas do resumo desta tese. A busca foi realizada no banco de dados da Web of Science com as palavras-chave no idioma inglês. Para cada palavra-chave são apresentados dois gráficos, sendo um que com o total de publicações por ano e outro com o total de citações efetuadas por ano.

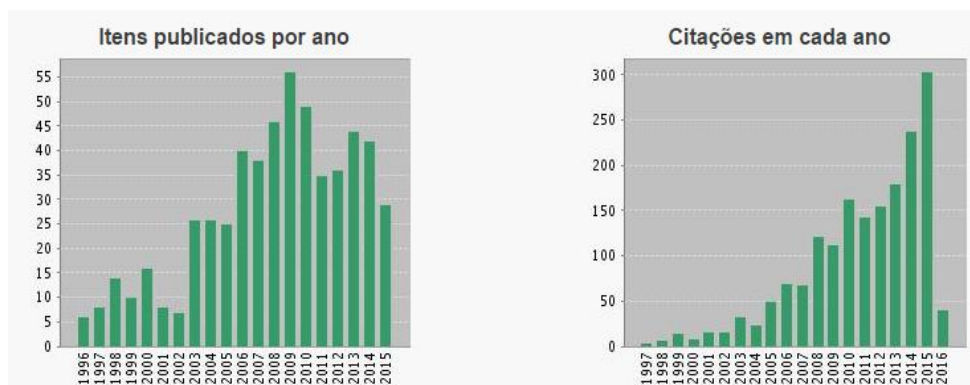
A Web of Science é uma base de dados que disponibiliza acesso a mais de 9.200 títulos de periódicos que possibilita a identificação de artigos em diversas áreas do conhecimento. Entre os bancos de dados disponíveis com as produções acadêmicas e científicas, conforme orientações do programa de Pós-Graduação do INPE, esta tese realizou a bibliometria com o banco de dados da Web of Science.

O banco de dados da Web of Science pode ser utilizado para uma pesquisa de alta qualidade, associando registros, buscando por autores relevantes na área de interesse, por referência citada, recebendo alertas de publicação para assuntos, publicações ou autores, processando os resultados de uma busca e salvando-os ou enviando-os por email, salvando o histórico de buscas, entre outras possibilidades.

Para atender a necessidade desta tese, a pesquisa básica no banco de dados da Web of Science foi realizada com o filtro “tópico”, pois, esta opção de filtro permite retornar a relação de publicações que contenham a palavra-chave no título, resumo, palavras-chave do autor ou palavras-chave criadas. A seguir são apresentados os gráficos com os resultados da bibliografia realizada a partir das palavras-chave desta tese.

A Figura A.1 apresenta o gráfico com o total de 580 publicações e com o total de 1776 citações com a palavra-chave “cronograma” entre 1990 e 2015.

Figura A.1. Total de publicações e citações com a palavra-chave “cronograma”.

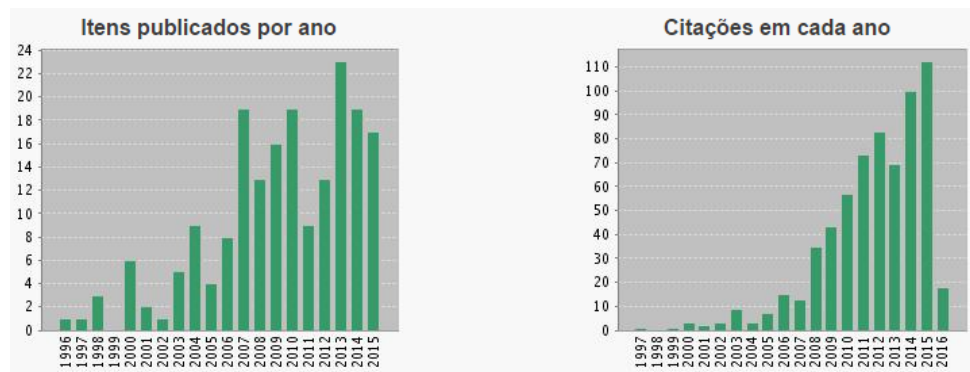


Fonte: Simulação realizada no site www.webofscience.com em fevereiro de 2016.

Analisando a Figura A.1, pode-se deduzir que o número de publicações teve o seu maior pico no ano de 2009, e desde então o interesse por publicações sobre os cronogramas de projetos diminuíram. Enquanto que, o número de citações apresentou crescimento exponencial e com tendência de aumento. Assim, pode-se concluir que os assuntos relacionados ao cronograma de projetos ainda será uma tendência para as próximas publicações.

A Figura A.2 apresenta o gráfico com o total de 190 publicações e com o total de 651 citações com a palavra-chave “orçamento” entre 1990 e 2015.

Figura A.2. Total de publicações e citações com a palavra-chave “orçamento”.

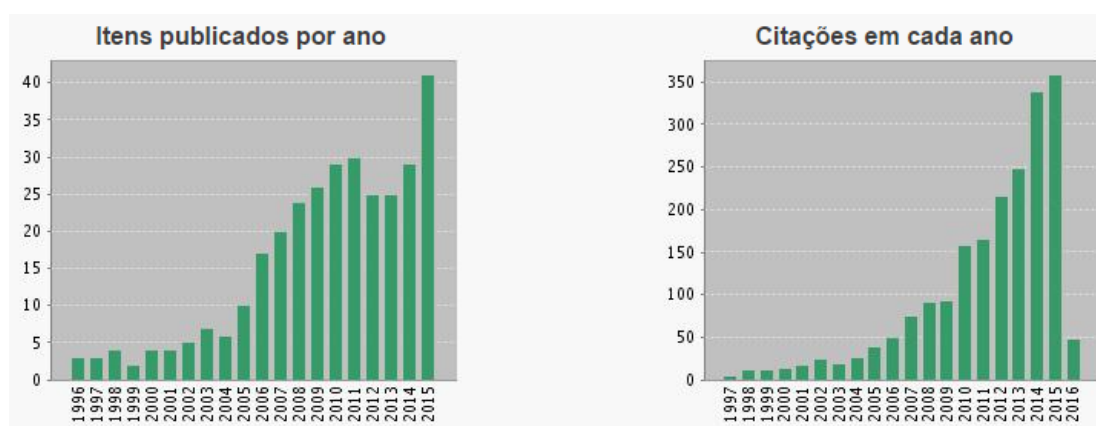


Fonte: Simulação realizada no site www.webofscience.com em fevereiro de 2016.

Analisando a Figura A.2, pode-se deduzir que o número de publicações teve o seu maior pico no ano de 2013, e que a taxa de crescimento das publicações ainda não atingiu o seu limite. Enquanto que, o número de citações apresentou crescimento com elevado coeficiente linear e com tendência de continuar crescendo. Assim, pode-se concluir que os assuntos relacionados ao orçamento de projetos será uma tendência para as próximas publicações.

A Figura A.3 apresenta o gráfico com o total de 330 publicações e com o total de 2021 citações com a palavra-chave “quantificação dos riscos” entre 1990 e 2015.

Figura A.3. Total de publicações e citações com a palavra-chave “quantificação dos riscos”.



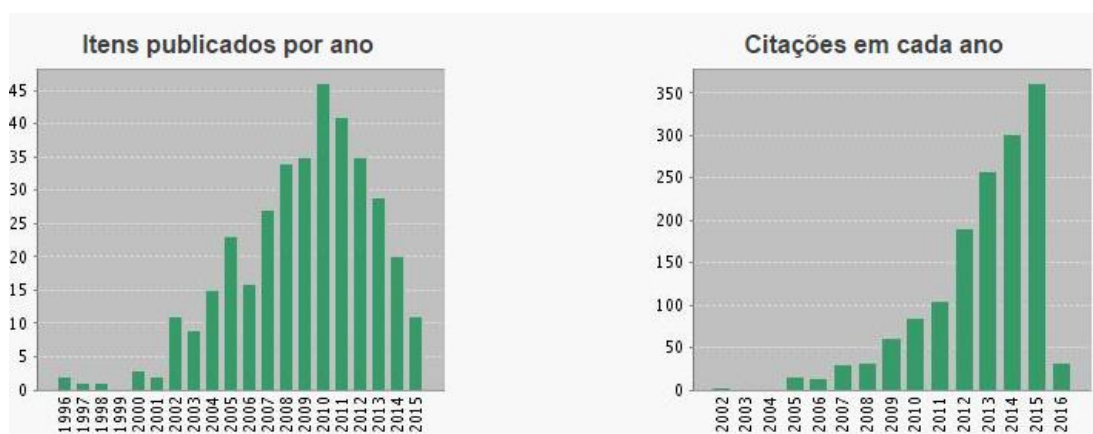
Fonte: Simulação realizada no site www.webofscience.com em fevereiro de 2016.

Analisando a Figura A.3, pode-se deduzir que o número de publicações sobre a quantificação dos riscos de projetos não atingiu seu maior valor. Enquanto que, o número de citações acompanha o crescimento de publicações sobre os assuntos relacionados à quantificação dos riscos de projetos. Assim, pode-se concluir que a quantificação dos riscos apresenta uma forte tendência de publicações para os próximos anos.

A busca e a simulação com a palavra-chave “técnica da estimativa conjugada” entre 1990 e 2015 não retornou nenhum resultado, garantindo desta forma o caráter inovador da técnica da estimativa conjugada proposta nesta tese.

A Figura A.4 apresenta o gráfico com o total de 362 publicações e com o total de 1485 citações com a palavra-chave “CBERS” entre 1990 e 2015.

Figura A.4. Total de publicações e citações com a palavra-chave “CBERS”.



Fonte: Simulação realizada no site www.webofscience.com em fevereiro de 2016.

Analisando a Figura A.4, pode-se deduzir que o número de publicações teve o seu maior pico no ano de 2010. Enquanto que, o número de citações está crescendo sobre os assuntos relacionados aos satélites CBERS. Assim, tem-se a expectativa de aumento do número de publicações por causa das novas gerações de satélites da família CBERS.

A partir dos resultados apresentados e interpretados nas figuras deste Anexo, pode-se concluir que os assuntos tratados nesta tese são de interesse da comunidade acadêmica e científica mundial, e de que a técnica da estimativa conjugada proposta nesta tese cumpre os requisitos de novidade, utilidade e generalidade exigidos pelo programa de Pós-Graduação do INPE.

ANEXO B - CONCEITOS DA CINEMÁTICA DOS MANIPULADORES ROBÓTICOS

A técnica da estimativa conjugada é baseada na relação do Trabalho (τ) necessário para a execução do projeto, que envolve as estimativas dos módulos da duração e do custo, bem como suas incertezas aleatórias ou variabilidades (alfa e beta) entre duas atividades do projeto.

Assim, a técnica da estimativa conjugada foi fundamentada nos conceitos da cinemática dos manipuladores robóticos representados por meio das cadeias cinemáticas abertas (série), fechadas (paralelas) e/ou híbridas.

Desta forma, este Anexo tem como objetivo a apresentação dos tópicos a seguir:

- a) introdução sobre os manipuladores robóticos, definição e componentes dos manipuladores robóticos, bem como a descrição do problema da cinemática direta e inversa;
- b) descrição das características dos tipos de juntas com um grau e dois graus de liberdades, vale a ressalva de que os graus de liberdades de um manipulador robótico está relacionado com o tipo da junta;
- c) descrição dos tipos de cadeias cinemáticas, sendo, aberta (série), fechada (paralela) e híbrida, bem como as configurações e o espaço de trabalho dos manipuladores robóticos formados com apenas três juntas, e
- d) fundamentos matemáticos para a descrição espacial da cinemática dos manipuladores robóticos com a descrição detalhada da composição da matriz (4x4) de transformação homogênea básica, mais precisamente da submatriz de rotação e de transladação utilizadas na cinemática dos manipuladores robóticos.

B.1 INTRODUÇÃO SOBRE OS MANIPULADORES ROBÓTICOS

Os manipuladores robóticos foram desenvolvidos para realizarem tarefas que normalmente são atribuídas aos seres humanos. Em meados da década de 60 houve um crescimento considerável na produção industrial, nessa época, os manipuladores foram aplicados na indústria para substituir o ser humano em atividades desgastantes, repetitivas e em situações de alto risco (CRITCHLOW, 1985).

Um manipulador pode ser considerado como um sistema de corpos ou elos conectados por meio de juntas, que permitem movimentos relativos entre os elos adjacentes. Esse sistema forma uma cadeia cinemática, que contém uma extremidade fixa chamada de base, e outra livre, no qual é fixada uma ferramenta chamada de efetuador ou órgão terminal (CRAIG, 2004).

Considerando que a cinemática é a parte da mecânica que trata dos movimentos geométricos de um corpo ou de um sistema de corpos, e desconsiderando as causas que geram o movimento (KIBBLE; BERKSHIRE, 2004), assim, a cinemática dos manipuladores trata da descrição geométrica do efetuador em relação aos movimentos de suas juntas.

Os movimentos do efetuador são definidos no espaço denominado operacional em relação aos movimentos das juntas. Esse espaço operacional pode ser descrito convenientemente por diferentes tipos de sistemas de coordenadas, tais como, cartesiano, polar, esférico e cilíndrico. Em geral, os métodos analíticos tratam da descrição dos movimentos do efetuador no sistema de coordenadas cartesiano (RICHARD, 1982).

Basicamente, o movimento entre os elos adjacentes dos manipuladores é do tipo rotacional quando produzido por juntas revolutas ou rotacionais (ângulo das juntas), ou do tipo prismático quando produzido por juntas prismáticas (deslocamento das juntas) (KURFESS, 2005).

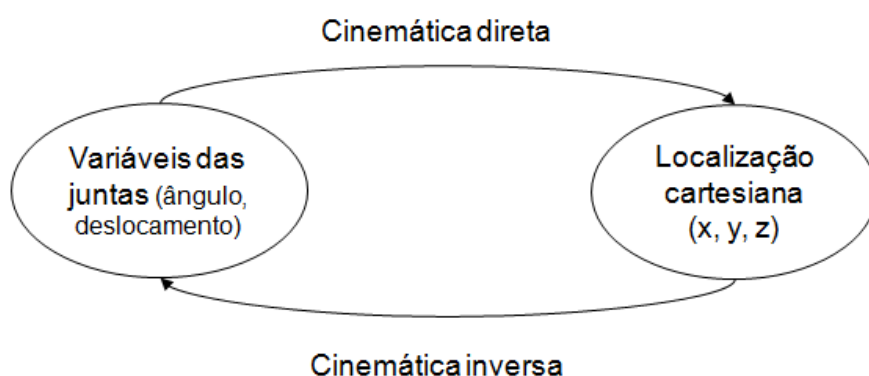
Portanto, a posição do efetuador de um manipulador depende, a cada instante, dos valores dos deslocamentos angulares das juntas rotativas e/ou dos deslocamentos lineares das juntas prismáticas, em relação ao sistema de coordenadas cartesiano de referência posicionado na base ou na extremidade fixa da cadeia cinemática (CRAIG, 2004).

Uma vez que os parâmetros dos elos e das juntas são conhecidos (medidas físicas), existem dois problemas comuns na cinemática dos manipuladores, sendo a cinemática direta e a cinemática inversa (DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA, 2000).

Na cinemática direta os movimentos das juntas (variáveis das juntas, sendo ângulo e/ou deslocamento) são conhecidos e os movimentos do efetuador são calculados (posição no sistema de coordenadas cartesiano) (FU et al., 1987).

Enquanto que, na cinemática inversa o movimento do efetuador é dado (posição no sistema de coordenadas cartesiano) e os movimentos das juntas individuais são calculados (variáveis das juntas, sendo ângulo e/ou deslocamento), conforme ilustrado na Figura B.1 (RICHARD, 1982).

Figura B.1. Problema da cinemática direta e inversa.



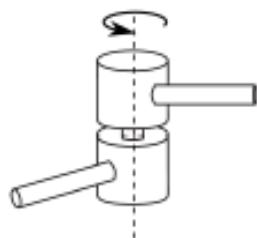
Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

B.2 TIPOS DE JUNTAS

De modo geral, dois elos adjacentes são conectados por uma junta, sendo que, existem sete tipos diferentes de juntas: revoluta (rotacional), prismática, parafuso (helicoidal), cilíndrica, universal, esférica e planar. Dentre estas juntas, a revoluta e a prismática são as mais comuns nos manipuladores robóticos (CRITCHLOW, 1985; FU et al., 1987).

- a) Revoluta ou rotacional (R): permite que um elo rotacione em relação a outro em torno de um eixo. Este tipo de junta possui um grau de liberdade. A junta rotacional gira em torno de uma linha imaginária chamada de eixo de rotação, conforme ilustrado na Figura B.2.

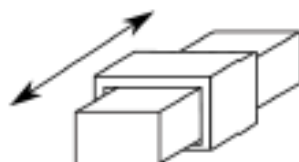
Figura B.2. Junta revoluta ou rotacional.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

- b) Prismática ou linear (P): permite que um elo translade em relação a outro através de um eixo. Este tipo de junta possui um grau de liberdade, com movimento em linha reta de duas hastes que deslizam entre si, conforme ilustrado na Figura B.3.

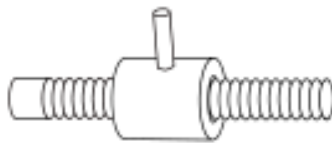
Figura B.3. Junta prismática ou linear.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

- c) Helicoidal, parafuso ou fuso (H): permite que um elo rotacione e translade de forma dependente em relação a um mesmo eixo. Este tipo de junta possui um grau de liberdade. É constituída de um parafuso que contém uma porca ao qual executa um movimento semelhante ao da junta prismática, porém, com movimento no eixo central (movimento do parafuso), conforme ilustrado na Figura B.4.

Figura B.4. Junta Helicoidal ou parafuso.

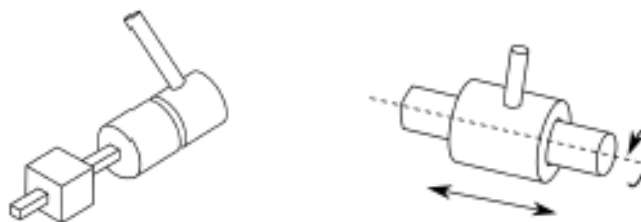


Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

As juntas com dois ou mais graus de liberdade, podem ser obtidas pela combinação de juntas de um grau de liberdade.

- a) Cilíndrica (C): a equivalência cinemática de uma junta cilíndrica pode ser obtida por uma junta rotativa que possui o eixo paralelo (ou coincidente) com o eixo de uma junta prismática. Permite que um elo rotacione e translade de forma independente em relação a um mesmo eixo. Este tipo de junta possui dois graus de liberdade, conforme ilustrado na Figura B.5.

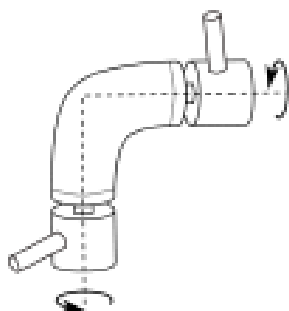
Figura B.5. Junta cilíndrica.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

- b) Universal (U): é a combinação de duas juntas rotativas que se intersectam a 90° . Este tipo de junta possui dois graus de liberdade, conforme ilustrado na Figura B.6.

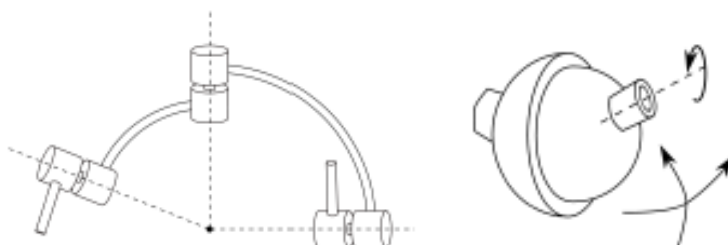
Figura B.6. Junta universal.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

- c) Esférica (S): a junta esférica é cinematicamente equivalente a três juntas rotativas não coplanares que se intersectam em um mesmo ponto. Permite que um elo rotacione livremente em relação a outro em torno do centro de uma esfera. Este tipo de junta possui três graus de liberdade, conforme ilustrado na Figura B.7.

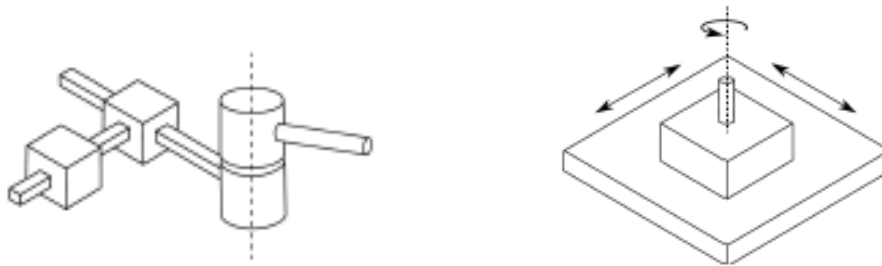
Figura B.7. Junta esférica.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

- d) Planar (E): a equivalência cinemática da junta planar pode ser obtida por duas juntas prismáticas não colineares, paralelas a um mesmo plano, e uma junta rotativa que possui o eixo normal ao plano onde as juntas prismáticas se encontram. Permite duas transladações de um elo em um plano de contato, assim como uma rotação em torno de um eixo normal ao plano de contato. Este tipo de junta possui três graus de liberdade, conforme ilustrado na Figura B.8.

Figura B.8. Junta planar.



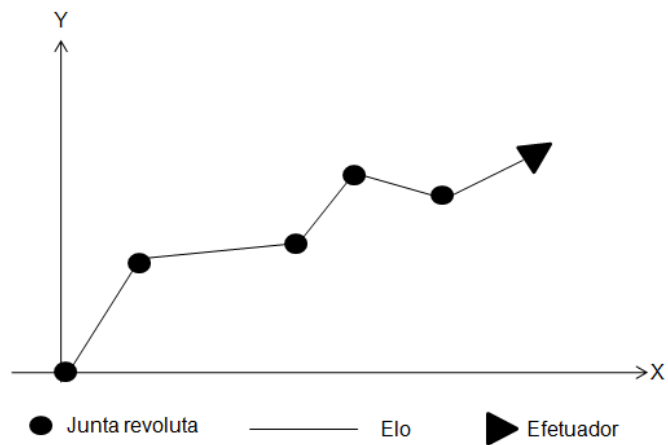
Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

B.3 CADEIAS CINEMÁTICAS

Entre as diversas definições sobre cadeias cinemáticas de manipuladores robóticos, a definição mais comum afirma que, uma cadeia cinemática é definida como um conjunto de elos (corpos rígidos) conectados por juntas (pares cinemáticos) (CRITCHLOW, 1985), sendo que, esta cadeia cinemática pode ser classificada ou categorizada em cadeia cinemática aberta (serial), cadeia cinemática fechada (paralela) e cadeia cinemática híbrida, descritas a seguir (CAMPOS et al., 2008):

- a) cadeia cinemática aberta existe somente um caminho que liga um elo a outro, conforme ilustrado na Figura B.9, frequentemente, com juntas do tipo revolutas no plano cartesiano.

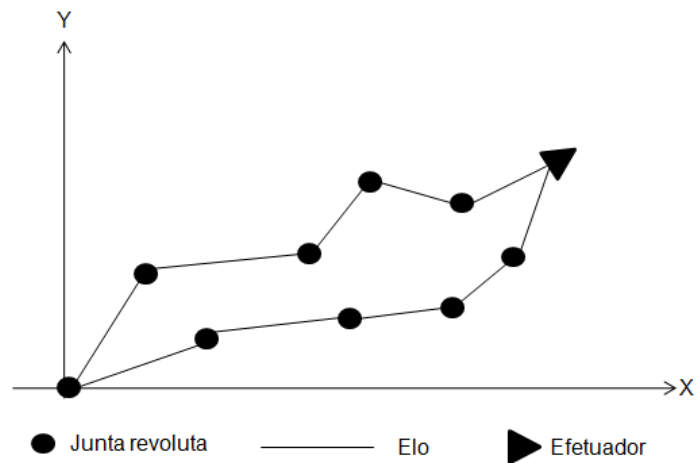
Figura B.9. Cadeia cinemática aberta (serial) com juntas revolutas.



Fonte: Produção do autor (2015).

b) cadeia cinemática fechada existem pelo menos dois caminhos que ligam a base ao efetuador, apresentando circuitos fechados, conforme ilustrado na Figura B.10, frequentemente, com juntas do tipo revolutas no plano cartesiano.

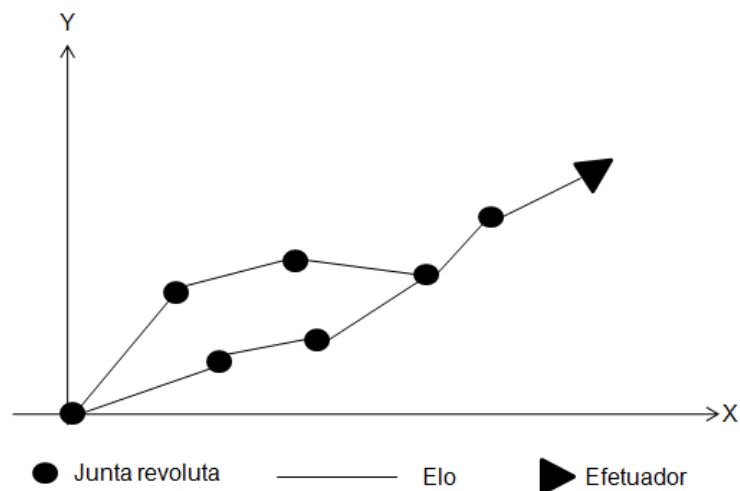
Figura B.10. Cadeia cinemática fechada (paralela) com juntas revolutas.



Fonte: Produção do autor (2015).

c) a combinação de cadeias cinemáticas abertas e fechadas resulta na cadeia híbrida, ilustrado na Figura B.11, frequentemente, com juntas do tipo revolutas no plano cartesiano.

Figura B.11. Cadeia cinemática híbridas com juntas revolutas.



Fonte: Produção do autor (2015).

O manipulador do tipo serial (cadeia cinemática aberta) representa a classe de robô mais encontrada no meio industrial. Em geral, eles apresentam uma estrutura semelhante ao braço humano, constituída por diversos corpos rígidos conectados por juntas (revolutas e prismáticas) ativas (motorizadas) (DASGUPTA; MRUTHYUNJAYA, 2000).

Este tipo de manipulador apresenta grande volume de trabalho e alta destreza, mas sofre de baixa rigidez e de erro de posicionamento relativamente grande, pois, cada elo da cadeia cinemática do manipulador serial deve suportar os demais subsequentes, o que normalmente resulta em estruturas mecânicas pesadas e volumosas, comprometendo o comportamento dinâmico do robô (TSAI, 1999; CAMPOS et al., 2008).

A Figura B.12 apresenta um manipulador robótico do tipo serial que foi obtido página eletrônica da empresa ABB (www.abb.com).

Figura B.12. Manipulador robótico do tipo serial.



Fonte: www.abb.com.

Enquanto que a estrutura cinemática de manipuladores paralelos (cadeia cinemática fechada) é constituída por um elo de saída e por uma base fixa que conectados por no mínimo duas cadeias cinemáticas independentes (TSAI, 1999). Este tipo de manipulador é capaz de atingir alta rigidez e força. No entanto, os manipuladores paralelos apresentam um volume de trabalho restrito e destreza baixa (CAMPOS et al., 2008).

A Figura B.13 apresenta um manipulador robótico do tipo paralelo que foi obtido página eletrônica da empresa ABB (www.abb.com). Este manipulador paralelo também é conhecido como manipulador delta.

Figura B.13. Manipulador robótico do tipo paralelo.



Fonte: www.abb.com.

Enquanto que a Figura B.14 apresenta um manipulador robótico do tipo paralelo conhecido como plataforma de Stewart, que foi desenvolvido em 1965 para simulação de voo.

Figura B.14. Manipulador robótico do tipo paralelo, plataforma de Stewart.



Fonte: Adaptado de Dasgupta e Mruthyunjaya (2000).

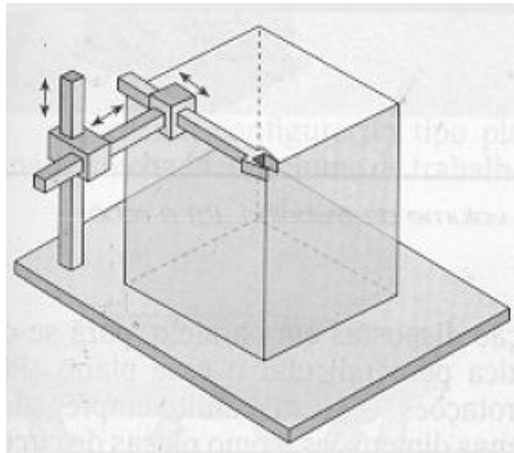
B.3.1 CONFIGURAÇÕES DOS MANIPULADORES

Os manipuladores robóticos são configurados conforme a quantidade de elos e juntas, bem como o tipo de junta, em geral, os manipuladores são configurados conforme o espaço de trabalho proporcionado pelos elos e juntas (TSAI, 1999).

Para facilitar a representação das configurações, assume-se que os manipuladores utilizados nos exemplos a seguir, possuem apenas três juntas em cadeia cinemática aberta (série). Entretanto, estas configurações podem ser ilustradas com manipuladores com mais de três juntas (FU et al., 1987), que são:

- a) configuração cartesiana: neste exemplo representado por três juntas do tipo prismática. A Figura B.15 ilustra o manipulador na configuração cartesiana, bem como seu espaço de trabalho.

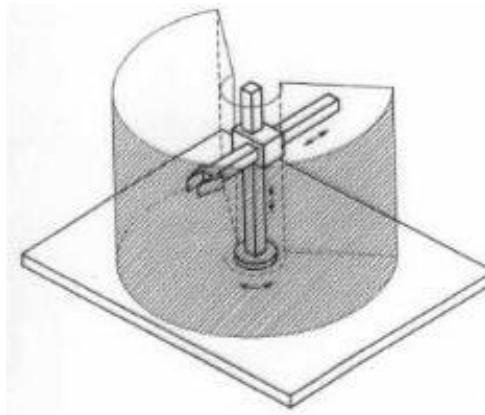
Figura B.15. Manipulador robótico na configuração cartesiana.



Fonte: Adaptado de FU et.al. (1987).

- b) configuração cilíndrica: neste exemplo representado por três juntas, sendo, duas juntas do tipo prismática e uma junta do tipo revoluta. A Figura B.16 ilustra o manipulador na configuração cilíndrica, bem como seu espaço de trabalho.

Figura B.16. Manipulador robótico na configuração cilíndrica.

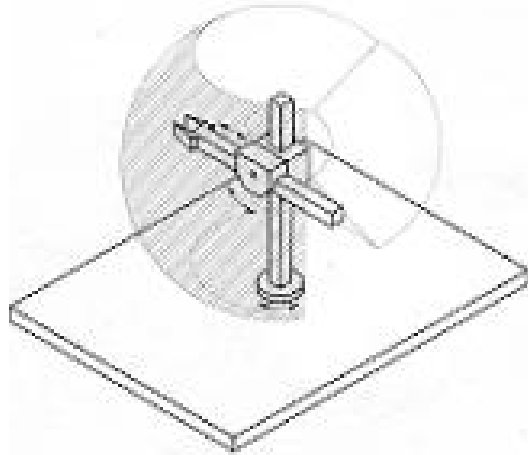


Fonte: Adaptado de FU et.al. (1987).

- c) configuração esférica: neste exemplo representado por três juntas, sendo, uma junta do tipo prismática e duas juntas do tipo revoluta. A

Figura B.17 ilustra o manipulador na configuração esférica, bem como seu espaço de trabalho.

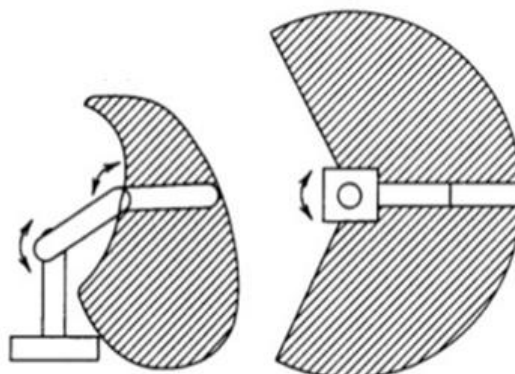
Figura B.17. Manipulador robótico na configuração esférica.



Fonte: Adaptado de FU et.al. (1987).

d) configuração revoluta ou articulada: neste exemplo representado por três juntas do tipo revoluta. Frequentemente, os manipuladores com cadeia cinemática fechada (paralela), são representados nessa configuração. A Figura B.18 ilustra o manipulador na configuração revoluta ou articulada, bem como seu espaço de trabalho.

Figura B.18. Manipulador robótico na configuração revoluta ou articulada.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

B.4 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS PARA A CINEMÁTICA DOS MANIPULADORES

Desde que os elos do manipulador possam rotacionar e transladar em relação a um sistema de coordenadas cartesianas, o deslocamento espacial total do efetuador é devido às rotações angulares e os deslocamentos lineares das juntas. Denavit e Hartenberg em 1955 propuseram uma abordagem sistemática e generalizada de utilizar a álgebra matricial para descrever e representar a geometria espacial dos elos do manipulador em relação a um sistema de coordenadas cartesianas de referência (FU et al., 1987).

O método de Denavit e Hartenberg usa a matriz (4x4) de transformação homogênea para descrever o relacionamento espacial entre dois elos adjacentes separados por uma junta, de forma a reduzir o problema da cinemática direta a uma matriz (4x4) de transformação homogênea equivalente, que relaciona o deslocamento espacial do efetuador com o sistema de coordenadas cartesiano. Enquanto que, em geral, o problema da cinemática inversa, geralmente, é resolvido pelas técnicas das aproximações geométricas (FU et al., 1987).

A técnica da estimativa conjugada também é baseada na álgebra linear, mais precisamente no conceito da matriz (4x4) de transformação homogênea, pois, assume-se uma similaridade entre o diagrama de precedências do projeto e uma cadeia cinemática (aberta, fechada ou híbrida), em que as atividades do projeto são similares às juntas, enquanto que as precedências são similares aos elos.

Assumindo que as atividades do projeto são representadas por meio de sistemas de coordenadas cartesianos, e que a estimativa conjugada trata do deslocamento espacial de duas atividades, pacotes de trabalho ou fases adjacentes, o problema da cinemática direta e inversa pode ser equacionado por meio da adaptação da matriz (4x4) de transformação homogênea.

Portanto, as próximas subseções deste capítulo, têm como principal propósito apresentar os conceitos da matriz (4x4) de transformação homogênea, a fim de (LIPSCHUTZ, 2011):

- a) estabelecer os sistemas de coordenadas para representar as atividades do projeto;
- b) conhecer as transformações entre esses sistemas de coordenadas;
- c) representar as coordenadas de um elo na forma vetorial em um dado sistema de coordenadas em outro sistema de coordenadas, e
- d) conhecer as operações de rotação e transladação de um sistema de coordenadas em relação a outro sistema de coordenadas.

B.4.1 MUDANÇAS DE SISTEMAS DE COORDENADAS

As mudanças de sistemas de coordenadas, resumidamente, são operações algébricas efetuadas por meio das matrizes. Basicamente, assumindo dois sistemas de coordenadas tridimensionais, um fixo e um móvel, o sistema de coordenadas móvel pode sofrer transladação e ou rotações em relação ao sistema de coordenadas fixo.

Para obter uma matriz que ofereça informações sobre rotações, transladação e escalas entre dois sistemas de coordenadas (fixo e móvel), uma quarta coordenada ou componente deve ser introduzida no vetor posição tridimensional, dessa forma, o vetor posição é expresso em coordenadas homogêneas (CRAIG, 2004).

O conceito de pontos no espaço cartesiano representados em coordenadas homogêneas é usado para o desenvolvimento da matriz de transformações que inclui rotação, transladação, escala e perspectiva.

Este quarto componente das coordenadas homogêneas é considerado como um fator de escala. Se este quarto componente for unitário, então as coordenadas homogêneas transformadas de um vetor posição são as mesmas para qualquer outro sistema de coordenadas físico do vetor.

Para o contexto de gerenciamento de projetos desta tese, o fator de escala sempre será unitário, embora, usualmente utilizado em computação gráfica como um fator de escala universal assumindo apenas valores positivos (RICHARD, 1982).

A matriz de transformação homogênea básica (4x4), ilustrada na Equação B.1, mapeia um vetor posição representado em coordenadas homogêneas de um sistema de coordenadas para outro sistema de coordenadas (fixo para móvel ou móvel para fixo).

A matriz de transformação homogênea básica é composta de quatro submatrizes (CRITCHLOW, 1985).

$$H = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & | & P_{3 \times 1} \\ - & | & - \\ f_{1 \times 3} & | & 1 \times 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \text{Matriz} & \text{Vetor} \\ \text{rotação} & \text{posição} \\ \hline \text{Transformação} & \text{Escala} \\ \text{de perspectiva} & \end{array} \right] \quad (\text{B.1})$$

Sendo que, a submatriz superior esquerda R(3x3) representa a matriz de rotação entre os sistemas de coordenadas fixo e móvel, a rotação pode ocorrer no eixo da abscissa (x), na ordenada (y) ou na cota (z). A submatriz superior direita P(3x1) representa o efeito de transladação entre os sistemas de coordenadas fixo e móvel (RICHARD, 1982).

Enquanto que, a submatriz inferior esquerda f(1x3) representa a transformação de perspectiva que geralmente é utilizada para visão computacional e calibração de modelos de câmeras, para o contexto de gerenciamento de

projetos desta tese, os elementos desta submatriz são considerados nulos para indicar que não existe transformação de perspectiva.

E a submatriz inferior direita $f(1 \times 1)$ representa o fator de escala que para o contexto desta tese será sempre considerado como unitário (FU et al., 1987).

Nas próximas subseções deste capítulo, as submatrizes de rotação $R(3 \times 3)$ e transladação $P(3 \times 1)$, são apresentadas com detalhes.

B.4.2 MATRIZ DE ROTAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS

A matriz de rotação ($R_{3 \times 3}$) pode ser definida como uma matriz de transformação, que opera sobre um vetor em um espaço euclidiano tridimensional, rotacionado entre um sistema de coordenadas móvel e um fixo (FU et al., 1987).

Assim, assumindo dois sistemas de coordenadas com a mesma origem, sendo:

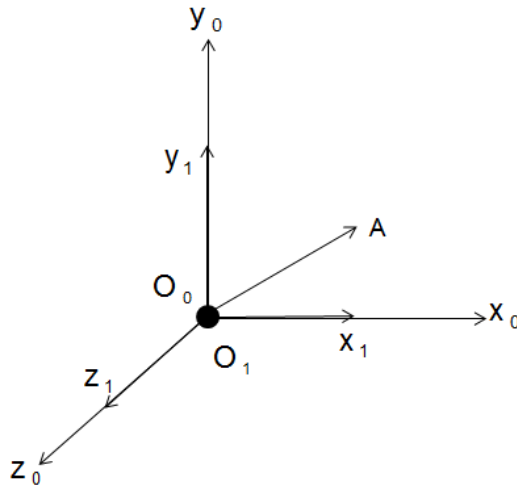
- a) sistema de coordenadas fixo: $Ox_0y_0z_0$, e
- b) sistema de coordenadas móvel: $Ox_1y_1z_1$.

Considerando os vetores unitários dos sistemas de coordenadas com a mesma origem, sendo:

- a) vetores unitários do sistema de coordenadas fixo: i_0, j_0, k_0 , e
- b) vetores unitários do sistema de coordenadas móvel: i_1, j_1, k_1 .

A Figura B.19 ilustra os sistemas de coordenadas fixo e móvel com a mesma origem, bem como o ponto A.

Figura B.19. Sistemas de coordenadas fixo e móvel com origens iguais.



Fonte: Adaptado de FU *et al.* (1987).

O ponto A da Figura B.19 pode ser representado nos dois sistemas de coordenadas, sendo:

- a) sistema de coordenadas fixo: $a_0 = a_{0x}i_0 + a_{0y}j_0 + a_{0z}k_0$, e
- b) sistema de coordenadas móvel: $a_1 = a_{1x}i_1 + a_{1y}j_1 + a_{1z}k_1$.

Supondo que o ponto A da Figura B.19 esteja representado no sistema de coordenadas móvel, e deseja-se que este mesmo ponto A seja representado no sistema de coordenadas fixo.

Assim, como a_0 e a_1 representam o mesmo ponto, pode-se escrever a Equação B.2.

$$\begin{aligned}
 a_{0x} &= a_0 \cdot i_0 = a_1 \cdot i_0 \\
 a_{0y} &= a_0 \cdot j_0 = a_1 \cdot j_0 \\
 a_{0z} &= a_0 \cdot k_0 = a_1 \cdot k_0
 \end{aligned}
 \tag{B.2}$$

Desta forma, o ponto A da Figura B.19 representado no sistema de coordenadas móvel pode ser escrito em função do sistema de coordenadas fixo, conforme a Equação B.3, isto significa que a rotação ocorre no sistema de coordenadas móvel:

$$\begin{aligned} a_{0x} &= i_0 \cdot (a_{1x}i_1 + a_{1y}j_1 + a_{1z}k_1) = i_0 \cdot a_{1x}i_1 + i_0 \cdot a_{1y}j_1 + i_0 \cdot a_{1z}k_1 \\ a_{0y} &= j_0 \cdot (a_{1x}i_1 + a_{1y}j_1 + a_{1z}k_1) = j_0 \cdot a_{1x}i_1 + j_0 \cdot a_{1y}j_1 + j_0 \cdot a_{1z}k_1 \\ a_{0z} &= k_0 \cdot (a_{1x}i_1 + a_{1y}j_1 + a_{1z}k_1) = k_0 \cdot a_{1x}i_1 + k_0 \cdot a_{1y}j_1 + k_0 \cdot a_{1z}k_1 \end{aligned} \quad (B.3)$$

Ainda, o ponto A pode ser escrito em função do sistema de coordenadas fixo de forma matricial, conforme apresentado na Equação B.4:

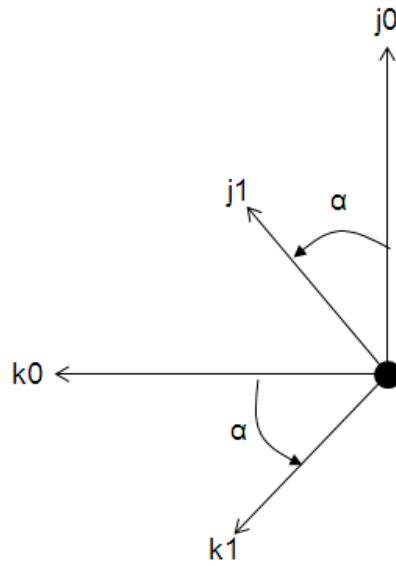
$$\begin{aligned} a_0 = \begin{vmatrix} a_0x \\ a_0y \\ a_0z \end{vmatrix}; a_1 = \begin{vmatrix} a_1x \\ a_1y \\ a_1z \end{vmatrix}; R = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & i_0 \cdot j_1 & i_0 \cdot k_1 \\ j_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot k_1 \\ k_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix}; \\ a_0 = R \cdot a_1 = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & i_0 \cdot j_1 & i_0 \cdot k_1 \\ j_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot k_1 \\ k_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_1x \\ a_1y \\ a_1z \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (B.4)$$

Na matriz de rotação (R), os vetores colunas são os cossenos diretores dos eixos do sistema de coordenadas móvel em relação aos eixos do sistema de coordenadas fixo (CRITCHLOW, 1985).

Desta forma, podem existir três possibilidades de rotação, sendo rotação no eixo da abscissa (x), rotação no eixo da ordenada (y) e rotação no eixo da cota (z).

A Figura B.20 ilustra a rotação (alfa) no eixo da abscissa (x_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

Figura B.20. Rotação (alfa) no eixo da abscissa (x_1) do sistema de coordenadas móvel.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

Enquanto que, a Equação B.5, apresenta a matriz de rotação (alfa) no eixo da abscissa (x_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

$$a_0 = R_{x_0, \alpha} \cdot a_1$$

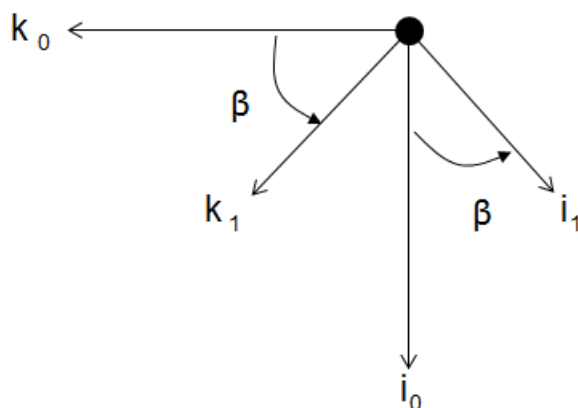
$$R_{x_0, \alpha} = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & i_0 \cdot j_1 & i_0 \cdot k_1 \\ j_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot k_1 \\ k_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix}$$

$$R_{x_0, \alpha} = \begin{vmatrix} \cos(0) & \cos(90) & \cos(90) \\ \cos(90) & \cos \alpha & -\text{sen} \alpha \\ \cos(90) & \text{sen} \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix} \quad (\text{B.5})$$

$$R_{x_0, \alpha} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\text{sen} \alpha \\ 0 & \text{sen} \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}$$

A Figura B.21 ilustra a rotação (beta) no eixo da ordenada (y_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

Figura B.21. Rotação (beta) no eixo da ordenada (y_1) do sistema de coordenadas móvel.



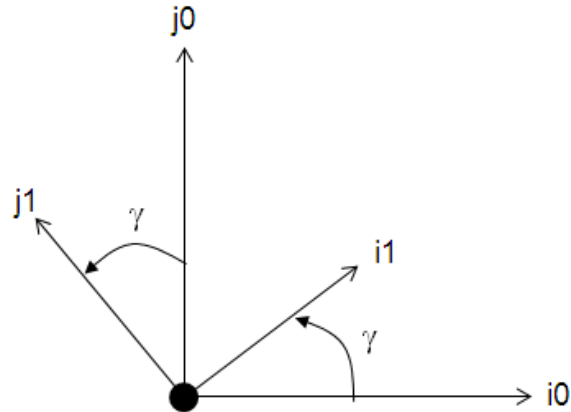
Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

Enquanto que, a Equação B.6, apresenta a matriz de rotação (beta) no eixo da ordenada (y_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_0 &= \mathbf{R}_{y_0, \beta} \cdot \mathbf{a}_1 \\
 \mathbf{R}_{y_0, \beta} &= \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & i_0 \cdot j_1 & i_0 \cdot k_1 \\ j_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot k_1 \\ k_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix} \\
 \mathbf{R}_{y_0, \beta} &= \begin{vmatrix} \cos \beta & \cos(90) & \sin \beta \\ \cos(90) & \cos(0) & \cos(90) \\ -\sin \beta & \cos(90) & \cos \beta \end{vmatrix} \quad (\text{B.6}) \\
 \mathbf{R}_{y_0, \beta} &= \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

A Figura B.22 ilustra a rotação (gama) no eixo da cota (z_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

Figura B.22. Rotação (gama) no eixo da ordenada (z_1) do sistema de coordenadas móvel.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

Enquanto que, a Equação B.7, apresenta a matriz de rotação (beta) no eixo da cota (z_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_0 &= \mathbf{R}_{z_0, \gamma} \cdot \mathbf{a}_1 \\
 \mathbf{R}_{z_0, \gamma} &= \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & i_0 \cdot j_1 & i_0 \cdot k_1 \\ j_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot k_1 \\ k_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix} \\
 \mathbf{R}_{z_0, \gamma} &= \begin{vmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & \cos(90) \\ \sin \gamma & \cos \gamma & \cos(90) \\ \cos(90) & \cos(90) & \cos(0) \end{vmatrix} \quad (\text{B.7}) \\
 \mathbf{R}_{z_0, \gamma} &= \begin{vmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

Similarmente, o ponto A representado no sistema de coordenadas fixo pode ser representado em função do sistema de coordenadas móvel de forma matricial, conforme apresentado na Equação B.8:

$$\mathbf{a}_1 = (\mathbf{R})^{-1} \cdot \mathbf{a}_0; (\mathbf{R})^{-1} = \mathbf{R}^T = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix} \quad (\text{B.8})$$

$$\mathbf{a}_1 = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{a}_0 = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_0 x \\ a_0 y \\ a_0 z \end{vmatrix}$$

A Equação B.9, apresenta a matriz de rotação transposta (alfa) no eixo da abscissa (x_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

$$\mathbf{a}_1 = (\mathbf{R}_{x_0, \alpha})^T \cdot \mathbf{a}_0$$

$$(\mathbf{R}_{x_0, \alpha})^T = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix}$$

$$(\mathbf{R}_{x_0, \alpha})^T = \begin{vmatrix} \cos(0) & \cos(90) & \cos(90) \\ \cos(90) & \cos \alpha & \text{sen } \alpha \\ \cos(90) & -\text{sen } \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix} \quad (\text{B.9})$$

$$(\mathbf{R}_{x_0, \alpha})^T = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \text{sen } \alpha \\ 0 & -\text{sen } \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}$$

A Equação B.10, apresenta a matriz de rotação transposta (alfa) no eixo da ordenada (y_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

$$\mathbf{a}_1 = (\mathbf{R}_{y_0, \beta})^T \cdot \mathbf{a}_0$$

$$(\mathbf{R}_{y_0, \beta})^T = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix}$$

$$(\mathbf{R}_{y_0, \beta})^T = \begin{vmatrix} \cos \beta & \cos(90) & -\sin \beta \\ \cos(90) & \cos(0) & \cos(90) \\ \sin \beta & \cos(90) & \cos \beta \end{vmatrix} \quad (\text{B.10})$$

$$(\mathbf{R}_{y_0, \beta})^T = \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix}$$

A Equação B.11, apresenta a matriz de rotação transposta (alfa) no eixo da cota (z_1) do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema de coordenadas fixo.

$$\mathbf{a}_1 = (\mathbf{R}_{z_0, \gamma})^T \cdot \mathbf{a}_0$$

$$(\mathbf{R}_{z_0, \gamma})^T = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix}$$

$$(\mathbf{R}_{z_0, \gamma})^T = \begin{vmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & \cos(90) \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & \cos(90) \\ \cos(90) & \cos(90) & \cos(0) \end{vmatrix} \quad (\text{B.11})$$

$$(\mathbf{R}_{z_0, \gamma})^T = \begin{vmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

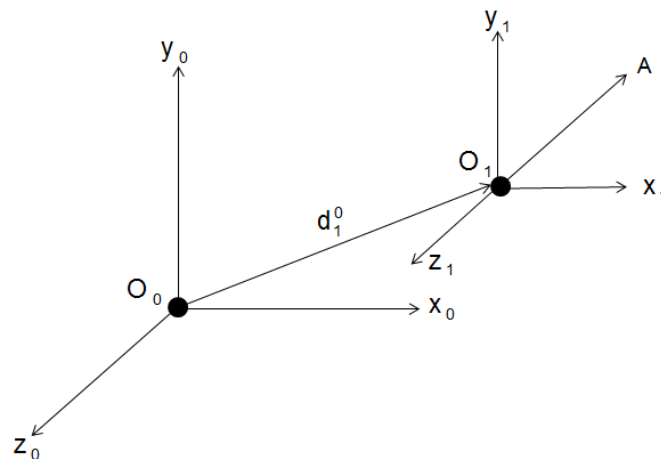
B.4.3 MATRIZ DE TRANSLADAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE COORDENADAS

Além das rotações, os sistemas de coordenadas também podem estar transladados, ou seja, sistemas de coordenadas com origens diferentes. Assim, assumindo novamente dois sistemas de coordenadas, entretanto, agora com as origens diferentes, conforme ilustrado na Figura B.23 (RICHARD, 1982):

a) sistema de coordenadas fixo: $Ox_0y_0z_0$, e

b) sistema de coordenadas móvel: $Ox_1y_1z_1$.

Figura B.23. Sistemas de coordenadas fixo e móvel com origens transladadas.



Fonte: Adaptado de FU et al. (1987).

A origem do sistema móvel foi deslocada pelo vetor d_1^0 . Este deslocamento representa a diferença ou a transladação entre os sistemas de coordenadas fixo e móvel.

Assumindo que o ponto A esteja referenciado no sistema de coordenadas móvel, para representar o ponto A no sistema de coordenadas fixo, de forma a considerar a rotação (orientação) e transladação (posição) entre os sistemas de coordenadas, deve-se realizar a soma vetorial do vetor de deslocamento

entre as origens dos sistemas de coordenadas, conforme ilustrado na Equação B.12.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_0 &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{a}_1 + \mathbf{d}_1^0 \\
 \begin{vmatrix} \mathbf{a}_0 x \\ \mathbf{a}_0 y \\ \mathbf{a}_0 z \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & i_0 \cdot j_1 & i_0 \cdot k_1 \\ j_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot k_1 \\ k_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{a}_1 x \\ \mathbf{a}_1 y \\ \mathbf{a}_1 z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{d}_1^0 x \\ \mathbf{d}_1^0 y \\ \mathbf{d}_1^0 z \end{vmatrix}
 \end{aligned} \tag{B.12}$$

Similarmente, assumindo que o ponto A esteja referenciado no sistema de coordenadas fixo, para representá-lo no sistema de coordenadas móvel, deve-se utilizar a matriz de rotação transposta, conforme ilustrado na Equação B.13.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_1 &= \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{a}_0 + \mathbf{d}_1^0 \\
 \begin{vmatrix} \mathbf{a}_1 x \\ \mathbf{a}_1 y \\ \mathbf{a}_1 z \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{a}_0 x \\ \mathbf{a}_0 y \\ \mathbf{a}_0 z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{d}_1^0 x \\ \mathbf{d}_1^0 y \\ \mathbf{d}_1^0 z \end{vmatrix}
 \end{aligned} \tag{B.13}$$

B.4.4 MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO HOMOGÊNEA BÁSICA

Portanto, as relações geométricas de rotações e transladação entre os sistemas de coordenadas fixo e móvel, a partir do conceito das coordenadas homogêneas, podem ser representadas na forma matricial por meio da matriz (4x4) de transformação homogênea básica.

Assim, a Equação B.14 apresenta a matriz (4x4) de transformação homogênea básica, que é utilizada para descrever o relacionamento geométrico entre o sistema fixo e móvel, a partir das coordenadas descritas no sistema de coordenadas móvel (FU et al., 1987).

$$H = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & i_0 \cdot j_1 & i_0 \cdot k_1 & d_1^0 x \\ j_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot k_1 & d_1^0 y \\ k_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot k_1 & d_1^0 z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (\text{B.14})$$

E a Equação B.15 apresenta a matriz (4x4) de transformação homogênea básica, que é utilizada para descrever o relacionamento geométrico entre o sistema fixo e móvel, a partir das coordenadas descritas no sistema de coordenadas fixo (FU et al., 1987).

$$H' = \begin{vmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 & d_1^0 x \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 & d_1^0 y \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 & d_1^0 z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (\text{B.15})$$

ANEXO C - IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA EM UMA CADEIA CINEMÁTICA FECHADA

Este Anexo tem como objetivo aplicar a técnica da estimativa conjugada em um exemplo ilustrativo de projeto com um diagrama de precedências na configuração da cadeia cinemática fechada.

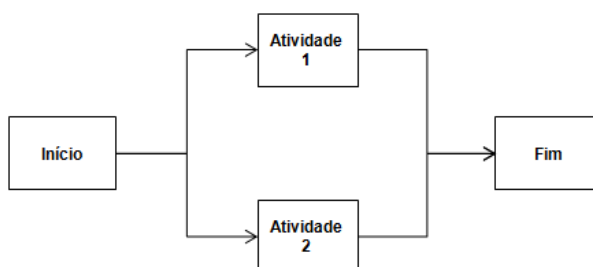
Por opção desta tese, este é um exemplo em que a cinemática direta da técnica da estimativa conjugada é implementada em um diagrama de precedências na configuração da cadeia cinemática fechada, assim, são tratados os assuntos a seguir:

- a) apresentar as durações e os custos para o exemplo do diagrama de precedências do projeto na configuração da cadeia cinemática fechada;
- b) determinar o diagrama IDEF0 para o exemplo do diagrama de precedências na configuração da cadeia cinemática fechada;
- c) modelar as durações e os custos das atividades (1) e (2) do projeto com cadeia cinemática fechada;
- d) determinar o gráfico bidimensional (tempo e custo) para as durações e os custos planejados e modelados;
- e) realizar a análise de *trade-off* entre os valores das durações e dos custos planejados e modelados, e
- f) analisar criticamente os resultados das análises do gráfico bidimensional e *trade-off* do projeto com cadeia cinemática fechada.

C.1 APRESENTAÇÃO ESTRUTURADA DAS INFORMAÇÕES DO PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA

A Figura C.1 apresenta o diagrama de precedências do projeto utilizado como exemplo para a implementação da cadeia cinemática direta fechada com a técnica da estimativa conjugada.

Figura C.1. Diagrama de precedências do exemplo da cadeia cinemática direta fechada.



Fonte: Produção do autor (2015).

O projeto usado como exemplo para ilustrar a implementação da técnica da estimativa conjugada na configuração da cadeia cinemática fechada é composto por:

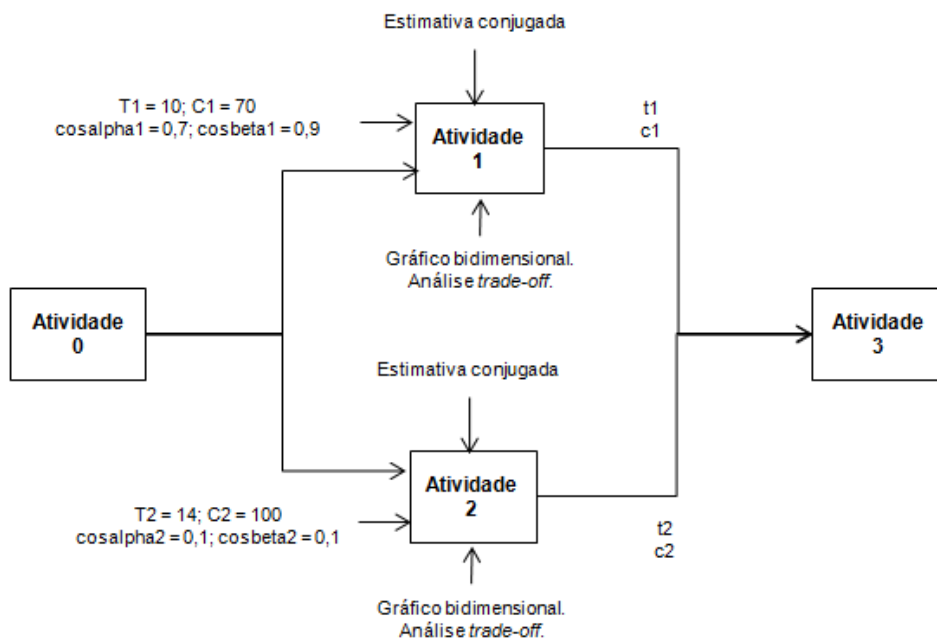
- quatro atividades, sendo uma atividade de início (0), uma atividade de término (3), e duas atividades simultâneas (1 e 2);
- a duração é representada na unidade de dias, enquanto que o custo é representado na unidade de reais (R\$);
- a atividade (1) apresenta duração planejada ($T1 = 10$ dias), custo planejado ($C1 = R\$ 70,00$), variabilidade da duração ($\text{cosalfa1} = 0,7$), variabilidade do custo ($\text{cosbeta1} = 0,9$), fator crítico da duração ($\text{ft1} = 1$) e fator crítico do custo ($\text{fc1} = 1$), e

- d) a atividade (2) apresenta duração planejada ($T_2 = 14$ dias), custo planejado ($C_2 = R\$ 100,00$), variabilidade da duração ($\cos\alpha_2 = 0,1$), variabilidade do custo ($\cos\beta_2 = 0,1$), fator crítico da duração ($ft_2 = 1$) e fator crítico do custo ($fc_2 = 1$).

C.2 DIAGRAMA IDEF0 PARA O PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA

Baseado nas informações estruturadas do projeto utilizado como exemplo para a implementação da técnica da estimativa conjugada na configuração da cadeia cinemática direta fechada, a Figura C.2 apresenta a cadeia cinemática direta fechada com a linguagem IDEF0 para o projeto usado como exemplo.

Figura C.2. Projeto com cadeia cinemática fechada com a linguagem IDEF0.



Fonte: Produção do autor (2015).

C.3 MODELAGEM DAS DURAÇÕES E DOS CUSTOS DO PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA

Para modelar as durações e os custos da atividade (1) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada, deve-se assumir que:

- a) a variabilidade modelada da duração da atividade (1) ($\cos\alpha_1 = 0,7$);
- b) a variabilidade modelada do custo da atividade (1) ($\cos\beta_1 = 0,9$);
- c) as estimativas planejadas da duração ($T_1 = 10$ dias) e do custo ($C_1 = R\$ 70,00$) da atividade (1), e
- d) os fatores críticos são unitários ($ft_1 = fc_1 = 1$) da atividade (1).

A Equação C.1 apresenta a duração modelada da atividade (1) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada.

$$\begin{aligned}t_1 &= T_1 \cdot ft_1 \cdot (\cos\beta_1 + 1) \\t_1 &= 10 \cdot (0,9 + 1) \cong 19 \text{ dias}\end{aligned}\tag{C.1}$$

A Equação C.2 apresenta o custo modelado da atividade (1) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada.

$$\begin{aligned}c_1 &= C_1 \cdot fc_1 \cdot (\cos\alpha_1 + 1) \\c_1 &= 70 \cdot (0,7 + 1) \\c_1 &\cong 119 \text{ reais}\end{aligned}\tag{C.2}$$

Para modelar as durações e os custos da atividade (2) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada, deve-se assumir que:

- a) a variabilidade modelada da duração da atividade (2) ($\cos\alpha_2 = 0,1$);
- b) a variabilidade modelada do custo da atividade (2) ($\cos\beta_2 = 0,1$);
- c) as estimativas planejadas da duração ($T_2 = 14$ dias) e do custo ($C_2 = R\$ 100,00$) da atividade (2), e
- d) os fatores críticos são unitários ($f_{t2} = f_{c2} = 1$) da atividade (2).

A Equação C.3 apresenta a duração modelada da atividade (2) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada.

$$\begin{aligned}
 t_2 &= T_2 \cdot f_{t2} \cdot (\cos\alpha_2 + 1) \\
 t_2 &= 14 \cdot (0,1 + 1) \cong 15,4 \text{ dias}
 \end{aligned}
 \tag{C.3}$$

A Equação C.4 apresenta o custo modelado da atividade (2) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada.

$$\begin{aligned}
 c_2 &= C_2 \cdot f_{c2} \cdot (\cos\beta_2 + 1) \\
 c_2 &= 100 \cdot (0,1 + 1) \\
 c_2 &\cong 110 \text{ reais}
 \end{aligned}
 \tag{C.4}$$

C.4 GRÁFICO BIDIMENSIONAL DO PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA

Esta seção tem como objetivo apresentar o gráfico bidimensional (tempo e custo) para os valores das durações e dos custos planejados e modelados do projeto com a configuração da cadeia cinemática fechada.

O projeto com as atividades (1) e (2) na configuração de cadeia cinemática fechada apresenta os valores planejados das durações e dos custos:

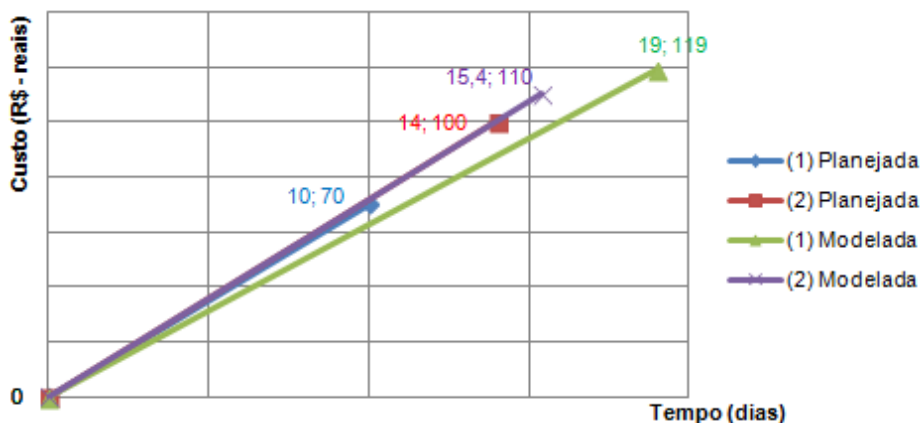
- a) duração planejada da atividade (1) de 10 dias (T1) e custo planejado da atividade (1) de R\$ 70,00 (C1), e
- b) duração planejada da atividade (2) de 14 dias (T2) e custo planejado da atividade (2) de R\$ 100,00 (C2).

O projeto com as atividades (1) e (2) na configuração de cadeia cinemática fechada apresenta os valores modelados das durações e dos custos:

- a) duração modelada da atividade (1) de 19 dias (t1) e custo modelado da atividade (1) de R\$ 119,00 (c1), e
- b) duração modelada da atividade (2) de 15,4 dias (t2) e custo modelado da atividade (2) de R\$ 110,00 (c2).

A Figura C.3 apresenta o gráfico bidimensional (tempo e custo) com os valores das durações e dos custos planejados e modelados do projeto com a configuração da cadeia cinemática fechada.

Figura C.3. Gráfico bidimensional (planejado e modelado) do projeto com a configuração da cadeia cinemática fechada.



Fonte: Produção do autor (2015).

C.5 ANÁLISE DE *TRADE-OFF* DO PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA

Assumindo que o Trabalho (τ_1) realizado para completar a atividade (1) seja o produto entre as Equações 3.11 e 3.12, considerando as estimativas planejadas da duração e do custo bem como suas variabilidades, a Equação C.5 apresenta o Trabalho (τ_1) da atividade (1).

$$\begin{aligned}\tau_1 &= [T1.ft1.(cos\beta_1 + 1)].[C1.fc1.(cos\alpha_1 + 1)] \\ \tau_1 &= [10.(0,9 + 1)].[70.(0,7 + 1)] = 19.119 \cong 2261 \text{ [dias .reais]}\end{aligned}\tag{C.5}$$

Com o propósito de traçar o gráfico com o *trade-off* entre a duração e o custo da atividade (1) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada, deve-se determinar os pontos extremos da curva de *trade-off*.

Assumindo que a variabilidade da estimativa da duração da atividade (1) seja igual a zero ($\cos\alpha_1 = 0$), a Equação C.6 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa do custo da atividade (1) ($\cos\beta_1$).

$$\begin{aligned}\tau_1 &= [T1.ft1.(cos\beta_1 + 1)].[C1.fc1.(cos\alpha_1 + 1)] \\ 2261 &= [10.(cos\beta_1 + 1)].[70.(0 + 1)] \\ \cos\beta_1 &= \left(\frac{2261}{700}\right) - 1 \cong 2,23\end{aligned}\tag{C.6}$$

A partir da Equação 3.11, é possível modelar a estimativa da duração (t_1) da atividade (1) para a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_1 = 2,23$). A Equação C.7 apresenta a estimativa da duração para a atividade (1) com a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_1 = 2,23$).

$$\begin{aligned}t_1 &= T1.ft1.(cos\beta_1 + 1) \\ t_1 &= 10.(2,23 + 1) \\ t_1 &\cong 32,3 \text{ dias}\end{aligned}\tag{C.7}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa do custo de R\$ 70,00, a estimativa da duração da atividade (1) é de 32,3 dias.

Assumindo que a variabilidade da estimativa do custo da atividade (1) seja igual a zero ($\cos\beta_1 = 0$), a Equação C.8 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa da duração da atividade (1) ($\cos\alpha_1$).

$$\begin{aligned}\tau_1 &= [T_1.ft_1.(cos\beta_1 + 1)].[C_1.fc_1.(cos\alpha_1 + 1)] \\ 2261 &= [10.(0 + 1)].[70.(cos\alpha_1 + 1)] \\ \cos\alpha_1 &= \left(\frac{2261}{70}\right) - 1 \cong 2,23\end{aligned}\tag{C.8}$$

A partir da Equação 3.12, é possível modelar a estimativa do custo (c_1) da atividade (1) para a variabilidade da estimativa da duração ($\cos\alpha_1 = 2,23$). A Equação C.9 apresenta a estimativa do custo para a atividade (1) com a variabilidade da estimativa da duração ($\cos\alpha_1 = 2,23$).

$$\begin{aligned}c_1 &= C_1.fc_1.(cos\alpha_1 + 1) \\ c_1 &= 70.(2,23 + 1) \\ c_1 &\cong 226 \text{ reais}\end{aligned}\tag{C.9}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa da duração de 10 dias, a estimativa do custo da atividade (1) é de R\$ 226,00.

Assumindo que o Trabalho (τ_2) realizado para completar a atividade (2) seja o produto entre as Equações 3.11 e 3.12, considerando as estimativas planejadas da duração e do custo, bem como suas variabilidades, a Equação C.10 apresenta o Trabalho (τ_2) da atividade (2).

$$\begin{aligned}\tau_2 &= [T_2.ft_2.(cos\beta_2 + 1)].[C_2.fc_2.(cos\alpha_2 + 1)] \\ \tau_2 &= [14.(0,1 + 1)].[100.(0,1 + 1)] = 15,4.110 \cong 1694 \text{ [dias .reais]}\end{aligned}\tag{C.10}$$

Com o propósito de traçar o gráfico com o *trade-off* entre a duração e o custo da atividade (2) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada, deve-se determinar os pontos extremos da curva de *trade-off*.

Assumindo que a variabilidade da estimativa da duração da atividade (2) seja igual a zero ($\cos\alpha_2 = 0$), a Equação C.11 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa do custo da atividade (2) ($\cos\beta_2$).

$$\begin{aligned}\tau_2 &= [T_2 \cdot ft_2 \cdot (\cos\beta_2 + 1)] \cdot [C_2 \cdot fc_2 \cdot (\cos\alpha_2 + 1)] \\ 1694 &= [14 \cdot (\cos\beta_2 + 1)] \cdot [100 \cdot (0 + 1)] \\ \cos\beta_2 &= \left(\frac{1694}{1400}\right) - 1 \cong 0,21\end{aligned}\tag{C.11}$$

A partir da Equação 3.11, é possível modelar a estimativa da duração (t_2) da atividade (2) para a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_2 = 0,21$). A Equação C.12 apresenta a estimativa da duração para a atividade (2) com a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_2 = 0,21$).

$$\begin{aligned}t_2 &= T_2 \cdot ft_2 \cdot (\cos\beta_2 + 1) \\ t_2 &= 14 \cdot (0,21 + 1) \\ t_2 &\cong 17 \text{ dias}\end{aligned}\tag{C.12}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa do custo de R\$ 100,00, a estimativa da duração da atividade (2) é de 17 dias.

Assumindo que a variabilidade da estimativa do custo da atividade (2) seja igual a zero ($\cos\beta_2 = 0$), a Equação C.13 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa da duração da atividade (2) ($\cos\alpha_2$).

$$\begin{aligned}\tau_2 &= [T_2 \cdot ft_2 \cdot (\cos\beta_2 + 1)] \cdot [C_2 \cdot fc_2 \cdot (\cos\alpha_2 + 1)] \\ 1694 &= [14 \cdot (0 + 1)] \cdot [100 \cdot (\cos\alpha_2 + 1)] \\ \cos\alpha_2 &= \left(\frac{1694}{1400}\right) - 1 \cong 0,21\end{aligned}\tag{C.13}$$

A partir da Equação 3.12, é possível modelar a estimativa do custo (c_2) da atividade (2) para a variabilidade da estimativa da duração ($\cos\alpha_2 = 0,21$). A

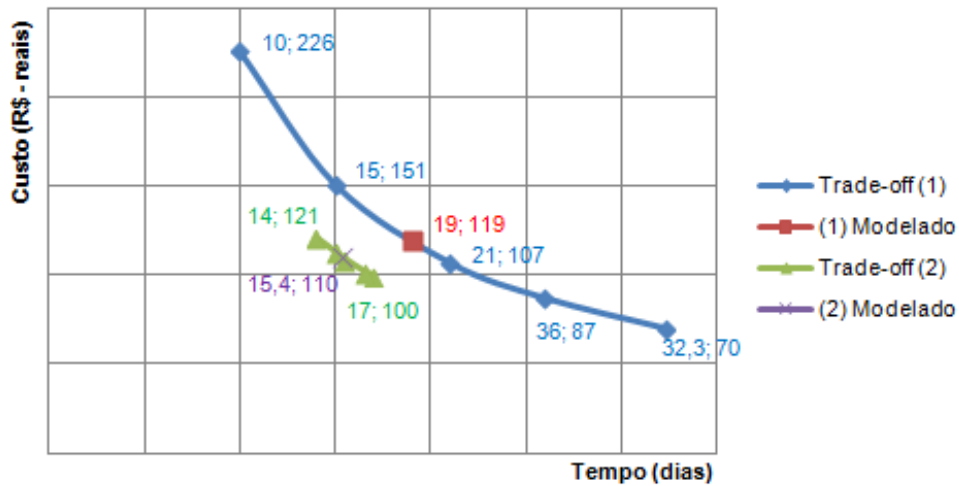
Equação C.14 apresenta a estimativa do custo para a atividade (2) com a variabilidade da estimativa da duração ($\text{cos}\alpha_2 = 0,21$).

$$\begin{aligned}
 c_2 &= C_2 \cdot f_2 \cdot (\text{cos}\alpha_2 + 1) \\
 c_2 &= 100 \cdot (0,21 + 1) \\
 c_2 &\cong 121 \text{ reais}
 \end{aligned}
 \tag{C.14}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa da duração de 14 dias, a estimativa do custo da atividade (2) é de R\$ 121,00.

A Figura C.4 apresenta o *trade-off* (tempo e custo) do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada.

Figura C.4. *Trade-off* (tempo e custo) do projeto com a configuração da cadeia cinemática fechada.



Fonte: Produção do autor (2015).

C.6 ANÁLISE CRÍTICA DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA EM UM PROJETO COM CADEIA CINEMÁTICA FECHADA

Com base na análise da Figura C.4 que apresenta a cadeia cinemática direta fechada com a linguagem IDEF0 para o projeto usado como exemplo, pode-se constatar que existem dois caminhos simultâneos entre o início e o término do projeto.

Sendo que, a técnica da estimativa conjugada pode apoiar na decisão, por exemplo, na determinação do caminho crítico do diagrama de precedências do projeto.

Assim, analisando o gráfico bidimensional e o gráfico de *trade-off* das atividades (1) e (2) com os valores planejados e modelados do projeto com a configuração de cadeia cinemática fechada, pode-se verificar que:

- a) considerando apenas os valores das durações e dos custos planejados, ou seja, sem considerar as variabilidades das durações e dos custos, o caminho passando pela atividade (2) é considerado como o caminho crítico do projeto;
- b) entretanto, considerando os valores das durações e dos custos modelados, ou seja, considerando as variabilidades das durações e dos custos, o caminho passando pela atividade (1) torna-se o caminho crítico do projeto, e
- c) assim, para o caso descrito neste exemplo, sem considerar as variabilidades das durações e dos custos, provavelmente, diminuiria as chances de sucesso do projeto, pois, durante a execução do projeto, o foco de atenção seria no caminho passando pela atividade (2). Enquanto que a modelagem realizada com a técnica da estimativa conjugada demonstrou que o foco de atenção deve ser no

caminho passando pela atividade (1), que apresentou maiores valores de duração e custo para o projeto.

ANEXO D - IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA EM UM PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS

Este Anexo tem como objetivo efetuar a implementação da técnica da estimativa conjugada em um exemplo ilustrativo de projeto com diagrama de precedências na configuração da cadeia cinemática aberta, porém com dois tipos de custos, sendo custo direto e indireto para cada atividade do projeto.

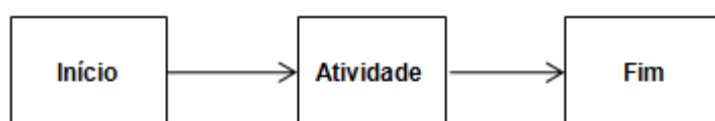
Por opção desta tese, este é um exemplo em que a cinemática inversa da técnica da estimativa conjugada é implementada em um projeto com cadeia cinemática aberta com custos diretos e indiretos, assim, são tratados os assuntos relacionados abaixo:

- a) apresentar as durações e os custos (diretos e indiretos) planejados e executados;
- b) determinar o diagrama IDEF0, para as informações das durações e dos custos planejados e executados, bem como para os fatores críticos;
- c) determinar o gráfico bidimensional (tempo e custo) das atividades do projeto;
- d) modelar as variabilidades das durações e dos custos do projeto, bem como determinar as curvas da análise do *trade-off* entre as durações e os custos, e
- e) analisar criticamente as curvas de *trade-offs* entre as durações e os custos das atividades do projeto.

D.1 APRESENTAÇÃO ESTRUTURADA DAS INFORMAÇÕES DO PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS

A Figura D.1 apresenta o diagrama de precedências do projeto utilizado como exemplo para a implementação da cadeia cinemática inversa aberta com a técnica da estimativa conjugada.

Figura D.1. Diagrama de precedências do exemplo da cadeia cinemática inversa aberta.



Fonte: Produção do autor (2015).

O projeto usado como exemplo para ilustrar a implementação da técnica da estimativa conjugada na configuração da cadeia cinemática aberta com dois tipos de custos, é composto por:

- a) três atividades, sendo uma atividade de início, uma atividade de fim ou término, e uma atividade com dois custos (direto e indireto);
- b) como a atividade possui dois tipos de custos, logo, a atividade deve apresentar dois tipos de durações (direta e indireta), respectivamente ao tipo de custo;
- c) dessa forma, a atividade com dois tipos de custos e dois tipos de durações deve ser representada por duas atividade simultâneas, sendo uma atividade para a duração e custo direto, e outra atividade para a duração e custo indireto. Assim, os índices dos tipos da duração e do custo são representados por direto (d) e indireto (i);

- d) a duração (direta e indireta) é representada na unidade de dias, enquanto que o custo (direto e indireto) é representado na unidade de reais (R\$);
- e) a atividade apresenta duração direta planejada ($T_d = 10$ dias) e custo direto planejado ($C_d = R\$ 100,00$), bem como também apresenta duração direta executada ($t_d = 15$ dias) e custo direto executado ($c_d = R\$ 120,00$);
- f) a atividade apresenta duração indireta planejada ($T_i = 8$ dias) e custo indireto planejado ($C_i = R\$ 60,00$), bem como apresenta duração indireta executada ($t_i = 12$ dias) e custo indireto executado ($c_i = R\$ 100,00$), e
- g) o caminho crítico do projeto, considerando as variabilidades das durações e dos custos, é o percurso referente à atividade com a duração e o custo do tipo direto.

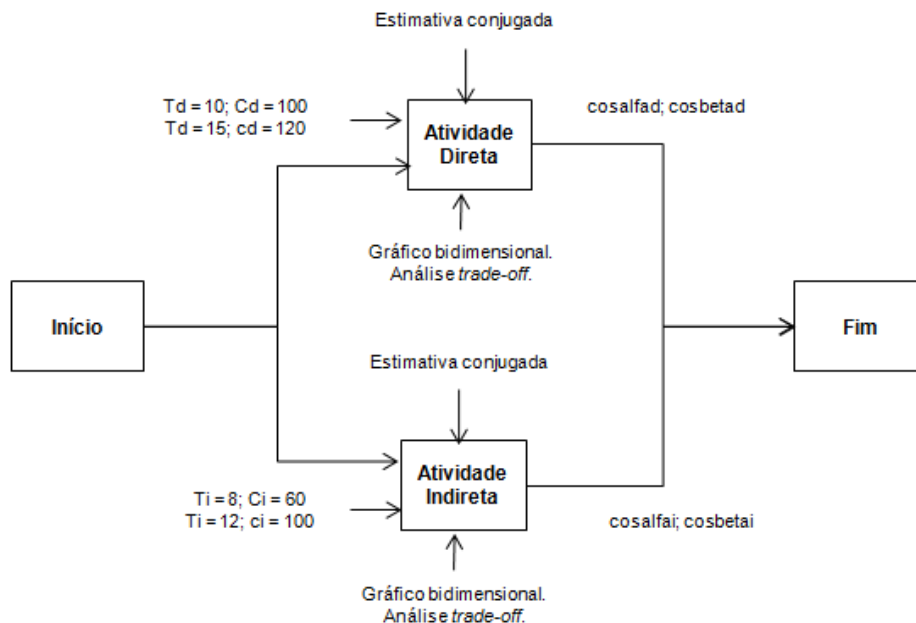
D.2 DIAGRAMA IDEF0 DO PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS

A Figura D.2, apresenta o diagrama IDEF0 com os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e das variáveis (executados) das atividades do projeto com dois tipos de custos, com a configuração da cinemática inversa da técnica de estimativa conjugada. Seguem algumas observações e comentários:

- a) os fatores críticos das durações e dos custos das atividades (direta) e (indireta) devem ser considerados como ($f_{td} = f_{ti} = f_{cd} = f_{ci} = 1$), sendo omitido no diagrama IDEF0;
- b) o gráfico bidimensional (tempo e custo) e a análise de *trade-off* são utilizadas como ferramentas de gerenciamento de projeto, e

- c) a técnica da estimativa conjugada é aplicada para modelar as variabilidades da duração direta (cosalfad) e da duração indireta (cosalfai), bem como do custo direto (cosbetad) e do custo indireto (cosbetai).

Figura D.2. Atividades do projeto com dois tipos de custos com a linguagem IDEF0.



Fonte: Produção do autor (2015).

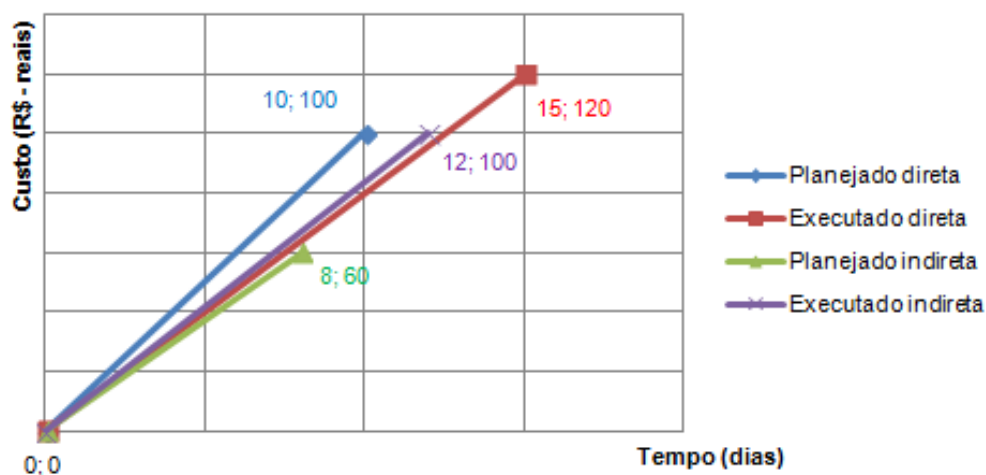
D.3 GRÁFICO BIDIMENSIONAL DO PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS

A Figura D.3, apresenta o gráfico bidimensional para os valores dos parâmetros (estimativas ou planejados) e variáveis (executados) das atividades do projeto com dois tipos de custos (direto e indireto). Seguem algumas observações e comentários:

- a) as atividades do projeto são espacialmente identificadas no sistema de coordenadas bidimensional (tempo e custo);

- b) o gráfico na cor azul é referente à duração direta e ao custo direto planejados, bem como o gráfico na cor vermelha é referente à duração direta e ao custo direto executados, e
- c) o gráfico na cor verde é referente à duração indireta e ao custo indireto planejados, bem como o gráfico na cor roxa é referente à duração indireta e ao custo indireto executados.

Figura D.3. Gráfico bidimensional (tempo e custo) do projeto com dois tipos de custos.



Fonte: Produção do autor (2015).

Analisando o gráfico da Figura D.3, constata-se que existem diferenças entre a curva planejada e a executada para o projeto com dois tipos de custos. Segundo os conceitos da técnica da estimativa conjugada:

- a) as atividades simultâneas (direta e indireta) foram concluídas com duração maior do que o planejado, ou seja, as atividades foram concluídas com atraso. O atraso está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa dos custos (direto e indireto) das atividades, e

- b) as atividades simultâneas (direta e indireta) foram concluídas com custo maior do que o planejado, ou seja, as atividades foram concluídas acima do custo planejado. O não cumprimento do orçamento está relacionado à variabilidade (incerteza aleatória) proporcionada pela estimativa das durações das atividades.

D.4 MODELAGEM DAS VARIABILIDADES E ANÁLISE DE *TRADE-OFF* DO PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS

Com as informações apresentadas no diagrama do IDEF0 e no gráfico bidimensional, por meio da técnica da estimativa conjugada são modeladas as variabilidades das estimativas das durações e dos custos das atividades simultâneas (direta e indireta), bem como é realizada a análise de *trade-off* entre a duração e o custo do projeto.

Conforme descrito por Kerzner (2009), o *trade-off* é baseado nas restrições do projeto (tempo, custo e performance), este exemplo assume que a performance do projeto é bem definida, enquanto que, o tempo e o custo podem ser diferentes do planejado, frequentemente, maiores do que o cronograma e o orçamento planejado.

D.4.1 MODELAGEM DAS VARIABILIDADES E ANÁLISE DE *TRADE-OFF* DA ATIVIDADE DIRETA

A variabilidade da estimativa do custo da atividade direta (custo) depende da estimativa da duração direta planejada e da duração direta executada, a variabilidade da estimativa do custo direto da atividade é apresentada pela Equação D.1:

$$\begin{aligned}
td &= Td.ftd.(cos\beta_{ad} + 1) \\
15 &= 10.(cos\beta_{ad} + 1) \\
cos\beta_{ad} &= \frac{15}{10} - 1 \cong 0,5
\end{aligned}
\tag{D.1}$$

Enquanto que, a variabilidade da duração da atividade direta ($cos\alpha_{fad}$) depende da estimativa do custo direto planejado e do custo direto executado, a variabilidade da estimativa da duração direta da atividade é apresentada pela Equação D.2:

$$\begin{aligned}
cd &= Cd.fcd.(cos\alpha_{fad} + 1) \\
120 &= 100.(cos\alpha_{fad} + 1) \\
cos\alpha_{fad} &= \frac{120}{100} - 1 = 0,2
\end{aligned}
\tag{D.2}$$

A partir das Equações 3.11 e 3.12, que envolvem as estimativas planejadas da duração e do custo da atividade direta, bem como suas variabilidades, pode-se realizar a análise de *trade-off* da atividade direta para o projeto com dois tipos de custos.

Assumindo que o Trabalho (τd) realizado para completar a atividade direta seja o produto entre as Equações 3.11 e 3.12, considerando as estimativas planejadas da duração e do custo, bem como suas variabilidades modeladas, a Equação D.3 apresenta o Trabalho (τd) da atividade direta.

$$\begin{aligned}
\tau d &= [Td.ftd.(cos\beta_{ad} + 1)].[Cd.fcd.(cos\alpha_{fad} + 1)] \\
\tau d &= [10.(0,5 + 1)].[100.(0,2 + 1)] \\
\tau d &= 15.120 \cong 1800 \text{ [dias .reais]}
\end{aligned}
\tag{D.3}$$

Com o propósito de traçar o gráfico com o *trade-off* entre a duração e o custo da atividade direta, deve-se determinar os pontos extremos da curva de *trade-off*.

Assumindo que a variabilidade da estimativa da duração da atividade direta seja igual a zero ($\cos\alpha_{fad} = 0$), a Equação D.4 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa do custo da atividade direta ($\cos\beta_{tad}$).

$$\begin{aligned} \tau d &= [Td.ftd.(\cos\beta_{tad} + 1)].[Cd.fcd.(\cos\alpha_{fad} + 1)] \\ 1800 &= [10.(\cos\beta_{tad} + 1)].[100.(0 + 1)] \\ \cos\beta_{tad} &= \left(\frac{1800}{1000}\right) - 1 \cong 0,8 \end{aligned} \quad (D.4)$$

A partir da Equação 3.11, é possível modelar a estimativa da duração (td) da atividade direta para a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_{tad} = 0,8$). A Equação D.5 apresenta a estimativa da duração para a atividade direta com a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_{tad} = 0,8$).

$$\begin{aligned} td &= Td.ftd.(\cos\beta_{tad} + 1) \\ td &= 10.(0,8 + 1) \\ td &\cong 18 \text{ dias} \end{aligned} \quad (D.5)$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa de custo de R\$ 100,00, a estimativa da duração da atividade direta é de 18 dias.

Assumindo que a variabilidade da estimativa do custo da atividade direta seja igual a zero ($\cos\beta_{tad} = 0$), a Equação D.6 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa da duração da atividade direta ($\cos\alpha_{fad}$).

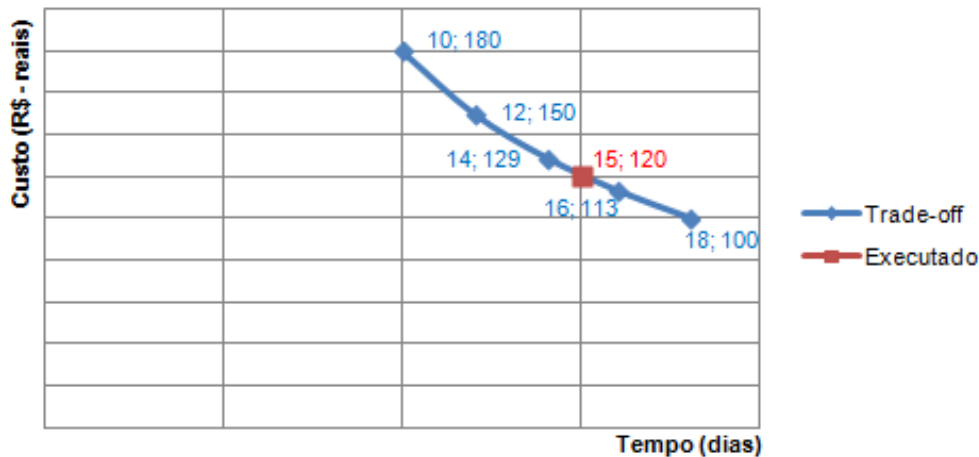
$$\begin{aligned} \tau d &= [Td.ftd.(\cos\beta_{tad} + 1)].[Cd.fcd.(\cos\alpha_{fad} + 1)] \\ 1800 &= [10.(0 + 1)].[100.(\cos\alpha_{fad} + 1)] \\ \cos\alpha_{fad} &= \left(\frac{1800}{1000}\right) - 1 \cong 0,8 \end{aligned} \quad (D.6)$$

A partir da Equação 3.12, é possível modelar a estimativa do custo (cd) da atividade direta para a variabilidade da estimativa da duração ($cosalfad = 0,8$). A Equação D.7 apresenta a estimativa do custo da atividade direta para a variabilidade da estimativa da duração ($cosalfad = 0,8$).

$$\begin{aligned}
 cd &= Cd.fcd.(cosalfad + 1) \\
 cd &= 100.(0,8 + 1) \\
 cd &\cong 180 \text{ reais}
 \end{aligned}
 \tag{D.7}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa da duração de 10 dias, a estimativa do custo da atividade direta é de R\$ 180,00. A Figura D.4 apresenta o *trade-off* (tempo e custo) para a atividade direta.

Figura D.4. *Trade-off* (tempo e custo) da atividade direta do projeto com dois tipos de custos.



Fonte: Produção do autor (2015).

D.4.2 MODELAGEM DAS VARIABILIDADES E ANÁLISE DE *TRADE-OFF* DA ATIVIDADE INDIRETA

A variabilidade da estimativa do custo da atividade indireta ($cosbetai$) depende da estimativa da duração indireta planejada e da duração indireta executada, a

variabilidade da estimativa do custo indireto da atividade é apresentada pela Equação D.8:

$$\begin{aligned}
 ti &= Ti.fti.(cos\beta_{tai} + 1) \\
 12 &= 8.(cos\beta_{tai} + 1) \\
 cos\beta_{tai} &= \frac{12}{8} - 1 \cong 0,5
 \end{aligned}
 \tag{D.8}$$

Enquanto que, a variabilidade da duração da atividade indireta ($cos\alpha_{fai}$) depende da estimativa do custo indireto planejado e do custo indireto executado, a variabilidade da estimativa da duração indireta da atividade é apresentada pela Equação D.9:

$$\begin{aligned}
 ci &= Ci.fci.(cos\alpha_{fai} + 1) \\
 100 &= 60.(cos\alpha_{fai} + 1) \\
 cos\alpha_{fai} &= \frac{100}{60} - 1 = 0,67
 \end{aligned}
 \tag{D.9}$$

A partir das Equações 3.11 e 3.12, que envolvem as estimativas planejadas da duração e do custo da atividade indireta, bem como suas variabilidades, pode-se realizar a análise de *trade-off* da atividade indireta para o projeto com dois tipos de custos.

Assumindo que o Trabalho (τ_i) realizado para completar a atividade indireta seja o produto entre as Equações 3.11 e 3.12, considerando as estimativas planejadas da duração e do custo, bem como suas variabilidades modeladas, a Equação D.10 apresenta o Trabalho (τ_i) da atividade indireta.

$$\begin{aligned}
 \tau_i &= [Ti.fti.(cos\beta_{tai} + 1)].[Ci.fci.(cos\alpha_{fai} + 1)] \\
 \tau_i &= [8.(0,5 + 1)].[60.(0,67 + 1)] \\
 \tau_i &= 12.100 \cong 1200 \text{ [dias .reais]}
 \end{aligned}
 \tag{D.10}$$

Com o propósito de traçar o gráfico com o *trade-off* entre a duração e o custo da atividade indireta, deve-se determinar os pontos extremos da curva de *trade-off*.

Assumindo que a variabilidade da estimativa da duração da atividade indireta seja igual a zero ($\cos\alpha_{fai} = 0$), a Equação D.11 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa do custo da atividade indireta ($\cos\beta_{tai}$).

$$\begin{aligned} \pi_i &= [T_i.ft_i.(\cos\beta_{tai} + 1)].[C_i.fci.(\cos\alpha_{fai} + 1)] \\ 1200 &= [8.(\cos\beta_{tai} + 1)].[60.(0 + 1)] \\ \cos\beta_{tai} &= \left(\frac{1200}{480}\right) - 1 \cong 1,5 \end{aligned} \tag{D.11}$$

A partir da Equação 3.11, é possível modelar a estimativa da duração (t_i) da atividade indireta para a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_{tai} = 1,5$). A Equação D.12 apresenta a estimativa da duração para a atividade indireta com a variabilidade da estimativa do custo ($\cos\beta_{tai} = 1,5$).

$$\begin{aligned} t_i &= T_i.ft_i.(\cos\beta_{tai} + 1) \\ t_i &= 8.(1,5 + 1) \\ t_i &\cong 20 \text{ dias} \end{aligned} \tag{D.12}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa de custo de R\$ 60,00, a estimativa da duração da atividade direta é de 20 dias.

Assumindo que a variabilidade da estimativa do custo da atividade indireta seja igual a zero ($\cos\beta_{tai} = 0$), a Equação D.13 apresenta o cálculo da variabilidade da estimativa da duração da atividade indireta ($\cos\alpha_{fai}$).

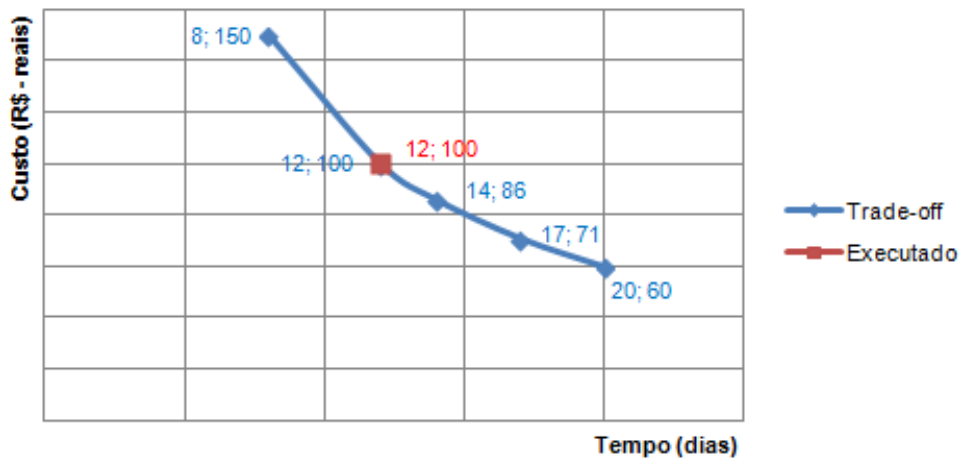
$$\begin{aligned} \pi_i &= [Ti.fti.(cos\beta_{tai} + 1)].[Ci.fci.(cos\alpha_{fai} + 1)] \\ 1200 &= [8.(0 + 1)].[60.(cos\alpha_{fai} + 1)] \\ \cos\alpha_{fai} &= \left(\frac{1200}{480}\right) - 1 \cong 1,5 \end{aligned} \tag{D.13}$$

A partir da Equação 3.12, é possível modelar a estimativa do custo (ci) da atividade indireta para a variabilidade da estimativa da duração (cosalfai = 1,5). A Equação D.14 apresenta a estimativa do custo da atividade indireta para a variabilidade da estimativa da duração (cosalfai = 1,5).

$$\begin{aligned} ci &= Ci.fci.(cos\alpha_{fai} + 1) \\ ci &= 60.(1,5 + 1) \\ ci &\cong 150 \text{ reais} \end{aligned} \tag{D.14}$$

Segundo a técnica da estimativa conjugada, para a estimativa da duração de 8 dias, a estimativa do custo da atividade indireta é de R\$ 150,00. A Figura D.5 apresenta o *trade-off* (tempo e custo) para a atividade indireta.

Figura D.5. *Trade-off* (tempo e custo) da atividade indireta do projeto com dois tipos de custos.



Fonte: Produção do autor (2015).

D.5 COMENTÁRIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DA TÉCNICA DA ESTIMATIVA CONJUGADA EM UM PROJETO COM DOIS TIPOS DE CUSTOS

Analisando criticamente a implementação da técnica da estimativa conjugada em um exemplo de projeto com dois tipos de custos, mesmo sendo um exemplo com apenas uma atividade, pode-se realizar os comentários a seguir:

- a) trata-se de dois tipos de custos (diretos e indiretos), então, deve-se existir dois tipos de durações (direta e indireta). Se fossem três tipos de custos, seriam três tipos de durações, e assim, sucessivamente;
- b) sendo uma atividade do projeto com mais de um tipo de custo, a atividade deve ser segmentada em sub atividades simultâneas, sendo uma atividade para cada tipo de custo e duração;
- c) o exemplo apresentado neste capítulo é bem simples, mas, cumpriu o seu papel em demonstrar a implementação da técnica da estimativa conjugada para casos com mais de um tipo de custo e duração.
- d) assim, a técnica da estimativa conjugada também pode ser implementada em projetos com mais de um tipo de custo e duração, também nas configurações cinemática fechada (paralela) e híbrida (série e paralela);
- e) a atividade direta planejada e a executada é considerada como o caminho crítico do projeto, com duração e custo maiores do que atividade indireta, e
- f) conforme as curvas de *trade-offs*, a atividade indireta será o caminho crítico, em relação ao tempo, apenas com durações indireta executadas maiores que 18 dias e igual a 20 dias.