MARCELO JOSÉ RUV LEMES

COMPLEXIDADE, ACOPLAMENTO E CRITICALIDADE (C^2A) COMO INDICADORES DE RISCO EM PROJETOS DE SISTEMAS

São Paulo
2012

MARCELO JOSÉ RUV LEMES

COMPLEXIDADE, ACOPLAMENTO E CRITICALIDADE (C^2A) COMO INDICADORES DE RISCO EM PROJETOS DE SISTEMAS

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

São Paulo
2012

MARCELO JOSÉ RUV LEMES

COMPLEXIDADE, ACOPLAMENTO E CRITICALIDADE (C^2A) COMO INDICADORES DE RISCO EM PROJETOS DE SISTEMAS

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

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador:
Prof. Dr. João Batista de Camargo Jr.

São Paulo
2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de janeiro de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Lemes, Marcelo José Ruv
Complexidade, acoplamento e criticalidade (C^2A) como indicadores de risco em projetos de sistemas / M.J.R. Lemes. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
278 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1. Complexidade 2. Segurança de computadores 3. Risco 4. Teoria da informação I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II. t.

Para Márcia e Raphael.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às instituições USP e EMBRAER. Ambas têm muito em comum. Poder participar destes dois ambientes é antes de qualquer coisa um privilégio.

Ao Sergio Carvalho, meu gerente ao iniciar essa jornada, que entendeu o quão importante era para mim a realização de um Doutorado e me autorizou a iniciar o programa. Ao Felipe Eudes, meu atual gerente, por continuar me apoiando em termos do tempo que precisei para conduzir a pesquisa. A ambos o meu reconhecimento, pois sem o suporte dado esta Tese não se realizaria.

Aos colegas da EMBRAER que entre uma conversa e outra me forneceram ideias importantes para a Tese, muitas vezes mesmo sem se aperceberem disso. Em particular meu agradecimento para o Antonio Domiciano, Andrea Barp, Antonio Vasco e Pedro Endo.

Ao João Batista, meu orientador, pela sua confiança e apoio ao meu trabalho. Seu envolvimento foi determinante para que este trabalho chegasse ao fim.

Aos colegas do Grupo de Análise de Segurança – GAS, em particular ao Lúcio Vismari, Mário Corrêa e Ricardo Gimenes. As conversas que tivemos sempre foram muito estimulantes. Espero poder retribuir.

De modo especial gostaria de agradecer aos Professores Luiz Barco e Henrique Schützer Del Nero (In Memorian). Nunca imaginei que duas pessoas pudessem influenciar tanto minha maneira de pensar.

RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas embarcados de uso aeronáutico tem sido objeto de preocupação por parte de especialistas no que se refere à segurança. A complexidade implica não somente em novos tipos de perigos como também os tornam mais difíceis de serem identificados. O cenário exige maior atenção quando um sistema complexo apresenta também alto acoplamento entre seus elementos. A maioria dos métodos utilizados na análise de segurança foi concebida para sistemas mecânicos e adaptados para sistemas eletrônicos. De maneira geral, a evolução no campo das tecnologias não tem sido refletida nas abordagens adotadas para a segurança de sistemas. A Teoria de Acidentes Normais proposta por Charles Perrow estabelece uma importante ligação entre complexidade, acoplamento e acidentes. Entretanto, entende-se que somente estes dois parâmetros não são suficientes para se ter um indicador capaz de capturar potenciais riscos relativos à segurança de sistemas. É necessário identificar também o quão critica é contribuição de cada elemento do sistema para a segurança. Complexidade, acoplamento e criticalidade formam a base do índice C^2A desenvolvido nesta Tese como um indicador de risco para a segurança de sistemas. A aplicação do índice C^2A é exercitada em um estudo de caso que utiliza um sistema de controle ambiental de uma aeronave de transporte regional. Adicionalmente são realizadas considerações sobre como implantar a utilização do índice C^2A no processo de desenvolvimento de sistemas proposto pela norma ARP4754A.

Palavras-chave: Complexidade. Segurança de Computadores. Risco. Teoria da Informação.

ABSTRACT

The increasing complexity of on board systems for aeronautical applications has been a concern for experts in regard to safety. The complexity involves not only new kinds of hazards as well as makes them more difficult to identify. The scenario requires more attention when a complex system also presents high coupled elements. Most methods used in the safety analysis were designed for mechanical systems and adapted for electronic systems. In general, the advances in the technology field have not been reflected in the system safety methods. The Normal Accident Theory created by Charles Perrow proposed an important link between complexity, coupling and accidents. However, only these two parameters are not sufficient to have a metric of the potential risks relating to safety. It is also necessary to identify how critical is the contribution of each element of the system to the safety. Complexity, coupling and criticality are the basis of the C^2A index developed in this thesis as a risk indicator related to safety aspects. The application of the C^2A index is exercised in a case study using an environmental control system of a regional transport aircraft. Additionally considerations are made about how to deploy the use of the index C^2A in the systems development process as proposed by the standard ARP4754A.

Keywords: Complexity. Computer Safety. Risk. Information Theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 1 21
Figura 1.2 – Acidentes aéreos de 1942 a 2009 (AVIATION DATABASE, 2011) 22
Figura 1.3 – Disciplinas e contribuição da Tese 31
Figura 2.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 2 33
Figura 2.2 – Definição do escopo de um sistema 35
Figura 2.3 – Estruturas de sistemas 38
Figura 2.4 – Hierarquia de um sistema 40
Figura 2.5 – Seleção de elementos relevantes do sistema para a construção de um modelo 42
Figura 3.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 3 48
Figura 3.2 – Exemplo de *Design Structure Matrix* 52
Figura 3.3 – Reticulado de Galois – adaptado de (PRISS, 2007) 52
Figura 3.4 – Exemplo de *Domain Mapping Matrix* 54
Figura 3.5 – HoQ e correspondência com matrizes do tipo Intra e Inter-domínio – adaptado de Maurer e Lindemann (2007) 55
Figura 3.6 – Exemplo de *Multiple-Domain Matrix* 56
Figura 3.7 – Esquema de classificação para DSM – adaptado de Browning (2001) 59
Figura 3.8 – Representação de tipos múltiplos de relacionamentos – adaptado de Pimmler e Eppinger (1994) 63
Figura 3.9 – Impacto da organização dos dados na visualização de matrizes – adaptado de Shen; Ma (2007) 63
Figura 3.10 – Exemplo de mapa térmico 64
Figura 3.11 – Visualização de matrizes em grafos 65
Figura 4.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 4 68
Figura 4.2 – Interação direta e indireta entre elementos de um sistema 71
Figura 4.3 – Interação por meio de elemento externo ao sistema 73
Figura 4.4 – Interação de funções de domínios diferentes 73
Figura 4.5 – Interação com influência temporal 74
Figura 4.6 – Acoplamento relativo entre sistemas (Adaptado de Perrow (1999)) 77
Figura 4.7 – Grafo referente a um sistema de 8 elementos 79
Figura 4.8 – Tabela de conexões do sistema apresentado na Figura 4.7 81
Figura 5.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 5 85
Figura 5.2 – Padrões de conexões entre elementos de um sistema (GELL-MANN, 1995) 89

Figura 5.3 – Matriz de Stacey (adaptado de STACEY (1993)) 94
Figura 6.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 6 112
Figura 6.2 – Probabilidade x severidade do efeito de uma condição de falha 116
Figura 6.3 – Processo de desenvolvimento de sistemas (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011) 120
Figura 7.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 7 127
Figura 7.2 – Gradiente de cores utilizado na representação de valores medidos 133
Figura 7.3 – Exemplo de mapa térmico representativo das conexões de um sistema 133
Figura 7.4 – Complexidade/acoplamento medido representado em relação ao valor máximo da complexidade/acoplamento interno e externo do sistema 134
Figura 7.5 – Relação entre a complexidade medida e a correspondente máxima 135
Figura 7.6 – Representação da conexão entre sistemas por meio de matrizes n^2 136
Figura 7.7 – Representação da conexão entre os subsistemas do sistema S 137
Figura 7.8 – Grafo representando as conexões entre elementos dos sistemas S_1, S_2, S_3 e S_4 139
Figura 7.9 – Representação matricial das conexões entre elementos dos sistemas S_1,S_2,S_3 e S_4 140
Figura 7.10 – Representação de informações de domínios diferentes 141
Figura 7.11 – Exemplo de máquina de estado associada às matrizes de conexão entre elementos de um sistema 143
Figura 7.12 – Sistema com dois elementos conectados e 1 a 4 conexões por elemento 146
Figura 7.13 – Complexidade máxima para até 20 elementos conectados 147
Figura 7.14 – Quantidade de informação por elemento para até 20 elementos conectados 148
Figura 7.15 – Matriz de conexões da Figura 7.9 com as frequências das conexões de S_{12} 149
Figura 7.16 – Matriz com a complexidade efetiva dos elementos de S_{12} 152
Figura 7.17 – Relação entre a complexidade interna e externa de S_{12} e correspondentes máximos 153
Figura 7.18 – Relação entre a complexidade de S_{12} e correspondente máximo 154
Figura 7.19 – Fator de acoplamento máximo para C = [1, 20] 159
Figura 7.20 – Características de acoplamento do sistema S_{12} 161
Figura 7.21 – Acoplamento máximo para sistemas com [2,20] elementos e uma característica de acoplamento acumulativo e uma não-acumulativa 163
Figura 7.22 – Acoplamento por elemento para sistema com [2,20] elementos 164
Figura 7.23 – Matriz com o acoplamento efetivo dos elementos de S_{12} 165

Figura 7.24 – Relação entre o acoplamento interno e externo de S_{12} e correspondentes máximos 166
Figura 7.25 – Relação entre o acoplamento de S_{12} e correspondente máximo 166
Figura 7.26 – Conexão entre elementos com classificação de condições de falha diferentes..... 168
Figura 7.27 – Criticalidade das conexões do sistema S_{12} 173
Figura 7.28 – Índice C^2A máximo para sistemas com [1,20] elementos..... 178
Figura 7.29 – C^2A por elemento do sistema..... 179
Figura 7.30 – Índice C^2A interno e externo de S_{12} em relação aos máximos correspondentes..... 180
Figura 7.31 – Índice C^2A para S_{12} em relação ao máximo correspondente 180
Figura 7.32 – Complexidade/acoplamento em função da criticalidade 181
Figura 7.33 – Relação entre acoplamento e complexidade dos elementos de S_{12} . 182
Figura 7.34 – Processo de desenvolvimento proposto pela ARP4754 modificado . 183
Figura 8.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 8 186
Figura 8.2 – Diagrama representativo da instalação do *environmental control system* 192
Figura 8.3 – Alocação de requisitos de aeronave para o *environmental control system* 194
Figura 8.4 – Conexões entre sistemas (*environmental control system*) 196
Figura 8.5 – Conexões do sistema de *bleed* 199
Figura 8.6 – Conexões do sistema de *wind shield heating*..... 201
Figura 8.7 – Complexidade efetiva em relação à complexidade máxima do *Environmental control system* 205
Figura 8.8 – Acoplamento em relação ao acoplamento máximo do *Environmental control system* 217
Figura 8.9 – Criticalidade das conexões dos elementos do *environmental control system* em relação a respectiva criticalidade máxima..... 222
Figura 8.10 – Relação entre o valor do índice C^2A efetivo e correspondente valor máximo..... 226
Figura 8.11 – Comparação relativa das complexidades externas efetivas..... 227
Figura 8.12 – Comparação relativa das complexidades internas efetivas..... 228
Figura 8.13– Comparação relativa dos acoplamentos externos efetivos 228
Figura 8.14 – Comparação relativa dos acoplamentos internos efetivos 229
Figura 8.15 – Criticalidade das conexões do *environment control system* 230
Figura 8.16 – C^2A das conexões externas do *environment control system*..... 231
Figura 9.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 9 233

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Características de sistemas simples, complicados e complexos.....96
Tabela 5.2 – Principais características dos sistemas complexos 100
Tabela 5.3 – Características da complexidade em sistemas de engenharia.....102
Tabela 5.4 – Complexidade de uma aeronave.....104
Tabela 5.5 – Complexidade de uma aeronave (Cont.).....105
Tabela 6.1 – Severidade dos danos provocados por um acidente (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002).....114
Tabela 6.2 – Condições de falha X probabilidade de ocorrência (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002).....115
Tabela 6.3 – Níveis de integridade e correspondentes condições de falha 119
Tabela 6.4 – Sistemas complexos X lineares (PERROW, 1999 pg. 88).....123
Tabela 7.1 – Complexidade máxima para até 20 elementos conectados 147
Tabela 7.2 – Fator máximo de acoplamento para *C* = [1, 20] 159
Tabela 7.3 – Classificação das condições de falha e fatores de criticalidade para o sistema S_{12}.....172
Tabela 7.4 – Criticalidade das conexões de S_{12}.....172
Tabela 7.5 – Índice C^2A do sistema S_{12} 177
Tabela 7.6 – Sumário dos valores de complexidade, acoplamento e criticalidade do sistema S_{12}.....181
Tabela 8.1 – Requisitos de aeronave.....187
Tabela 8.2 – Sistemas da aeronave.....188
Tabela 8.3 – Detalhamento dos sistemas *environmental control system*.....190
Tabela 8.4 – Sumário das características de acoplamento identificadas para o sistema de *Bleed* e *Wind shield heating*.....207
Tabela 8.5 – Características de acoplamento das conexões internas do sistema de *bleed*.....209
Tabela 8.6 – Características de acoplamento das conexões externas do sistema de *bleed*.....210
Tabela 8.7 – Características de acoplamento das conexões internas do sistema de *wind shield heating*.....213
Tabela 8.8 – Características de acoplamento das conexões externas do sistema de *wind shield heating*.....213
Tabela 8.9 – Sumário das condições de falha do *environmental control system*....218
Tabela 8.10 – Sumário das condições de falha dos sistemas que possuem conexão com o *environmental control system*.....220

Tabela 8.11 – Criticalidade das conexões externas do *environmental control system* 221
Tabela 8.12 – Índice C^2A relativo às conexões internas do *enviromental control system* 222
Tabela 8.13 – Índice C^2A relativo às conexões internas do *enviromental control system (cont.)* 223
Tabela 8.14 – Índice C^2A relativo às conexões internas do *enviromental control system (cont.)* 224
Tabela 8.15 – Índice C^2A relativo às conexões externas do e*nviromental control system* 224
Tabela 8.16 – Índice C^2A relativo às conexões externas do e*nviromental control system (cont.)* 225
Tabela 8.17 – Valores máximos para complexidade, acoplamento e criticalidade.. 225

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Advisory Circular
ALARP	As Low As Reasonably Possible
APU	Auxiliary Power Unit
ARP	Aeroespace Recommended Practice
ASA	Aircraft Safety Assessment
ASIL	Automotive Safety Intgrity Level
ASQ	American Society for Quality
ATA	Air Transportation Association
ATM	Air Traffic Management
CAST	Certification Authorities Software Team
CCA	Common Cause Analysis
CI	Coupling Index
CM	Connective Maps
DAL	Development Assurance Level
DfV	Design for Variety
DMM	Domain-Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
EASA	European Aviation Safety Agency
ESM	Engineering System Matrix
EUA	Estados Unidos da América
FA	Função de Aeronave
FAA	Federal Aviation Administration
FCA	Formal Concept Analysis
FHA	Functional Hazard Assessment
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FMECA	Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
GAS	Grupo de Análise de Segurança de Sistemas
HAZOP	Hazard and Operability Analysis

HoQ	House of Quality
HRT	High Reliability Theory
ICAO	International Civil Aviation Organization
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFIP	International Federation for Information Processing
ISM	Interface Structure Matrix
IPM	Interpretative Program Modeling
ISO	International Organization for Standardization
MBD	Model Based Development
MDM	Multiple-Domain Matrix
MFD	Modular Fuction Deployment
MID	Module-Indication Matrix
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NAS	National Airspace System
NAT	Normal Accident Theory
PASA	Preliminary Aircraft Safety Assessment
PSSA	Preliminary System Safety Assessment
QFD	Quality Function Deployment
RC	Rework Probability
SAE	Society of Automotive Engineers
SSA	System Safety Assessment
SIL	Safety Integrity Level
SMD	Safety Method Database
SOS	System of Systems
STAMP	Systems-Theoretic Accidents Models and Processes
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UML	Unified Modeling Language
UPP	Unified Program Planning

LISTA DE SÍMBOLOS

Γ	Complexidade
Γ^E	Complexidade efetiva
Γ^M	Complexidade máxima
Γ_i	Complexidade interna
Γ_e	Complexidade externa
Φ	Acoplamento
Φ^E	Acoplamento efetivo
Φ^M	Acoplamento máximo
Φ_i	Acoplamento interno
Φ_e	Acoplamento externo
ϕ	Fator de acoplamento
Λ	Criticalidade
Λ^M	Criticalidade máxima
λ	Fator de criticalidade
λ^m	Fator de criticalidade mínimo
λ^M	Fator de criticalidade máximo
C^2A	Índice de Complexidade, Criticalidade e Acoplamento
C^2A^E	Índice de Complexidade, Criticalidade e Acoplamento efetivo
C^2A^M	Índice de Complexidade, Criticalidade e Acoplamento máximo
C^2A_i	Índice de Complexidade, Criticalidade e Acoplamento interno
C^2A_e	Índice de Complexidade, Criticalidade e Acoplamento externo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 21
1.1 CONTEXTO 22
1.2 PROBLEMA 25
1.3 OBJETIVO 27
1.4 ABORDAGEM 28
1.5 RELEVÂNCIA DA TESE 29
1.6 ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS 31
2 SISTEMAS 33
2.1 ETIMOLOGIA E DEFINIÇÃO 34
2.2 EMERGÊNCIA 36
2.3 ESTRUTURA E FUNÇÃO 37
2.4 HIERARQUIA 39
2.5 MODELAGEM DE SISTEMAS 41
2.6 SISTEMA DE SISTEMAS 44
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 46
3 MATRIZES NA MODELAGEM DE SISTEMAS 48
3.1 ORIGENS 49
3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS MATRIZES 50
3.2.1 Matrizes Quanto ao Domínio da Informação 51
3.2.2 Matrizes Quanto a Representação dos Relacionamentos entre Elementos do Sistema 56
3.2.3 Matrizes Quanto ao Tipo da Informação Modelada 58
3.3 OPERAÇÃO E TRANSFORMAÇÕES EM MATRIZES 60
3.4 VISUALIZAÇÃO DE MATRIZES 62
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 66
4 ACOPLAMENTO 68
4.1 O QUE É ACOPLAMENTO 69
4.2 INTERAÇÃO ENTRE ELEMENTOS 70
4.3 ACOPLAMENTO FORTE E FRACO 75
4.4 AVALIAÇÃO DO ACOPLAMENTO 76
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 83
5 COMPLEXIDADE 85
5.1 COMPLEXIDADE – SENSO COMUM 86
5.2 COMPLEXIDADE – ETIMOLOGIA E CONCEITUAÇÃO 87

5.3 O SIMPLES, O COMPLICADO E O COMPLEXO 90
5.4 TÉCNICAS DA COMPLEXIDADE 95
5.5 CARACTERÍSTICAS DA COMPLEXIDADE 97
5.6 SISTEMAS COMPLEXOS DE ENGENHARIA 101
5.7 ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPLEXOS 106
5.8 MÉTRICAS DA COMPLEXIDADE 108
5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS 110
6 SEGURANÇA E RISCO 112
6.1 SEGURANÇA, CONCEITOS E DEFINIÇÕES 113
6.2 SEGURANÇA COMO PARTE DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS 117
6.3 SEGURANÇA E SISTEMAS COMPLEXOS 121
6.3.1 Complexidade Interativa 122
6.3.2 Acoplamento 124
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 124
7 CRITICALIDADE, COMPLEXIDADE E ACOPLAMENTO – C^2A 127
7.1 DEFINIÇÕES E CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESCOPO DA PESQUISA 128
7.1.1 Elementos da Técnica 128
7.1.2 Considerações Sobre Conexões e Sua Representação 131
7.1.3 Representação dos Valores Medidos 132
7.2 REPRESENTAÇÕES DAS CONEXÕES 136
7.2.1 Detalhamento 137
7.2.2 Representação de Diferentes Domínios 141
7.2.3 Conexões e Estados do Sistema 142
7.3 COMPLEXIDADE 143
7.3.1 Complexidade Efetiva 144
7.3.2 Complexidade Máxima 145
7.3.3 Escopo do Sistema 150
7.3.4 Representação da Complexidade 151
7.4 ACOPLAMENTO 154
7.4.1 Características de Acoplamento e Fator de Acoplamento 155
7.4.2 Fator de Acoplamento Máximo 157
7.4.3 Medida do Acoplamento 160
7.4.4 Acoplamento Máximo 163
7.4.5 Representação do Acoplamento 164
7.5 CRITICALIDADE 167

7.5.1 Criticalidade das Conexões de um Sistema 168
7.5.2 Fator de Criticalidade Máxima e Criticalidade Máxima 170
7.5.3 Representação da Criticalidade da Conexão 171
7.6 COMPLEXIDADE, CRITICALIDADE E ACOPLAMENTO – C^2A 173
7.6.1 Índice C^2A 175
7.6.2 C^2A Máximo 177
7.6.3 Representação do Índice C^2A 179
7.7 OPERACIONALIZAÇÃO 182
8 APLICAÇÃO DO ÍNDICE C^2A 186
8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 187
8.1.1 Características da Aeronave 187
8.1.2 Sistema de Controle Ambiental 189
8.1.3 Processo 192
8.2 CONEXÕES ENTRE SISTEMAS 195
8.2.1 Complexidade Efetiva 197
8.2.2 Complexidade Máxima 202
8.2.3 Acoplamento 205
8.2.4 Acoplamento Máximo 213
8.2.5 Criticalidade 217
8.2.6 Índice C^2A 222
8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 226
9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 233
9.1 SUMÁRIO DA TESE 234
9.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA TÉCNICA 238
9.3 CONSIDERAÇÕES DE ORDEM PRÁTICA 239
9.4 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS 239
9.4.1 Suporte de um Ambiente Computacional 240
9.4.2 Tipos de Acoplamento 240
9.4.3 Sistemas de Sistemas 241
9.4.4 Modelagem da Interação com Seres Humanos 241
9.4.5 Modelagem do Ambiente 241
9.4.6 Outros Tipos de Sistemas 242
9.4.7 Complexidade Funcional 242
9.4.8 Medidas de Proximidade como Indicador de Acoplamento 243
9.4.9 Bases de Dados de Problemas/Acidentes 243
10 REFERÊNCIAS 244
APÊNDICE A – Fases de vôo de uma aeronave 264

APÊNDICE B – Teoria da informação 266
APÊNDICE C - Representação em matrizes de estruturas básicas de arquiteturas de sistemas 273

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo define o contexto em que a Tese é desenvolvida bem como o problema abordado e objetivo a ser alcançado. Destaca também as principais contribuições visualizadas para a pesquisa e apresenta a estrutura de capítulos. A Figura 1.1 mostra o relacionamento dos tópicos abordados neste capítulo.

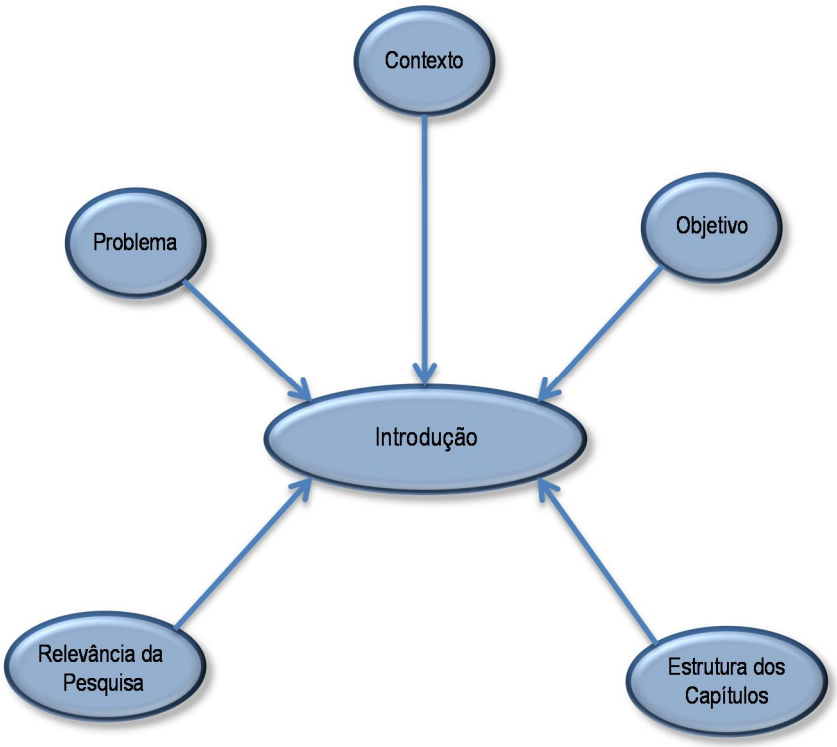


Figura 1.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 1

1.1 CONTEXTO

O setor aeronáutico foi um dos que se beneficiou com o progresso tecnológico do século XX. No início do século passado o ato de voar era atributo exclusivo dos pássaros e restrito à mitologia e literatura de ficção. O máximo que havia sido conseguido até então foram voos em balões. Decorridos pouco mais de 100 anos desde o feito de Santos Dumont em 1906, a evolução observada na área aeronáutica e seus desdobramentos para a área espacial é enorme.

Hoje em dia as viagens aéreas estão ao alcance de grande parte da população. Essa popularização do transporte aéreo pode ser atribuída a diversos fatores, entre eles o barateamento dos bilhetes e também a percepção de que viajar de avião é um meio seguro de transporte. Essa percepção não é infundada. Dados do *Aviation Safety Network* indicam, em números absolutos, uma tendência na redução nos acidentes aéreos/ano no mundo, conforme mostra a Figura 1.2.

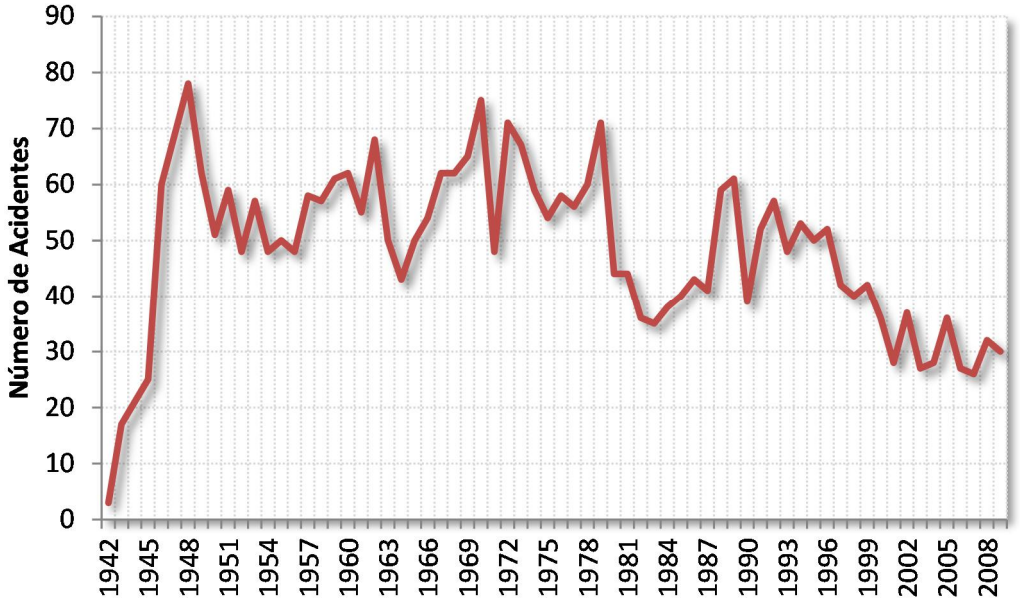


Figura 1.2 – Acidentes aéreos de 1942 a 2009 (AVIATION DATABASE, 2011)

Os níveis de segurança atingidos na atualidade foram conseguidos como um resultado de um esforço conjunto entre fabricantes de aeronaves, empresas operadoras e autoridades aeronáuticas. Os fabricantes são responsáveis por entregar produtos seguros para operação. Por sua vez os operadores precisam manter ao longo da vida da aeronave os mesmos níveis de segurança quando da entrega da mesma. As autoridades aeronáuticas fiscalizam o desenvolvimento e operação das aeronaves definindo regulamentos que têm como foco primário a segurança do produto.

É importante ressaltar que a redução de acidentes não se deve somente à melhoria da qualidade das aeronaves, mas envolve todo um sistema que inclui a operação de aeroportos, os sistemas de controle de tráfego aéreo entre outros aspectos.

As análises de segurança são atividades mandatórias em qualquer fabricante de aeronaves. O emprego de técnicas como *Fault Tree Analysis (FTA)*, *Failure Modes and Effect Analysis (FMEA)*, entre outros, fazem parte do processo de Segurança de Sistemas das empresas do setor. Apoiando esse processo existem normas específicas para a análise de segurança como, por exemplo, a ARP4761 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996) e a IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998).

Ao longo do tempo as análises de segurança têm exigido dos especialistas esforços cada vez maiores para serem realizadas. Um fator que contribui para esse cenário é a constante evolução dos sistemas das aeronaves. É difícil apontar algum tipo de sistema que não tenha sofrido mudanças significativas ao longo dos anos. As áreas de motores, freios, instrumentação de bordo são exemplos onde ocorreram grandes progressos.

Dentre os fatores que contribuíram para a evolução de tais sistemas está a utilização de sistemas computacionais embarcados. Tais sistemas não somente incorporaram muitas funções tradicionalmente executadas por sistemas mecânicos ou eletromecânicos como também viabilizaram uma série de novas funções. Para se ter uma ideia dessa evolução, os caças norte-americanos F-4 projetados na década de

60 possuíam 10% de suas funções realizadas por software. Na atualidade esse número passa dos 80%, como no caso do F-22 (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2007).

Existem várias razões para a adoção de plataformas eletrônicas para a implementação de sistemas embarcados, sendo que algumas delas são:

- A redução de peso da aeronave pela substituição de caixas com componentes mecânicos ou eletromecânicos por placas de componentes eletrônicos;
- Facilidade de reconfiguração e evolução dos sistemas pela atualização do software;
- Possibilidade de disponibilizar maior número de funções a passageiros e tripulação.

O uso de sistemas computacionais embarcados fez com que arquiteturas de sistemas eminentemente federadas dessem lugar para sistemas cada vez mais integrados. Hoje é comum encontrar computadores de bordo realizando múltiplas funções que, em outra época, seriam típicas de sistemas independentes. Se pelo lado do desempenho da aeronave os ganhos são evidentes, tais arquiteturas integradas trazem novas preocupações aos especialistas de segurança. Uma dessas preocupações refere-se à adequação das técnicas utilizadas para a análise de segurança das arquiteturas de sistemas federados. Essas técnicas são, em essência, as mesmas empregadas na análise das atuais arquiteturas integradas. Muitas delas foram criadas visando sua aplicação em sistemas mecânicos ou eletromecânicos (LEVESON, 2004b). Em decorrência disso, especialistas em segurança defendem a necessidade de se fazer algo no sentido de se desenvolver novas técnicas associadas à segurança de sistemas que se adequem à complexidade das atuais sistemas embarcados.

Durante reunião do *International Federation for Information Processing* – IFIP, *Working Group* 10.4 realizada em Cortina d'Ampezzo, Itália em Janeiro de 2009, o prof. John Rushby do *SRI International*, EUA, em conversa com o prof. João Batista Camargo Jr. da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo sugeriu a

necessidade de se aperfeiçoar as técnicas utilizadas na análise de segurança, a fim de adequá-las a realidade atual dos sistemas[1].

A prof[a]. Nancy Leveson do MIT também chama a atenção para a necessidade de um tipo de visão atualizada para a segurança de sistemas. Leveson afirma que a evolução no campo das tecnologias não tem sido refletida nas abordagens adotadas para a segurança de sistemas (LEVESON, 2004b).

O *Federal Aviation Administration* - FAA afirma que as novas tecnologias sendo propostas para uso nos sistemas das aeronaves apresentam grandes desafios e complexidade, podendo introduzir novas fontes de erros no desenvolvimento e, por consequência, efeitos indesejados ou inesperados (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2006).

A complexidade surge neste contexto como um fator agravante quando há questões relativas à segurança de sistemas. Leveson (1995) afirma que a complexidade implica não somente em novos tipos de perigos, mas também torna sua identificação mais difícil. Por sua vez, Charles Perrow (1999) propõe na *Normal Accident Theory* – NAT que acidentes são inevitáveis quando se trata de sistemas complexos e com alto acoplamento.

1.2 PROBLEMA

A NAT estabelece uma importante relação entre complexidade, acoplamento e segurança de sistemas. Contudo, pouco foi feito no sentido de operacionalizar estes conceitos. Durante a pesquisa bibliográfica realizada para esta Tese, foram identificados dois trabalhos onde complexidade e acoplamento são tratados juntos e com foco em segurança. Ambos os trabalhos têm por objetivo a operacionalização da teoria proposta por Perrow.

[1] Informação obtida em comunicação pessoal com o professor João Batista Camargo Jr durante reuniões de acompanhamento da Tese.

Sammarco (2003) apresenta uma proposta de utilização dos conceitos da NAT no escopo de sistemas baseados em computadores. Sammarco identifica a existência de dois tipos de complexidade, a interna e a externa. A complexidade externa está relacionada com as interações do sistema de interesse como outros sistemas. Já complexidade interna refere-se às interações entre elementos do próprio sistema.

A complexidade externa é medida por meio da avaliação de três atributos: previsibilidade, observabilidade e usabilidade. Tais atributos são quantificados por meio de simulações e pela aplicação de questionário. Já a complexidade interna é medida por meio da avaliação do grafo formado pela conexão entre os elementos do sistema. Sammarco adota métricas tipicamente utilizadas na área de Engenharia de Software como é o caso do Índice Ciclomático de McCabe (1976).

Sammarco adota uma abordagem orientada por atributos de sistemas para a complexidade externa, enquanto que a complexidade interna é avaliada com viés com predominância estrutural. A questão do acoplamento é citada, porém tratada de maneira implícita dentro do escopo da análise de complexidade.

Em outro trabalho Wolf (2001) aplica a NAT no contexto de refinarias de petróleo. Wolf realizou a análise de diversos eventos ocorridos na operação de refinarias de petróleo visando identificar se tais eventos poderiam ter sido evitados ou poderiam ser considerados como inevitáveis como a NAT sugere. A conclusão apresentada é que muitos dos eventos, ainda que não tenham se transformado em acidentes, apresentaram características difíceis de serem identificadas a priori. Tais situações foram descritas por Wolf (2001, 2002) como sendo evidências de que a NAT está correta em suas premissas.

O trabalho de Wolf apresenta resultados específicos do contexto que foi aplicado. As métricas desenvolvidas são particulares para o ambiente de refinarias de petróleo. Tal ênfase dada à pesquisa limita o uso da proposta de Wolf.

A NAT fornece um arcabouço conceitual que pode ser utilizado como ponto de partida para o estudo das implicações de complexidade e acoplamento em segurança. Contudo, para operacionalizar seus conceitos transformando-os em ferramentas de engenharia, são necessárias técnicas que viabilizem sua aplicação prática. Sob este aspecto percebe-se uma lacuna em termos das pesquisas relacionadas ao tema. Os poucos trabalhos publicados sobre o assunto são uma evidência desse fato. Além disso, nos estudos realizados não foi considerado um elemento relevante relacionado à criticalidade dos sistemas.

Cada elemento em uma arquitetura de sistema contribui em graus diferentes para a segurança. Existem sistemas cuja falha ou mau funcionamento podem ter efeitos catastróficos enquanto outros podem ser desconsiderados no que tange à segurança. Da mesma maneira, podem existir sistemas complexos e com alto acoplamento que não impactam a segurança, enquanto que a criticalidade de alguns sistemas pode ser agravada em decorrência da complexidade e acoplamento.

1.3 OBJETIVO

Em geral o esforço necessário para o desenvolvimento de sistemas críticos quanto à segurança é determinado pela classificação dos efeitos provocados pela ocorrência de falhas, ou seja, sua criticalidade. Dessa maneira, quanto maiores forem as consequências das falhas identificadas para um sistema, tanto maior é o rigor requerido para o seu desenvolvimento. Este conceito é utilizado, por exemplo, pelas normas IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998) e SAE ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011), as quais são referências para o desenvolvimento de sistemas.

As normas IEC 61.508 e ARP4754A têm na criticalidade o fator determinante para a determinação dos riscos relacionados a um sistema no que se refere à segurança. Complexidade e acoplamento não são considerados. Por outro lado a NAT afirma que sistemas que apresentam interações complexas entre seus elementos e

possuem alto acoplamento estão mais propensos à ocorrência de falhas. A NAT não aborda o conceito de criticalidade.

Dessa maneira tem-se por hipótese que os atributos complexidade e acoplamento, caso sejam avaliados juntos com a criticalidade, permitem a identificação de elementos de risco quanto a segurança que não são evidentes quando tais atributos são considerados em separado.

Para tanto esta Tese tem por objetivo o desenvolvimento de um indicador de riscos relativo à segurança de sistemas tendo como elementos básicos a complexidade, acoplamento e criticalidade. Tal indicador é denominado C^2A.

Considera-se que para alcançar tal objetivo é necessário:

a) Definir uma base para a representação das conexões existentes entre elementos de um sistema e entre sistemas. A complexidade, acoplamento e criticalidade são tratados com foco nas conexões.
b) Estabelecer a maneira com que a complexidade será medida.
c) Estabelecer a maneira com que o acoplamento será medido.
d) Estabelecer a maneira com que a criticalidade será medida.
e) Definir como tais medidas podem ser utilizadas em conjunto para se obter um indicador de risco.
f) Criar maneiras de visualizar os dados obtidos nas diversas medições, de modo que possam ser comparados.
g) O indicador deve ser colocado no contexto de um processo de desenvolvimento de sistemas.

1.4 ABORDAGEM

A abordagem adotada baseia-se inicialmente na modelagem das conexões entre elementos de um sistema por meio de matrizes. A escolha por essa forma de representação das conexões recai em dois aspectos principais. O primeiro diz

respeito à facilidade de uso e possibilidade de manipulação matemática. O segundo por servir de base para outros tipos de representação, como no caso de grafos.

A Teoria da Informação foi utilizada como referência para a medida de complexidade e acoplamento. A quantidade de informação existente na conexão entre elementos de um sistema ou entre sistemas é utilizada como medida de complexidade. No caso do acoplamento é aplicado o conceito de fator de acoplamento, no sentido de ponderar a força da conexão.

A criticalidade por sua vez é quantificada em função dos efeitos das falhas dos elementos do sistema. Por essa abordagem quanto maior a consequência de uma falha maior é a criticalidade do elemento.

O índice C^2A é obtido pela composição da complexidade, acoplamento e criticalidade. Os valores obtidos para complexidade e acoplamento de uma determinada conexão do sistema são ponderados pela criticalidade correspondente.

A técnica desenvolvida é exercitada em um estudo de caso que utiliza um sistema de controle ambiental de uma aeronave de transporte regional. São realizadas também considerações sobre como utilizar do índice C^2A no processo de desenvolvimento de sistemas proposto pela norma ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011).

1.5 RELEVÂNCIA DA TESE

O desenvolvimento do índice C^2A segue uma abordagem interdisciplinar. As disciplinas envolvidas não somente foram combinadas de maneira original, como em algumas situações empregadas fora de seu domínio normal de utilização, como é o caso da Teoria da Informação. O uso da Teoria da Informação para a medida de complexidade não é algo novo no contexto de sistemas (BERLINGER, 1980; MOHANTY, 1981; PIQUEIRA, 1994; LLOYD, 2001), bem como na área de software

(CARDOSO et al., 2004; SANTOS JUNIOR, 2008). Contudo, a maneira com que foi utilizada nesta Tese difere das encontradas na literatura.

No que se refere ao acoplamento foi criado o conceito de fator de acoplamento. Tal conceito permite que diferentes tipos de acoplamento identificados como relevantes para um sistema possam ser comparados entre si.

A criticalidade é um atributo de sistema já abordado em normas como a IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998) e ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011). A criticalidade de um sistema é tanto maior quanto maior forem as consequências de suas falhas. A abordagem adotada nesta Tese difere do uso dado pelas normas citadas, por dar ênfase às conexões entre sistemas e não aos sistemas propriamente ditos.

Complexidade, acoplamento e criticalidade são considerados em conjunto para a composição do índice C^2A. Considera-se que o C^2A, dentro de sua proposta, contribui para o aumento do nível de informação sobre complexidade, acoplamento e criticalidade em termos de seus possíveis impactos em segurança.

A Figura 1.3 apresenta um diagrama de relacionamento entre as principais disciplinas consideradas na Tese. As disciplinas de suporte para a Tese estão representadas na cor preta. Em azul estão as disciplinas de referência para o cálculo do índice C^2A. Em verde encontram-se destacados os tópicos onde se encontra a contribuição da Tese.

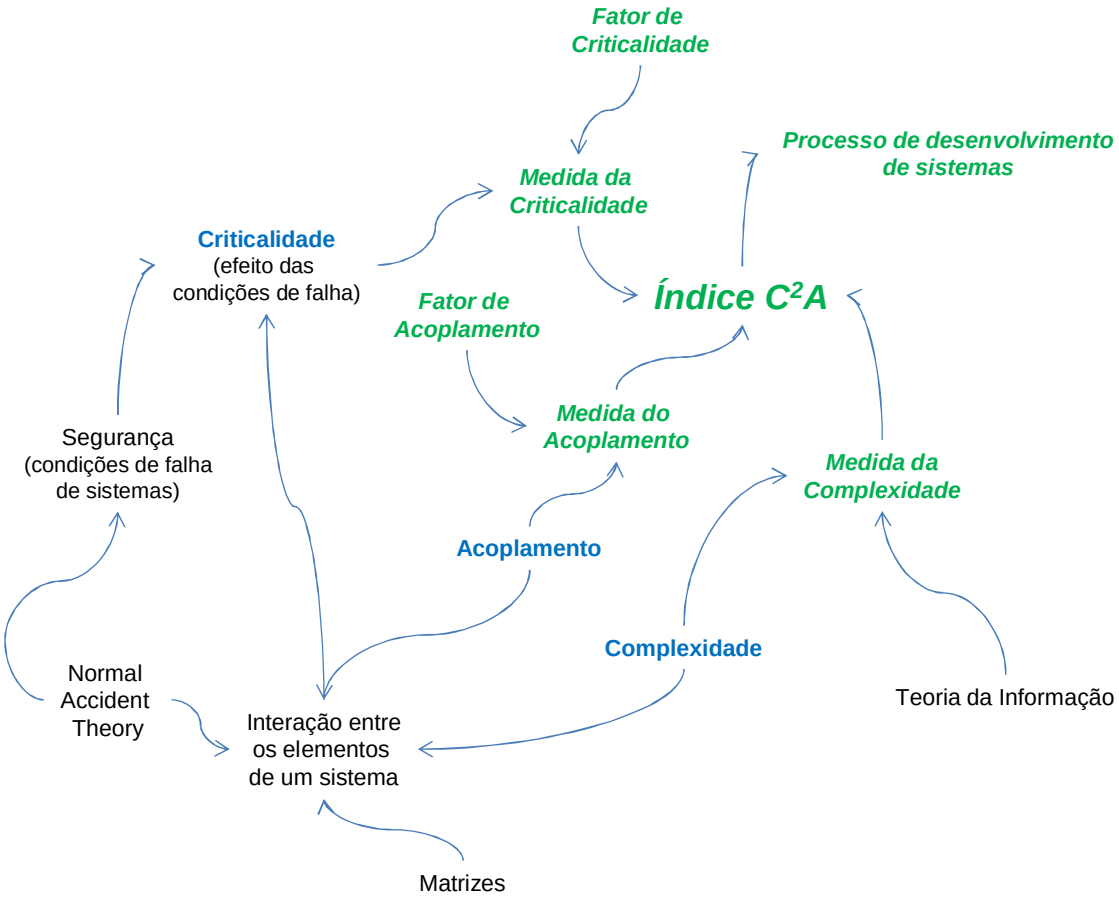


Figura 1.3 – Disciplinas e contribuição da Tese

1.6 ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS

Os capítulos da Tese estão organizados em dois grupos. O primeiro grupo é formado pelos Capítulos de 1 a 6 que apresenta uma revisão bibliográfica de assuntos de relevância para a pesquisa. O segundo grupo, formado pelos Capítulos 7 e 8, apresenta a técnica para o cálculo do índice C^2A e desenvolve um estudo de caso no sentido de verificar a proposta. É nesse grupo de capítulos que se concentra a contribuição do trabalho. Ao final são apresentadas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Os capítulos do primeiro grupo possuem uma seção de abertura onde são apresentados os tópicos abordados. Esta seção é seguida por um conjunto de

seções que desenvolvem os tópicos. Por fim existe uma seção denominada “Considerações finais” destinada às conclusões do capítulo.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos relativos a sistemas. Algumas questões importantes para a Tese são discutidas, como, hierarquia e escopo. O Capítulo 3 apresenta abordagens para a o uso de matrizes na modelagem de sistemas. A representação das interações entre elementos de um sistema por meio de matrizes é utilizada como base para a medida da complexidade, acoplamento e criticalidade. A complexidade é discutida no Capítulo 4, enquanto que acoplamento e aspectos de segurança de sistemas são apresentados nos Capítulos 5 e 6.

O Capítulo 7 descreve a técnica para o cálculo do índice C^2A, enquanto que o Capítulo 8 desenvolve um estudo de caso no sentido de verificar a implementação do índice C^2A em um caso real.

O Capítulo 9 apresenta as conclusões da Tese, bem como propõe temas para trabalhos futuros. Foram incluídos três apêndices que apoiam o entendimento de alguns aspectos abordados no texto. O primeiro sumariza as fases de voo de uma aeronave. O Apêndice B resume a Teoria da Informação. Já o Apêndice C apresenta um conjunto de estruturas que ocorrem no projeto de sistemas e suas correspondentes representações em matrizes.

2 SISTEMAS

O conceito de Sistema é algo que permeia o cotidiano das pessoas. É comum encontrar na mídia, seja falada ou escrita, a ocorrência de termos como sistema de saúde, sistema viário, sistema imunológico, ecossistema, entre outros. Mesmo aplicado em diferentes contextos, sob a ótica do senso comum, as pessoas parecem não ter dificuldade para entender o conceito ou necessitar de maiores esclarecimentos sobre seu significado. Este capítulo apresenta o conceito de sistemas com ênfase em aspectos relacionados à engenharia. Inicialmente o termo sistema é analisado sob o ponto de vista da sua etimologia. Em seguida são discutidas algumas propriedades de interesse da Tese, tais como emergência, estrutura, função e hierarquia. É abordada também a questão da modelagem de sistema e apresentados alguns conceitos referentes a sistemas de sistemas. A Figura 2.1 apresenta a estrutura de tópicos deste capítulo.

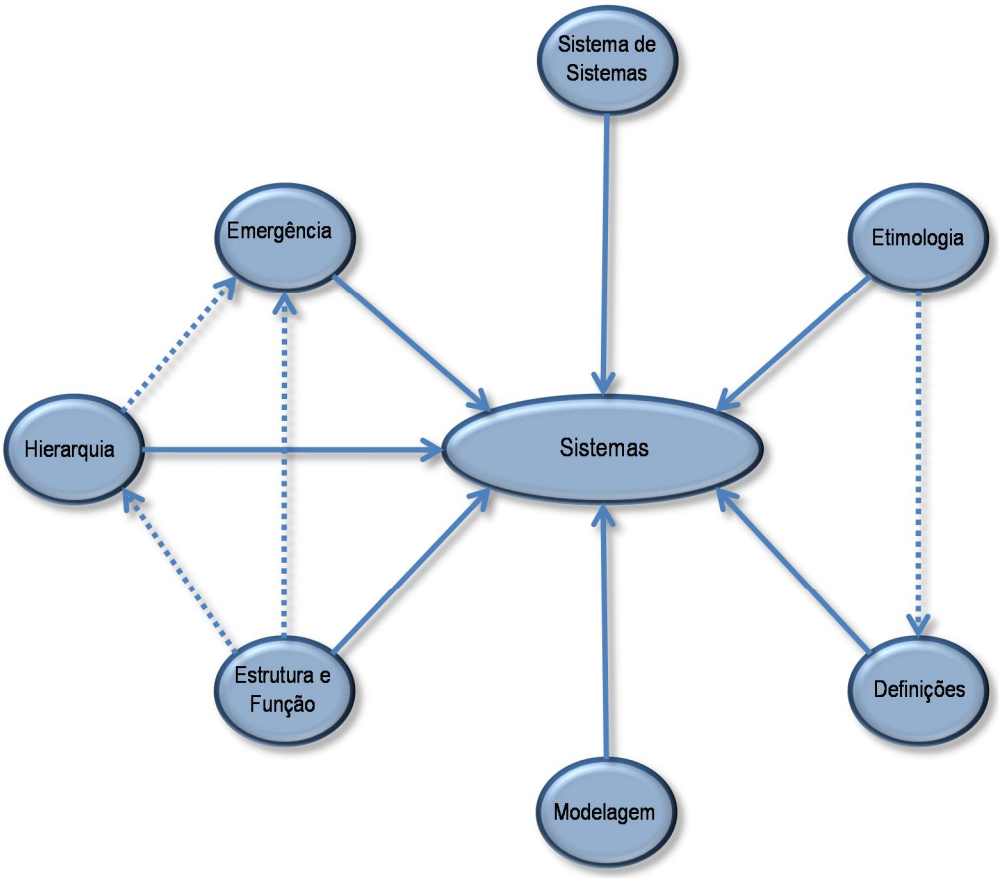


Figura 2.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 2

2.1 ETIMOLOGIA E DEFINIÇÃO

A palavra sistema é oriunda do Grego *synístanai* que é a composição de *syn* que significa “junto” e *hístanai* que significa “colocar”, “lugar” (ORIGEM DAS PALAVRAS, 2010; ONLINE ETYMOLOGY DICTIONARY, 2010). Dessa maneira, de acordo com sua etimologia, Sistema pode ser entendido como o ato de “colocar junto” ou ainda como o “lugar onde determinados elementos[2] estão juntos”.

O ato de colocar algo junto implica na existência de mais de um elemento. Apesar desta ser uma condição necessária ela não é suficiente para a caracterização de um sistema. É preciso também que haja algum tipo de interação entre eles. Bertalanffy (1969, p.33), por exemplo, refere-se a sistemas como sendo elementos em interação. As interações entre elementos conferem ao sistema um determinado comportamento. Tal comportamento determina os resultados produzidos pelo sistema.

Elementos, interações e comportamento constituem-se na base das definições utilizadas para sistemas. Para Churchman (1972) sistema é um conjunto de partes coordenadas para realizar um conjunto de finalidades. Para Maier e Rechtin (2000) um sistema é uma coleção de coisas ou elementos que, trabalhando juntos, produzem um resultado impossível de ser obtido pelos elementos individualmente. Dessa maneira, o comportamento do sistema pode ser visto como uma propriedade emergente[3] que advém da interação de seus elementos. Aslaksen (2008), por sua vez, sumariza o que vem a ser um sistema por meio de três conjuntos:

a) Conjunto de elementos;
b) Conjunto de interações internas entre os elementos do sistema; e
c) Conjunto de interações externas entre os elementos do sistema e elementos de outros sistemas.

---

[2] No escopo desta Tese adotou-se o termo elemento de sistema ou simplesmente elemento para designar genericamente os entes que compõem um sistema.

[3] As questões relacionadas ao tópico Emergência são tratadas na seção 2.2

Uma questão que surge a partir desta forma de ver um sistema é definir que elementos e interações devem ser considerados internos, ou seja, dentro do escopo do sistema e quais devem ser tratados como externos.

Gerald Weinberg (1975, p.52) afirma que um sistema é uma forma de ver o mundo. Sendo assim, diferentes visões sobre um mesmo conjunto de elementos podem definir diferentes sistemas. Corroborando com este pensamento, James Martin (2007) afirma que os sistemas são entidades virtuais. Trata-se de uma camada conceitual colocada sobre um conjunto de elementos escolhidos de acordo com algum critério. A mudança desse critério pode implicar em um novo conjunto de elementos caracterizando outro sistema.

O critério de escolha dos elementos define o que é chamado sistema de interesse (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2007). O sistema de interesse estabelece os elementos constituintes, as relações entre os elementos e o nível de detalhamento em termos de composições e decomposições. No exemplo apresentado na Figura 2.2, uma vez aplicados diferentes critérios de agrupamento para um mesmo conjunto de elementos, são identificados três sistemas distintos.

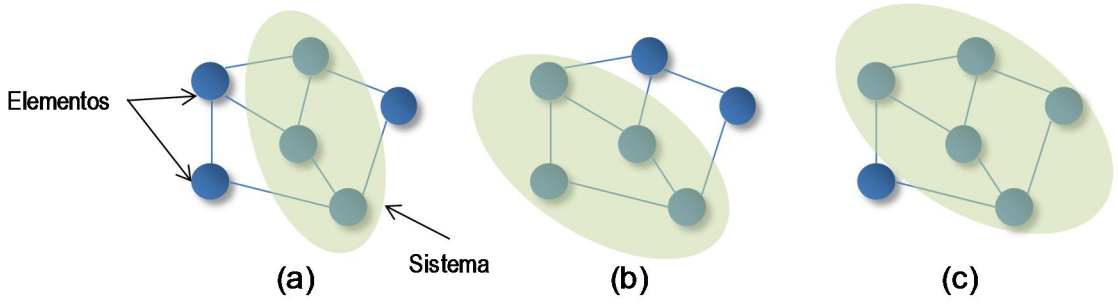


Figura 2.2 – Definição do escopo de um sistema

No projeto de uma aeronave, por exemplo, o motor é usualmente considerado como um sistema, ou ainda, como um subsistema da aeronave. Em geral, os fabricantes de aeronave costumam considerá-lo como um todo, não sendo necessária a decomposição deste em subsistemas. Por outro lado, para o fabricante do motor o que é o nível mais baixo de decomposição do sistema aeronave é o ponto inicial para a decomposição do sistema motor.

Sob outro ponto de vista, os sistemas de uma aeronave podem interagir por meio de conexões hidráulicas, elétricas, pneumáticas e mecânicas. Neste contexto o sistema de interesse pode ser definido como o conjunto de elementos que possuem algum tipo de interação por meio de conexões hidráulicas. Os demais sistemas constituirão o conjunto dos elementos externos.

2.2 EMERGÊNCIA

O comportamento do sistema é uma propriedade do todo. A relação entre o todo e elementos implica que as interações entre elementos geram comportamentos que muitas vezes não são de explicação fácil, ou mesmo impossíveis de serem compreendidos a partir da análise desses elementos separadamente. Este fato traz implícito o conceito de Emergência (WALDROP, 1992; JOHNSON, 2003).

Chalmers (2007) sugere a existência de 2 tipos de emergência. O primeiro tipo denominado emergência forte está relacionada a comportamentos que não podem ser deduzidos a partir de fatos obtidos de seus elementos sob nenhuma circunstância. A emergência forte está ligada a questões filosóficas como a existência da alma e a relação cérebro-mente. Do ponto de vista da sua aplicação empírica, a relevância científica do conceito de emergência forte tem sido questionada. Chalmers, por exemplo, sugere que o conhecimento científico atual é insuficiente para compreender, em toda a sua extensão, fenômenos dessa natureza. Bedau (2002) argumenta que apesar de ser possível do ponto de vista da lógica, a emergência forte é, desconfortavelmente, parecida com mágica. Essa mesma visão é compartilhada pelo físico Doyne Farmer (apud WALDROP, 1992, pag. 288) quando afirma que o conceito de emergência *"[…] it´s not magic ... but it feels like magic.".*

Outro tipo de emergência é a fraca. Esta refere-se a comportamentos que não são esperados em função das características individuais de seus elementos, mas que podem ser inferidos ou simulados.

Bedau (2002) propôs a existência de um terceiro tipo de emergência a qual foi chamada nominal. Enquanto que as emergências forte e fraca apresentam propriedades consideradas por Bedau como genuínas, a emergência nominal apresenta propriedades que são denominadas resultantes. O conceito que subjaz às emergências forte e fraca é que o todo é diferente da soma das partes constituintes do sistema. No caso da emergência nominal o todo é igual a soma das partes.

A maneira com que comportamento de um sistema se manifesta, ou seja, emerge de seus elementos, é consequência da interação de tais elementos que se dá por meio de sua estrutura.

2.3 ESTRUTURA E FUNÇÃO

A estrutura de um sistema é definida pelo conjunto de relações que existe entre seus elementos (DICKERSON; MAVRIS, 2009). Trata-se da rede formada pelas dependências entre os elementos do sistema. A existência de elementos e interações entre eles resulta em uma estrutura.

A estrutura é um atributo básico de um sistema (LINDEMANN; MAURER; BRAUN, 2009). Um mesmo conjunto de elementos pode ser organizado de diversas maneiras em termos de seus relacionamentos dando origem a diferentes estruturas. Tal conceito é ilustrado na Figura 2.3 que apresenta 4 elementos organizados em 3 estruturas.

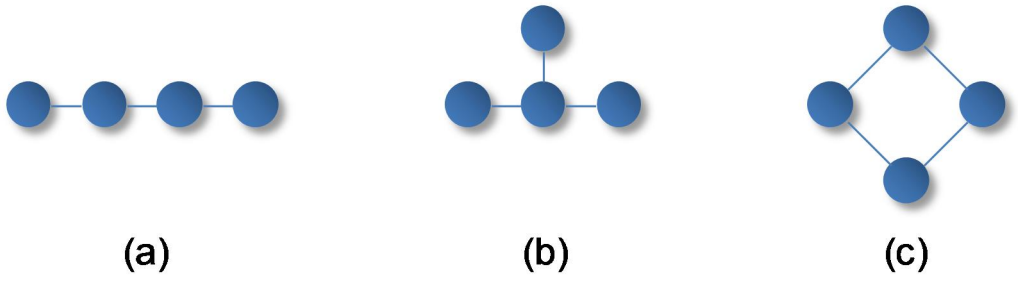


Figura 2.3 – Estruturas de sistemas

A estrutura de um sistema também está relacionada ao conceito de emergência (seção 2.2). A maneira com que os elementos estão organizados e como interagem determina o comportamento do sistema. Dessa maneira, diferentes estruturas apresentam comportamentos emergentes também diferentes.

No campo teórico o problema de se determinar todos os possíveis comportamentos de um sistema recai em obter suas estruturas por meio da combinação de seus elementos. Contudo, em termos práticos não é possível combinar todos os elementos entre si. Somente algumas das combinações de elementos obtidas vão produzir resultados coerentes. Segundo Dickerson e Mavris (2009) isso ocorre por causa das propriedades individuais dos elementos. Cada elemento produz resultados específicos frente a um determinado conjunto de estímulos. Em muitos casos os resultados produzidos por um elemento não são compatíveis com o estímulo esperado por outro.

Considerando-se o contexto dos sistemas de engenharia, a decisão por se adotar uma ou outra estrutura é tomada durante o projeto do sistema. A forma com que os elementos do sistema são organizados pode variar dependendo dos objetivos do projeto. Em geral, nos níveis mais altos das definições de sistema os elementos são organizados segundo um critério funcional. Tais funções precisam ser detalhadas para que contenham informações suficientes que permitam sua implementação em termos físicos. O detalhamento das funções leva ao surgimento de uma estrutura hierárquica dos elementos do sistema.

2.4 HIERARQUIA

Usualmente o termo “hierarquia” remete à noção de uma relação de dependência, onde determinados elementos possuem ascendência sobre outros. Herbert Simon (1973) ilustrou o conceito de hierarquia comparando-o a um conjunto de caixas chinesas. Tais caixas consistem de uma caixa englobando uma segunda, que por sua vez engloba uma terceira e assim por diante. Entretanto, o processo de abertura das caixas chinesas é sequencial em que uma caixa leva somente à outra caixa. Em uma hierarquia a decomposição de um determinado elemento pode levar a um ou mais elementos. Para Hitchins (2007) quando os elementos de um sistema interagem de maneira a apresentar um comportamento coerente por meio de propriedades emergentes, então é possível observar a existência de uma hierarquia.

A decomposição hierárquica de um sistema pode ser realizada de diferentes maneiras. A norma DOD-STD-2167A[4] (1988), por exemplo, propõe uma hierarquia formada por sistema, segmento, subsistema (item de configuração), componentes e unidades. Em outra abordagem, Charles Perrow (1999, p.70) sugere a decomposição de um sistema em sistemas, subsistemas, partes e unidades. No contexto aeronáutico a *Air Transport Association* – ATA agrupa de maneira hierárquica os sistemas de aeronaves de acordo com similaridades físicas e funcionais[5] (AIR TRANSPORT ASSOCIATION, 1999).

A Figura 2.4 ilustra o conceito de hierarquia. No caso, foi considerado um sistema qualquer, denominado S_1, composto por 3 subsistemas, S_{11}, S_{12} e S_{13}. O sistema S_1 interage externamente com outros três sistemas (S_2, S_3 e S_4).

---

[4] A norma DOD-STD-2167A foi publicada em 1988 e utilizada como referência para o desenvolvimento de sistemas de software para projetos militares. Em Novembro de 1994 foi substituída pela norma MIL-STD-498 que, por sua vez, foi substituída pela norma IEEE 12.207 partes 0, 1 e 2 em Maio de 1998.

[5] A última revisão da ATA 100 ocorreu em 1999. Conforme informação obtida no site da ATA (https://publications.airlines.org/CommerceProductDetail.aspx?Product=33), acesso em 10 dez. 2010, as especificações ATA 100 e ATA 2100 foram incorporadas à ATA 2200 a partir do ano 2000.

O primeiro nível da hierarquia apresenta a visão de cada um dos três subsistemas considerados como um todo, ou seja, sem decomposição em componentes ou outros subsistemas[6]. No segundo nível é onde aparece a decomposição dos subsistemas S_{11}, S_{12} e S_{13} em termos de outros subsistemas e componentes. Já no terceiro nível a decomposição é feita em componentes.

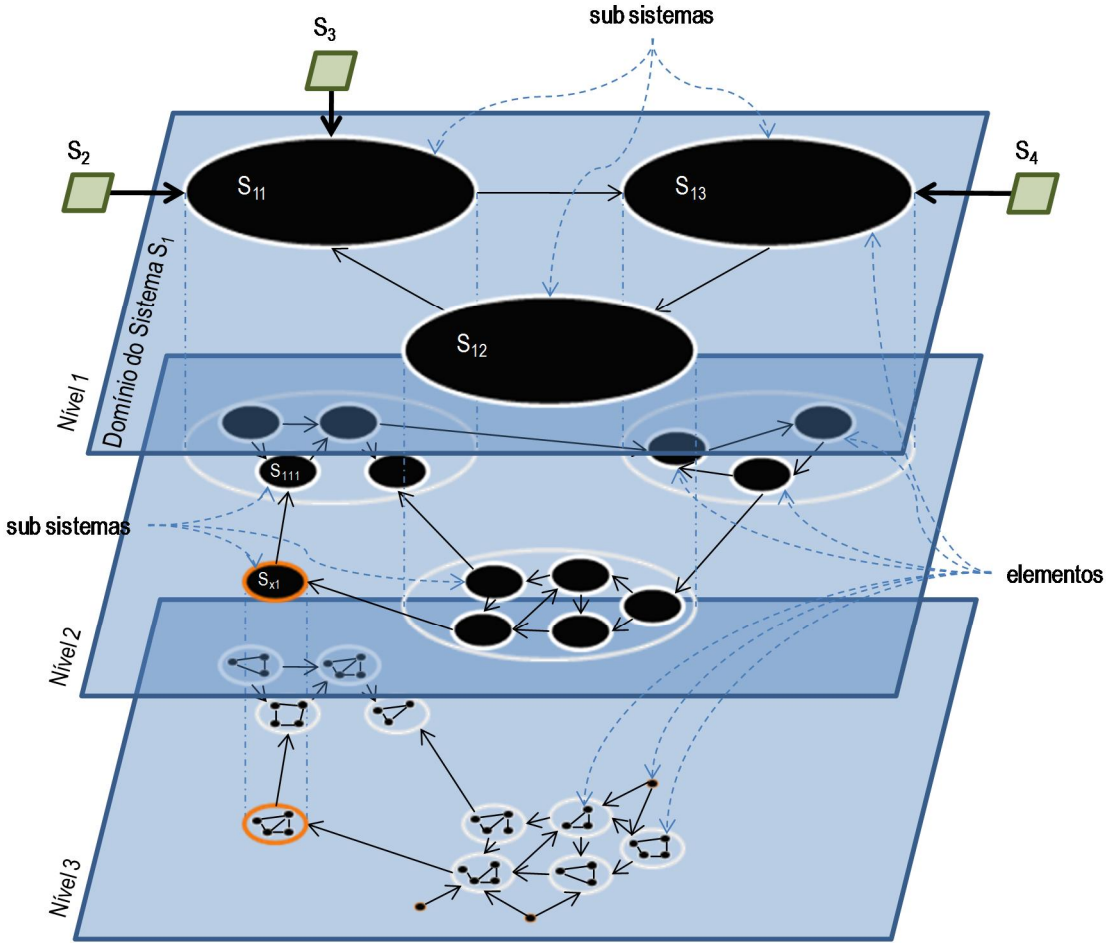


Figura 2.4 – Hierarquia de um sistema

O subsistema Sx1 que aparece no segundo nível da hierarquia não vem da decomposição de nenhum dos subsistemas S_{11}, S_{12} e S_{13}. Este subsistema surge de uma necessidade de detalhamento daquele nível em particular. Em geral as especificações de alto nível não contêm, e não é esperado que contenham, todos os

[6] O termo elemento é utilizado para designar, de maneira genérica, os entes do sistema independentemente da sua posição na hierarquia. Um elemento pode ser um sistema, subsistema ou componente. Componentes são elementos de sistema que não possuem decomposição. Em geral, os componentes ocorrem no nível mais baixo da hierarquia.

detalhes necessários para a implementação do sistema. Isso fica a cargo das especificações de baixo nível.

A posição que um determinado elemento ocupa dentro da hierarquia de um sistema lhe confere uma característica dual no sentido que é ao mesmo tempo todo e parte, sistema e subsistema. Cada elemento pode ser considerado como um todo com relação aos seus elementos constituintes e sendo assim fica caracterizado como sistema. Cada sistema é também elemento constituinte com relação ao elemento imediatamente superior na estrutura hierárquica e dessa maneira fica caracterizado como subsistema.

Em teoria, os elementos de um sistema podem ser decompostos até níveis atômicos. No sentido oposto é possível a composição de sistemas para se formar novos sistemas. Estas possibilidades levam ao problema da definição do escopo do sistema (seção 2.1).

2.5 MODELAGEM DE SISTEMAS

A construção de modelos é uma técnica comum no processo de desenvolvimento de sistemas. O uso de modelos permite a visualização antecipada de determinadas características do sistema que, de maneira geral, somente poderiam ser observadas no produto final. O conhecimento precoce de características do sistema proporciona ganhos financeiros e de tempo de projeto na medida em que minimiza a necessidade de retrabalhos sobre o produto final. Do ponto de vista de segurança[7] os modelos permitem a realização de experimentos que não seriam viáveis de se realizar com o sistema real. Além disso, permite elevar o nível de confiança de que o sistema vai atender aos seus requisitos.

De maneira geral, um modelo pode ser definido como sendo uma aproximação, representação ou idealização de aspectos relacionados a estrutura, comportamento

[7] O tópico “segurança” é discutido no Capítulo 6.

ou outra característica de um processo, conceito ou sistema (RECHTIN; MAIER, 1997). Para Marvin Minsky, ***M*** é um modelo do sistema ***S*** se ***M*** permite obter repostas sobre ***S***. Não se busca todas as respostas sobre ***S***, mas somente aquelas dentro de um escopo de interesse (MINSKY, 1988). Um motor de aeronave pode ser analisado sob diferentes pontos de vista, tais como, dissipação de calor, consumo de combustível, desgaste de peças, etc. Se o escopo de interesse for o consumo de combustível, então o modelo correspondente deve ser capaz de responder questões sobre este tópico, desprezando outras características.

Modelos são, em essência, simplificações. Não é possível representar todas as características de um sistema por meio de um único modelo. Por outro lado, é inviável a criação de modelos para cada uma das características do sistema. Sendo assim, é necessário determinar quais são as características do sistema que se pretende analisar e então proceder à seleção dos elementos que vão compor o modelo, ou se for o caso, dos modelos (Figura 2.5). Contudo, caso elementos relevantes para o modelo não sejam considerados corre-se o risco de que modelo se torne muito simples, comprometendo os resultados.

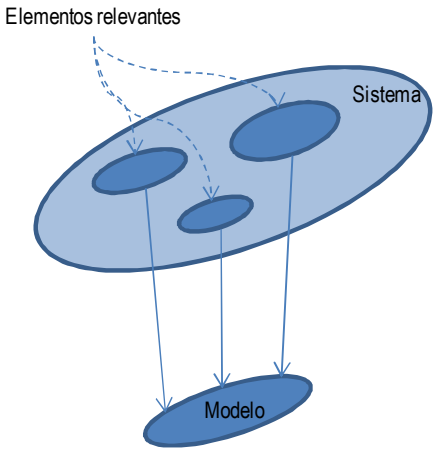


Figura 2.5 – Seleção de elementos relevantes do sistema para a construção de um modelo

Um modelo visa ser exato considerando as características do sistema que pretende representar. Da mesma forma um modelo não tem o objetivo de ser completo no sentido de incluir todas as características do sistema, ou seja, ser uma cópia.

Cópias, ainda que necessárias em processos de engenharia, não apresentam a flexibilidade dos modelos (KUHNE, 2005).

Os modelos podem ser classificados de diversas maneiras. Estes podem ser discretos ou contínuos, lineares ou não-lineares, estáticos ou dinâmicos, etc. Existem diferentes taxonomias de modelos (HYBERTSON, 2009; HANGOS; CAMERON, 2001; KULAKOWSKI; GARDNER; SHEARER, 2007), contudo, sob uma perspectiva abrangente, os modelos podem ser classificados como concretos ou abstratos. Maquetes de prédios, casas e aeronaves são típicos exemplos de modelos concretos. Em geral, os modelos concretos privilegiam a forma em detrimento de outras características como peso e tamanho.

Modelos abstratos[8] são construídos utilizando-se matemática, gráficos ou linguagens simbólicas ou combinações destas técnicas. As linguagens naturais como o Português e o Inglês não são consideradas adequadas para a criação de modelos, pois podem levar a ambiguidades. Contudo, são essenciais para explanações sobre os modelos (OLIVER; KELLIHER; KEEGAN, 1997).

Nos projetos de engenharia, os modelos têm sido cada vez mais utilizados para a representação de sistemas. Em particular na área aeronáutica, os *mockups* físicos têm dado espaço de maneira paulatina para os equivalentes digitais. Exemplo disso é a Boeing que fez uso intensivo de modelos digitais no projeto da aeronave 777 (NORRIS, 1995).

Os engenheiros de sistemas têm a sua disposição um leque bastante variado de técnicas de modelagem que suportam os diferentes tipos de modelos (WARFIELD, 1973A; CARLONI et al., 2004; GIESE; HENKLER, 2006) e ferramentas (STRUNK; AIELLO; KNIGHT, 2006) que podem ser escolhidas de acordo com as características do sistema. Linguagens como UML, *Sys*ML, e ambientes de desenvolvimento como MatLab e SCADE, os quais possuem linguagens próprias, têm sido utilizadas para a modelagem de sistemas em projetos do setor aeronáutico e espacial.

---

[8] O interesse desta Tese concentra-se nos modelos abstratos. Daqui em diante toda referência a “modelo” é feita no sentido de “modelo abstrato”.

Cada linguagem apresenta notação específica que é utilizada para a modelagem de determinadas características do sistema. A versão 1.2 do *Sys*ML, por exemplo, possui 10 diferentes diagramas com a finalidade de cobrir, entre outros aspectos, o sequenciamento de atividades e estados e modos do sistema (OBJECT MANAGEMENT GROUP, 2010). Contudo, quando se trata da modelagem da estrutura de um sistema, o uso de matrizes tem se mostrado de grande utilidade (WARFIELD, 1973b).

2.6 SISTEMA DE SISTEMAS

O conceito de Sistema de Sistemas (*System of Systems* – SoS) surge da possibilidade de integração entre sistemas. O propósito dessa integração é, em última análise, a redução de custos, melhoria de desempenho, aumento de robustez ou níveis de segurança, entre outros. Um SoS é, em geral, formado por grandes sistemas de natureza heterogênea que são construídos e evoluídos de maneira independente, possuindo contudo uma operação cooperativa, integrada. De acordo com Jamshidi (2009) o conceito de SoS apresenta uma visão de alto nível e explica as interações entre cada um dos seus sistemas.

A *International Civil Aviation Organization* (ICAO) fornece um exemplo típico de SoS. O espaço aéreo controlado pela ICAO é composto por diversos *National Airspace Systems* (NAS). O NAS, por sua vez, é uma rede de sistemas que envolve aeroportos, rotas aéreas, controle meteorológico, regulamentos, pessoal operacional (INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2010).

A aplicação do conceito de SoS não é algo trivial. Trabalhar com SoS significa ir um passo além do que é usualmente realizado em um sistema no sentido clássico do termo. Entretanto, os fundamentos de um se aplicam ao outro, contudo alguns aspectos tornam o desenvolvimento de um SoS uma tarefa bastante particular.

Em um SoS cada um de seus sistemas componentes é desenvolvido de forma separada uns dos outros com pouca ou mesmo nenhuma coordenação entre os fabricantes. Ainda que removido do escopo do SoS, o sistema componente ainda mantém seu propósito, caracterizando assim sua independência operacional (MAIER, 1999). Uma aeronave não é desenvolvida de maneira coordenada com a construção de um novo aeroporto. Os aeroportos são construídos de maneira independente das evoluções nos sistemas de controle de tráfego aéreo, ainda que no seu projeto faça provisões para instalação dos sistemas de *Air Trafic Management* (ATM). Cada um dos sistemas componentes é desenvolvido e gerido de acordo com objetivos próprios.

Além disso, cada um dos sistemas componentes pode ter sido desenvolvido com tecnologias heterogêneas, originalmente incompatíveis entre si. Esse cenário é bastante típico quando se está integrando sistemas legados. Por exemplo, um sistema de ATM precisa interagir com aeronaves construídas com diferentes tecnologias. No sentido inverso, uma aeronave precisa interagir com sistemas de ATM de diversos países e que podem utilizar diferentes tipos de equipamentos e tecnologias.

Cada um dos sistemas componentes constitui-se em uma área de negócios particular que são regidas por regras próprias, e por ser assim possuem evolução independente. Funções são adicionadas, removidas e/ou modificadas de maneira independente dos demais sistemas componentes (CHEN; CLOTHIER, 2003). Apesar dessa independência entre os sistemas componentes de um SoS, eles precisam apresentar a característica de interoperabilidade, ou seja, a capacidade de se comunicar. De outra maneira não poderiam ser considerados como um SoS.

Outra característica de um SoS é o surgimento de comportamentos emergentes oriundos da interação de seus sistemas componentes. Da mesma maneira que ocorre com os sistemas e a interação entre seus subsistemas e componentes, a interação entre os sistemas componentes faz surgir comportamentos que não são encontrados quando tomado como referência o comportamento de cada um seus sistemas componentes em separado (MAIER, 1999; BOARDMAN; SAUSER, 2006).

A troca de dados de maneira remota é também uma característica comum de se encontrar nos SoS. Sistemas instalados em locais geograficamente distantes uns dos outros forçam que dados sejam trocados de maneira remota. A própria interação entre aeronave e sistema de ATM é um exemplo disso.

Um SoS pode trazer no seu bojo funções que têm impacto em segurança (*safety*). O desenvolvimento de cada sistema componente, dentro de um conjunto de práticas de engenharia, já inclui um conjunto de atividades voltadas para aspectos relacionados à segurança, nas quais são identificadas as suas condições de falha e projetados os mecanismos para eliminá-las ou mitigá-las. Contudo, é incorreto supor que a realização de atividades relacionadas à segurança de segurança de cada um dos sistemas componentes seja suficiente quando considerado o SoS como um todo. No desenvolvimento de um SoS, a integração dos sistemas componentes pode dar origem a novas condições de falha. Uma vez identificadas essas condições de falha pode ocorrer a necessidade de reprojeto dos sistemas componentes.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ideia de sistema é intrínseca à engenharia. Os projetos de engenharia constituem-se, em essência, na concepção e realização de sistemas. Nesse contexto a compreensão de questões relacionadas a definição de escopo do sistema, suas propriedades e modelagem tornam-se de grande relevância.

A crescente complexidade dos sistemas impõe a necessidade de novos métodos e técnicas. Segundo Nancy Leveson em palestra proferida durante conferência coordenada pelo FAA, os novos sistemas de engenharia têm imposto a necessidade de uma revisão das atuais abordagens de desenvolvimento. Para Leveson as ferramentas de engenharia disponíveis na atualidade não são suficientes para suportar o desenvolvimento de sistemas complexos como é caso do projeto NextGen (LEVESON, 2011).

A complexidade de sistemas aliada ao grau de acoplamento entre seus elementos e a criticalidade de suas conexões (no sentido da segurança) são objetos de interesse desta Tese. Tais aspectos são abordados nos próximos capítulos.

3 MATRIZES NA MODELAGEM DE SISTEMAS

O objetivo deste capítulo é apresentar o uso de matrizes como ferramenta de modelagem de sistemas. Para tanto é realizado inicialmente um levantamento histórico que busca identificar as primeiras aplicações a utilizar matrizes para a modelagem de sistemas. As aplicações identificadas envolvem diferentes tipos de matrizes as quais são organizadas segundo um esquema de classificação. Em seguida são discutidas operações e transformações que tais matrizes podem ser submetidas. Aliado às operações e transformações, é importante também determinar a forma com que os dados serão visualizados. Nesse sentido, um sumário de possíveis maneiras para a visualização de matrizes é apresentado. Fechando o capítulo são discutidos alguns aspectos favoráveis e desfavoráveis do seu uso. A Figura 3.1 apresenta a estrutura de tópicos deste capítulo.

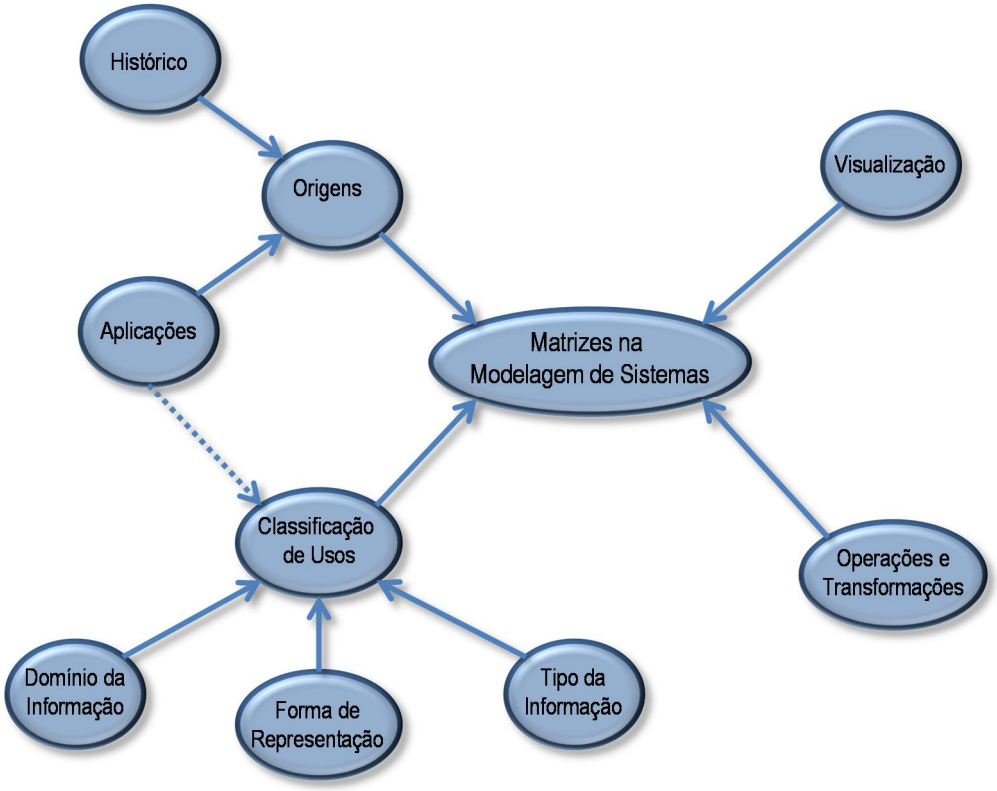


Figura 3.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 3

3.1 ORIGENS

É difícil precisar quando se começou a utilizar matrizes para a modelagem de sistemas. Contudo, já na década de 1960 o conceito de *Quality Function Deployment* (QFD), desenvolvido pelo Dr. Shigeru Mizuno e Dr. Yoji Akao, utilizava matrizes para relacionar diferentes aspectos envolvidos no planejamento e gestão do projeto de um sistema. Ao todo QFD engloba 7 tipos de ferramentas sendo que dentre elas encontra-se a *House of Quality* (HoQ) (MERTS, 2008).

A HoQ foi introduzida na QFD em 1972 durante o projeto de tanque de óleo desenvolvido pela *Mitsubishi Heavy Industries* (HOUSER, 1988). A HoQ consiste em um conjunto de hierarquias e tabelas que incluem a Hierarquia de Demandas da Qualidade, Hierarquia de Características da Qualidade, Matriz de Relacionamentos, Tabela de Planejamento da Qualidade e Tabela de Planejamento do Projeto. Trata-se de uma ferramenta que conecta o cliente à engenharia do produto (AKAO, 1997; QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT INSTITUTE, 2010).

Em 1972 Warfield apresentou o conceito de utilização de matrizes para modelagem dos interesses de consumidores e processo de manufatura do produto. O *Unified Program Planning* (UPP), como foi denominado, consiste em matrizes que representam dois tipos de interações. Primeiro, as interações de um elemento do processo para ele mesmo (auto interações), as quais são modeladas em matrizes triangulares. Depois as interações entre diferentes elementos do processo, as quais são modeladas por matrizes retangulares. O padrão que surge do relacionamento entre matrizes e que representa os interesses dos consumidores e processos de manufatura, permite a realização de análises, por exemplo, sobre o processo de desenvolvimento e qualidade do produto (WARFIELD, 1972).

O *Interpretative Structural Modeling* (ISM) surgiu em seguida em decorrência da necessidade de melhorias no UPP. O ISM baseia-se na construção de um ou mais mapas (matrizes) de relacionamentos entre diferentes aspectos envolvidos em projeto. Tais aspectos podem ser restrições, objetivos ou opções (WARFIELD;

CÁRDENAS, 2002). O ISM dá ênfase à necessidade de trabalho em grupo de maneira a aproveitar as experiências e conhecimentos de cada um dos envolvidos. Os mapas produzidos surgem do processo de decomposição de um problema/sistema complexo em vários problemas/sistemas de complexidade menor, criando um modelo estrutural de múltiplas camadas (WARFIELD, 1973a).

Warfield publicou outro artigo propondo o uso de matrizes binárias para a modelagem da estrutura de um sistema (WARFIELD, 1973b). Posteriormente Steward (1981a, 1981b) utilizou técnicas baseadas em matrizes para analisar a estrutura do processo de projeto de sistemas. As matrizes utilizadas por Steward receberam a denominação de *Design Structure Matrix* (DSM). Apesar de Steward ser reconhecido como o criador das DSMs foi Steve Eppinger um dos principais responsáveis pela sua popularização com diversos trabalhos publicados (EPPINGER, 1991, 1997; EPPINGER et al., 1994; EPPINGER; SALMINEN, 2001).

As matrizes vêm sendo utilizadas para a modelagem de diversos aspectos relacionados a sistemas. Brady (2002), por exemplo, desenvolveu uma abordagem para a avaliação de risco na adoção de tecnologias em projetos de longo prazo. Para tanto utilizou matrizes para uma análise comparativa entre tecnologias. Sosa, Eppinger e Howles (2003; 2004) realizaram estudo sobre a relação entre tipos de arquiteturas de produto e a maneira com que as equipes de engenharia estão organizadas. Para suportar esse estudo foram utilizadas matrizes tanto para a modelagem das arquiteturas dos produtos quanto para a organização das equipes de engenharia. Por sua vez, Eldén (2007) utilizou matrizes para apoiar a coleta de informações e identificação de padrões em processos de *Data Mining*.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS MATRIZES

Existem diversas maneiras para se classificar de matrizes utilizadas na modelagem de sistemas (MALMQVIST, 2002). Nesta seção são apresentadas algumas formas de classificação de interesse da Tese. Em primeiro lugar as matrizes são

classificadas quanto ao domínio da informação que modelam. Depois são classificadas quanto à forma de representação dos relacionamentos entre elementos do sistema e, por fim, são classificadas quanto ao tipo da informação modelada.

3.2.1 Matrizes Quanto ao Domínio da Informação

Malmqvist (2002) tendo como referência o domínio da informação representado nas matrizes, propõe classificá-las em dois grupos: Intra-domínio e Inter-domínio. Lindemann, Maurer e Braun (2009) estendem a classificação proposta por Malmqvist acrescentando mais dois outros grupos: Múltiplos-domínios, combinação Intra e Inter-domínio. Em essência tem-se na realidade três grupos, pois como o próprio nome indica, a combinação Intra e Inter-domínio é a junção de duas classes de matrizes. Estas três formas de classificação de matrizes são discutidas nos parágrafos a seguir.

As matrizes Intra-domínio modelam as relações entre elementos de um mesmo domínio de informação. Martin e Ishii (2000), por exemplo, apresentam a abordagem denominada *Design for Variety* (DfV) que se baseia na avaliação do impacto da variedade de tipos de elementos que compõem um sistema nos seus custos de manutenção. Dentre os indicadores utilizados na DfV está o *Coupling Index* (CI) que representa as relações internas entre pares de elementos do sistema por meio de matrizes. Outro exemplo desta classe de matrizes são as DSM.

As DSM são representadas por matrizes quadradas. Nas colunas da matriz são colocados os elementos produtores enquanto que nas linhas encontram-se os mesmos elementos, contudo na condição de consumidores. As DSM não permitem a representação de relacionamentos onde um elemento é consumidor de algo produzido por ele mesmo. Sendo assim, a diagonal principal da matriz não é utilizada.

A Figura 3.2 apresenta diagrama representativo de um sistema hidráulico simples formado por um reservatório de fluído hidráulico, um filtro, uma bomba para acionamento do motor, um atuador hidráulico e dutos. No caso, o fluído é bombeado

do reservatório para o filtro por meio da bomba hidráulica. O fluído filtrado é levado até o atuador e retorna ao reservatório. Ao lado do diagrama do sistema hidráulico está a *Design Structure Matrix* (DSM) correspondente.

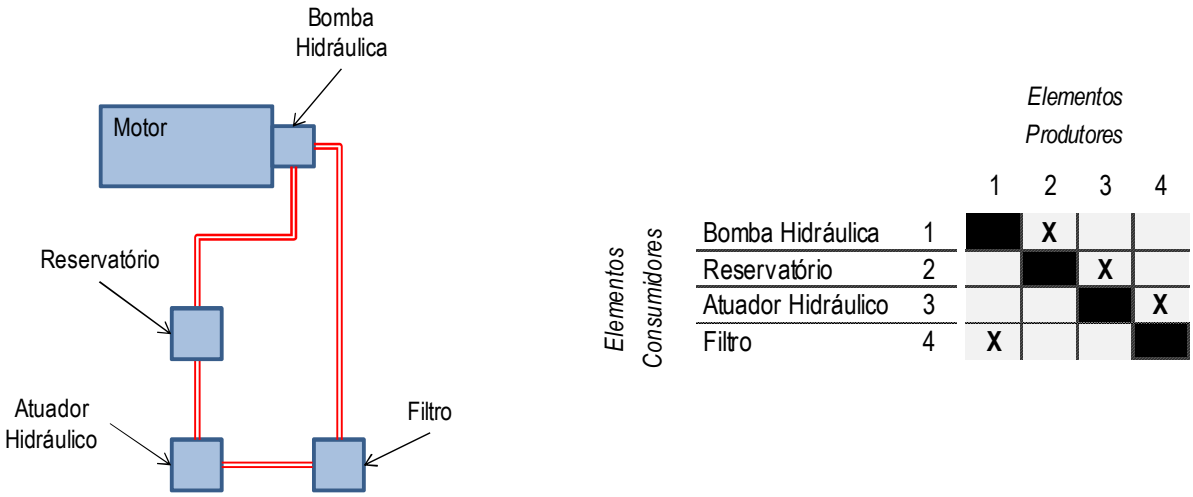


Figura 3.2 – Exemplo de *Design Structure Matrix*

As matrizes Inter-domínio modelam as relações entre elementos de domínios de informação diferentes. Tais matrizes são geralmente retangulares, assumindo as dimensões dos domínios modelados. Existem várias aplicações para as matrizes do tipo Inter-domínio. Os reticulados de Galois, por exemplo, têm sido utilizados dentro da *Formal Concept Analysis* (FCA) para a análise de dados, gestão da informação e representação de conhecimento (HERRLICH; HUSEK, 1990; PRISS, 1996, 2007; BERRY; SIGAYRET, 2004). A Figura 3.3 apresenta um exemplo de reticulado de Galois na forma de matriz e grafo correspondente.

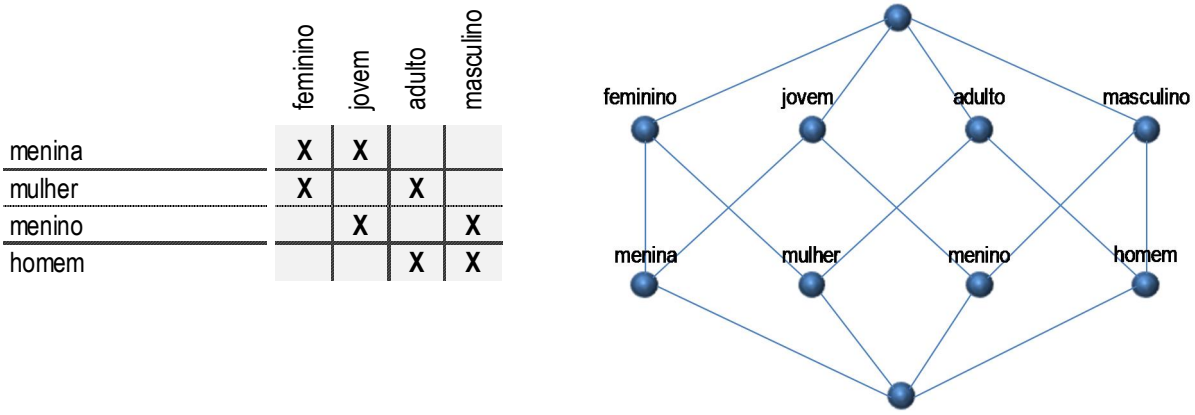
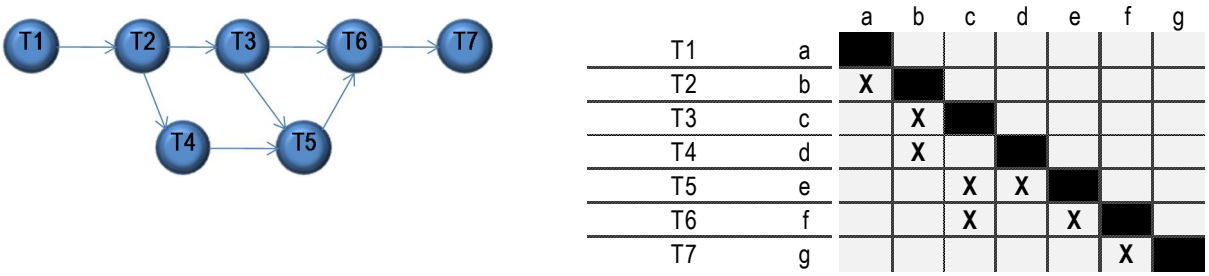


Figura 3.3 – Reticulado de Galois – adaptado de (PRISS, 2007)

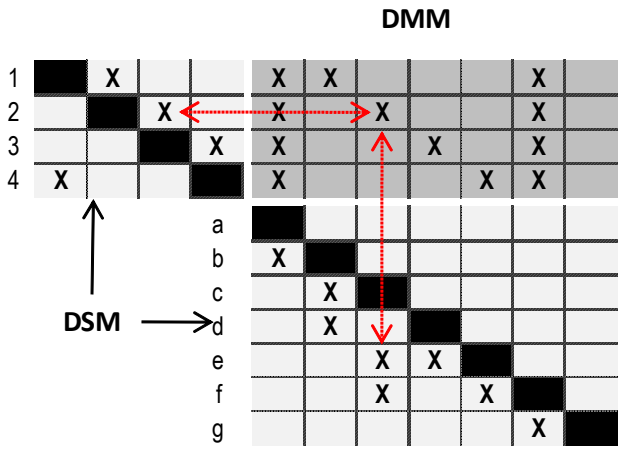
Existem diversas aplicações para as matrizes do Inter-domínio. Erixon (1998) apresenta um método para o desenvolvimento de produtos modulares denominado *Modular Function Deployment* (MFD). O elemento principal do método é a *Module-Indication Matrix* (MIM) que representa as correlacões e taxas de correlação entre módulos e funções. Danilovic e Börjesson (2001a, 2001b) sugerem o uso de *Domain Mapping Matrices* (DMM) como uma forma de conectar diferentes domínios modelados por meio de DSM. O'Donovan (2002) utiliza matrizes para mapear atividades à produtos. Li (2003) utiliza matrizes para modelar diferentes tipos de dependências entre elementos de um sistema, tais como dependência de dados e controle, dependências de entradas e saídas de um sistema. Suh (2005) sugere a utilização de matrizes para a modelagem de 4 domínios existentes em projetos de sistemas mecânicos: cliente, funcional, físico e processos. Kusiak (2008) propõe o uso de *Interface Structure Matrix* (ISM) para a modelagem entre elementos de um sistema e suas interfaces. Lemes e Camargo Jr. (2010a, 2010b) propõem a utilização de DSM e DMM para apoiar processo de desenvolvimento de sistemas baseado na norma SAE ARP4754.

As DMM, em particular, são matrizes retangulares (m X n) que estabelecem a conexão entre duas DSM, onde m é a dimensão de umas das DSM e n é a dimensão da outra. O uso combinado de DSM e DMM evidencia interdependências existentes em domínios distintos. Tal visibilidade não é possível de se obter usando somente matrizes do tipo Intra-domínio, como é o caso das DSM.

A Figura 3.4 ilustra uma DMM. No caso, existem dois domínios em questão modelados por DSM. O primeiro refere-se ao sistema hidráulico apresentado no exemplo da Figura 3.2. O segundo refere-se ao conjunto de tarefas necessárias para o desenvolvimento de tal sistema, Figura 3.4(a). A DMM apresentada na Figura 3.4(b) permite a conexão de um domínio com o outro. As setas em vermelho ilustram como é feita tal conexão.



(a) Tarefas do desenvolvimento do sistema hidráulico da Figura 3.2



(b) DMM

Figura 3.4 – Exemplo de *Domain Mapping Matrix*

As matrizes do tipo Múltiplos-domínios são formadas pela combinação de matrizes do tipo Intra e Inter-domínio. Bonguliemi et al. (2001), por exemplo, propõem método que permite representar configurações do conhecimento geradas durante projetos de engenharia. Tal método é denominado *K- & V-Matrix*. No caso, as *K-Matrix*[9] são matrizes do tipo Inter-domínio enquanto que as *V-Matrix*[10] são matrizes do tipo Intra-domínio. Yassine et al. (2003) apresentam método baseado em matrizes para análise de sistemas denominado *Connective Maps* (CM). Os CM são utilizados para modelar dependências entre tarefas do desenvolvimento, parâmetros de projeto, arquitetura do sistema, fluxo de informações e estrutura organizacional dentro do processo de desenvolvimento de um produto. Outro exemplo de matrizes de Múltiplos-domínios são as HoQ. A Figura 3.5 ilustra a estrutura básica de uma

[9] Matriz de configuração – do alemão "Konfigurationsmatrix".
[10] Matriz de compatibilidade – do alemão "Verträglichkeitsmatrix".

HoQ e faz a correspondência com DSM e DMM, as quais representam matrizes do tipo Intra e Inter-domínio respectivamente.

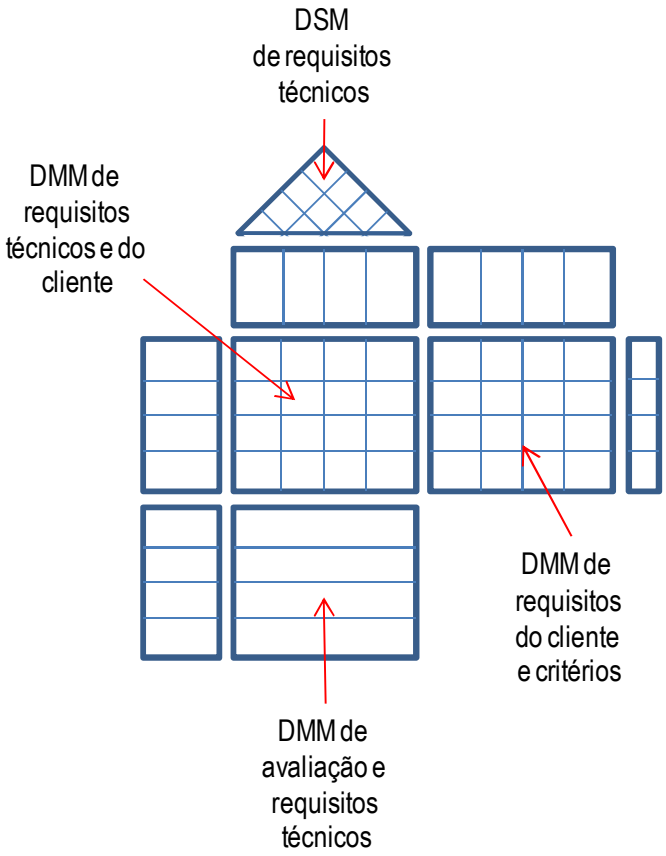
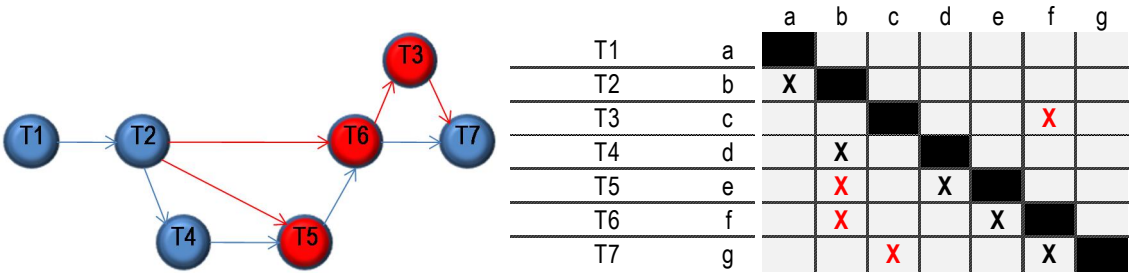
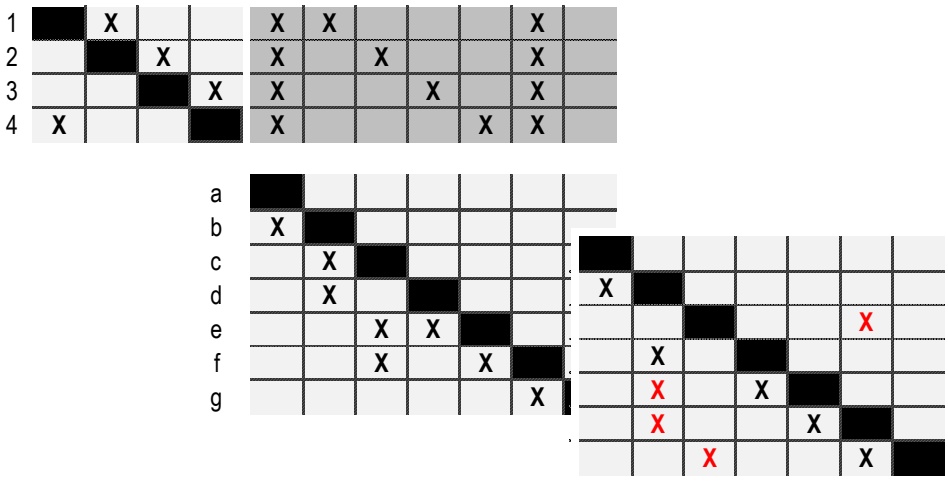


Figura 3.5 – HoQ e correspondência com matrizes do tipo Intra e Inter-domínio – adaptado de Maurer e Lindemann (2007)

O termo *Multiple-Domain Matrix* (MDM) foi utilizado pela primeira vez por Maurer e Lindemann (2007). As MDM são consistem na combinação de DSM e DMM, ou de maneira mais geral, a combinação de matrizes do tipo Intra e Inter-domínio. As DSM e DMM podem ser usadas para modelar um sistema que engloba múltiplos domínios, cada um deles contendo múltiplos elementos, ligados por diferentes tipos de relacionamentos. Considere, por exemplo, que as sequência das tarefas de desenvolvimento do sistema hidráulico apresentada na Figura 3.2 possa ser modificada para incluir um possível atraso na tarefa T3. A intenção é ter um plano de contingência para mitigar impactos no cronograma. Essa segunda configuração da sequência de tarefas pode ser modelada por meio de uma MDM. A Figura 3.6(a) apresenta a sequência de tarefas modificada e a Figura 3.6(b) a MDM resultante.



(a) Sequência de tarefas da Figura 3.2 modificada



(b) MDM

Figura 3.6 – Exemplo de *Multiple-Domain Matrix*

3.2.2 Matrizes Quanto a Representação dos Relacionamentos entre Elementos do Sistema

Os relacionamentos entre elementos de um sistema modelados em matrizes são representados na intersecção de linhas e colunas correspondentes aos elementos. No caso das DSM o elemento da coluna relaciona-se com o elemento da linha no sentido que o primeiro produz algo para o segundo. A representação deste relacionamento pode ser feita utilizando-se basicamente as seguintes abordagens:

a) Representação binária
b) Representação textual
c) Atributo qualitativo
d) Atributo quantitativo

A representação binária (matriz de adjacências) é a mais encontrada nos métodos de modelagem de sistemas em matrizes. Esse tipo de representação informa a ausência ou a presença de algum tipo de relacionamento entre dois elementos da matriz. Enquanto que a ausência de relacionamento é tipicamente indicada por “0” ou “ ”, a presença é indicada por “1” ou “X”. Warfield (1973a) foi um dos primeiros a discutir as propriedades das matrizes binárias na modelagem de sistemas. As DSM são um exemplo desse tipo de representação.

A utilização de textos (representação textual) para a representação de relacionamentos entre elementos do sistema é utilizada por Gandhi e Agrawal (1992) que apresentam método de análise de falhas e seus efeitos (FMEA) para sistemas mecânicos e hidráulicos. O método é baseado em matrizes nas quais o relacionamento entre elementos do sistema é feito por meio da descrição dos modos de falha comuns a eles. Outro exemplo é fornecido por Bartolomei (2007) por meio das *Engineering System Matrix* (ESM). De maneira geral, nesta forma de representação o relacionamento entre elementos do sistema é realizado por sentenças ou descrições.

Os relacionamentos entre elementos das matrizes podem ser qualificados segundo um critério (atributo qualitativo). Pimmler e Eppinger (1994) propuseram, por exemplo, classificar os relacionamentos entre elementos de um sistema como: Requerido, Desejado, Indiferente, Indesejado e Prejudicial. Danilovic e Börjesson (2001a) modelaram em DSM as tarefas do projeto da aeronave Gripen produzida pela empresa SAAB. O relacionamento entre as tarefas receberam qualificadores referentes ao seu impacto nas tarefas de engenharia. No caso, os qualificadores utilizados são: Impacto fraco, Médio e Forte.

É usual que atributos qualitativos tenham um equivalente numérico associado. Tal abordagem visa facilitar a representação de tais atributos nas matrizes e algumas manipulações numéricas simples. Por exemplo, Pimmler e Eppinger (1994) associaram aos relacionamentos Requerido, Desejado, Indiferente, Indesejado e Prejudicial os equivalentes numéricos 2, 1, 0, -1 e -2. Danilovic e Börjesson (2001a)

usaram os números 1, 2 e 3 associados aos relacionamentos Fraco, Médio e Forte respectivamente.

Os relacionamentos representados em uma matriz também podem ser expressos por valores (atributo quantitativo). Cho e Eppinger (2005), por exemplo, modelaram o processo de desenvolvimento de um produto por meio de uma DSM representando as tarefas do projeto. A modelagem proposta inclui diversos tipos de relacionamentos entre tarefas. Entre eles está o risco de retrabalho de uma determinada tarefa em decorrência da realização de outra, expresso por uma probabilidade (*Rework Probabilitty* – RC).

3.2.3 Matrizes Quanto ao Tipo da Informação Modelada

A estrutura de representação de informação proporcionada pelas matrizes é flexível, permitindo sua utilização em diversos contextos. As matrizes são utilizadas para modelar, por exemplo, o relacionamento entre componentes físicos de um sistema (PIMMLER; EPPINGER, 1994; SOSA; EPPINGER; ROWLES, 2003), estruturas organizacionais (SOSA, EPPINGER; ROWLES, 2004), tarefas de um projeto (CHO; EPPINGER, 2005). Segundo Browning (2001) os tipos de informação representadas nas matrizes podem ser classificados em dois grandes grupos: Informações Estáticas e Dependentes do Tempo. Estes dois grupos são desmembrados em subgrupos de informação dando origem a uma taxonomia.

A taxonomia proposta por Browning tem como referência um tipo particular de matriz, no caso as DSM. Entretanto, o esquema de classificação é bastante geral e pode ser estendido para outros tipos de matrizes empregadas na modelagem de sistemas. A Figura 3.7 apresenta tal taxonomia.

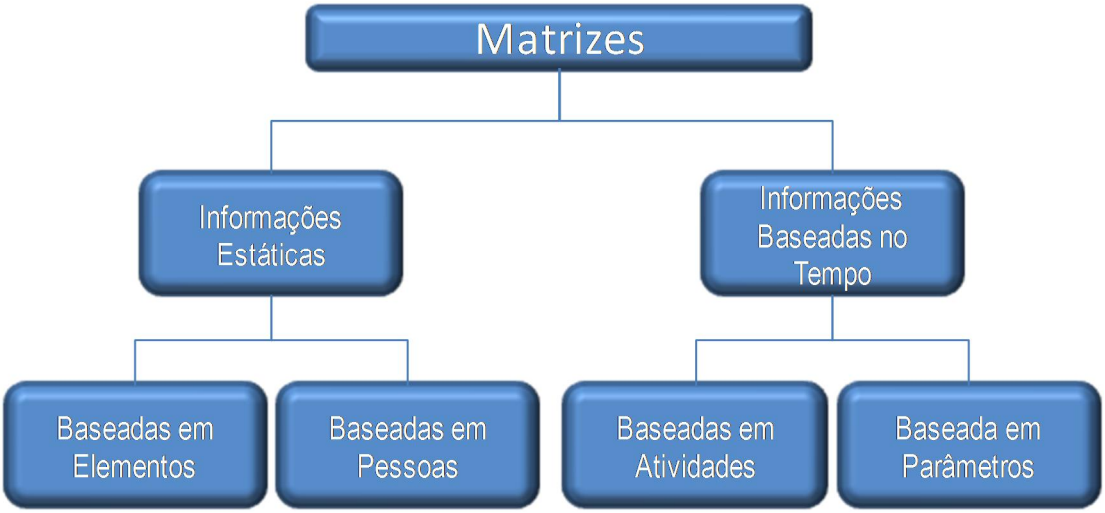


Figura 3.7 – Esquema de classificação para DSM – adaptado de Browning (2001)

As matrizes estáticas são utilizadas tipicamente para representar informações sobre estruturas e interfaces. Tais informações, por sua vez, podem ser baseadas em elementos do sistema (funcionais ou físicos) ou baseadas em pessoas.

As matrizes baseadas em elementos podem ser utilizadas para a decomposição de sistemas em subsistemas. Neste caso o que se busca é um produto modular que tenha seu projeto, integração e manutenção facilitados. Por exemplo, Pimmler e Eppinger (1994) utilizaram matrizes baseadas em elementos para modelar um sistema de ar-condicionado de automóvel. Kusiak (2008) utiliza as ISM para representar o relacionamento entre elementos de um sistema e respectivas interfaces.

As matrizes baseadas em pessoas são utilizadas para análise e projeto de fluxo de informações entre pessoas, equipes e áreas de uma organização, projeto de organizações, gestão de interfaces e integração de equipes de trabalho. Neste tipo de matriz, as pessoas são colocadas nas linhas e colunas da matriz enquanto que os relacionamentos representam a existência de algum tipo de fluxo de informação entre as partes. Um exemplo de utilização de matrizes baseadas em pessoas é dado por Sosa, Eppinger e Rowles (2004) quando modelam o relacionamento entre equipes de trabalho por meio de DSM.

As matrizes cujas informações são do tipo dependentes do tempo, apresentam dependência temporal entre seus elementos. Em geral estas matrizes são utilizadas para representar atividades, tarefas e parâmetros de um projeto. Browning (2001) divide as informações dependentes do tempo em dois grupos: baseadas em atividades e baseadas em parâmetros.

As matrizes baseadas em atividades modelam processos de desenvolvimento por meio da representação da dependência entre atividades/tarefas de projeto. São utilizadas para melhoria de processos, cronogramas de projeto, gestão da iteração entre tarefas e fluxo de informação. Sharon, Dori e de Weck (2009) aplicam este tipo de matriz para a modelagem de atividades em projeto de um *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV).

As matrizes baseadas em parâmetros estão relacionadas às características funcionais ou físicas dos elementos de um sistema. Estes parâmetros ocorrem nas atividades de projeto de mais baixo nível. Black, Fine e Sachs (1990) utilizaram matrizes baseadas em parâmetros para a modelagem do sistema de freio de um automóvel. Pektas e Pultar (2006) aplicaram o conceito de matrizes baseadas em parâmetros no contexto da construção civil com o objetivo de identificar processos iterativos e concorrentes.

3.3 OPERAÇÃO E TRANSFORMAÇÕES EM MATRIZES

As matrizes podem ser manipuladas de diferentes maneiras. O seu conteúdo pode sofrer operações aritméticas ou transformações. Tais transformações são em geral de 4 tipos: Particionamento, *Clustering*, *Banding* e *Tearing*.

Particionar uma matriz significa minimizar, ou mesmo eliminar, ciclos de realimentação entre elementos, transformando o processo modelado em sequencial. Isso é realizado por meio da reordenação de linhas e colunas removendo elementos

da parte inferior da diagonal principal da matriz (STEWARD, 1981a, 1981b; BRAHA, 2002).

A transformação *clustering* ocorre em matrizes que representam informações estáticas[11]. O objetivo de *clustering* é identificar subconjuntos de elementos de uma matriz que atendem a determinados critérios. Enquanto que os elementos pertencentes a um *cluster* encontram-se fortemente acoplados, os mesmos possuem acoplamento fraco com os elementos pertencentes a outros clusters de elementos (JAIN; MURTY; FLYNN, 1999; XU; WUNSCH, 2005; HELMER; YASSINE; MEIER, 2007).

A transformação de *banding* consiste em identificar grupos de elementos mutuamente independentes por meio do realinhamento dos mesmos, destacando-os por meio de linhas mais claras e escuras. Os elementos que estão em linhas consecutivas da matriz, independentes entre si, pertencem ao mesmo *band*. Cada linha indicada por um *band* refere-se a um nível hierárquico diferente (GROSE, 1994)[12]. No processo de *banding* os ciclos de realimentação são ignorados. Em função disso, esse tipo de transformação tem sido questionada quanto à sua aplicabilidade (LINDEMANN; MAURER; BRAUN, 2009).

A transformação de *tearing* consiste em identificar ciclos de realimentação que, uma vez removidos da matriz, resulta em uma matriz triangular superior. Esse tipo de transformação requer que antes seja realizado o particionamento da matriz. Feito isso, os relacionamentos candidatos a serem removidos da matriz ficam localizados na parte inferior da diagonal principal (YASSINE, 2004).

---

[11] Em alguns casos os termos “particionamento” e “*clustering*” são utilizados de maneira equivalente como ocorre em Riyavong (2003).

[12] Um exemplo da operação de *banding* pode ser obtido em < http://129.187.108.94/dsmweb/en/understand-dsm/technical-dsm-tutorial0/banding.html>, acesso em 27/12/2010.

3.4 VISUALIZAÇÃO DE MATRIZES

A visualização do relacionamento entre dados é um dos aspectos positivos do uso de matrizes. Tais relacionamentos ficam evidenciados em função da estrutura de representação em linhas e colunas. A maneira mais simples de visualização ocorre por meio de matrizes de adjacências. Neste caso os relacionamentos entre dados são representados de maneira binária ou numérica (WU; TZENG; CHEN, 2008).

Nas matrizes de adjacências é usual encontrar a representação de um único tipo de relacionamento entre os dados. Caso haja a necessidade de se representar mais de um tipo de relacionamento, então outra matriz de adjacências deve ser criada. Contudo, Pimmler e Eppinger (1994) propuseram a construção de tipo de matriz que elimina essa limitação. O exemplo desenvolvido por Pimmler e Eppinger refere-se a um sistema de controle de ar-condicionado automotivo, onde cada relacionamento entre os elementos pode ser de quatro tipos: Espacial, Energia, Informação e Material.

Cada um dos relacionamentos propostos por Pimmler e Eppinger pode assumir valores em uma escala que varia entre 2 e -2 indicando se o relacionamento é requerido (2) ou se é prejudicial ao sistema (-2), conforme apresentado na seção 3.2.2. Os 4 tipos de relacionamentos e suas correspondentes avaliações são representados em cada uma das células da matriz onde podem ser visualizados ao mesmo tempo (Figura 3.8). Variações desta forma de representação são propostas por Sosa, Eppinger e Rowles (2003) e Helmer, Yassine e Meier (2010).

A visualização efetiva dos dados representados em uma matriz depende da maneira como estes se encontram organizados. Em geral, é necessário realizar algum tipo de transformação na matriz (ver seção 3.3) para que a identificação de relacionamentos e estruturas não fique comprometida (SHEN; MA, 2007).

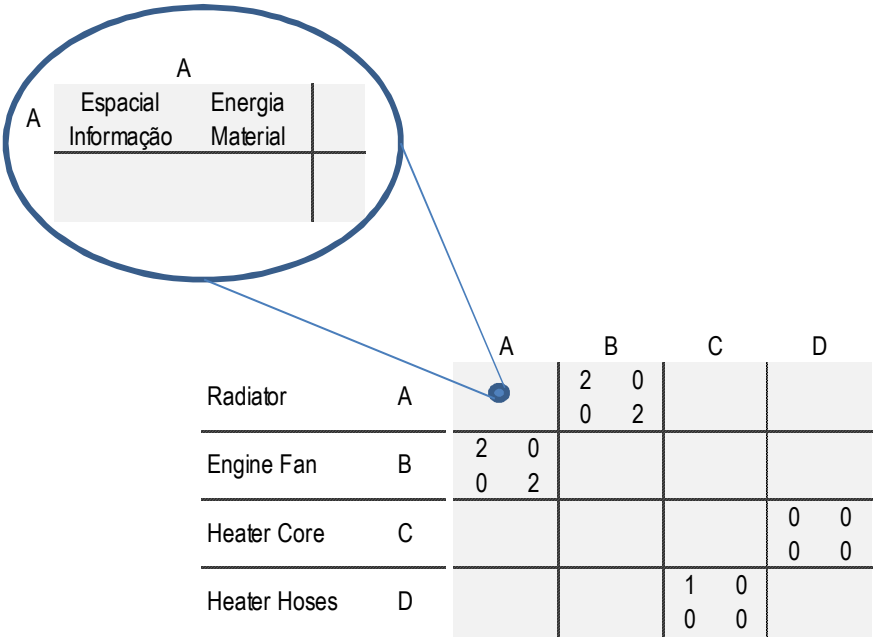


Figura 3.8 – Representação de tipos múltiplos de relacionamentos – adaptado de Pimmler e Eppinger (1994)

A Figura 3.9(a) ilustra os elementos de um sistema e seus relacionamentos representados em uma matriz. O critério adotado para a ordenação dos elementos da matriz nas linhas e colunas é arbitrário. No caso da Figura 3.9(b) os mesmos elementos foram submetidos a uma transformação de *clustering*, agrupando-os ao longo da diagonal principal da matriz. Nesta segunda representação os relacionamentos encontram-se mais evidentes.

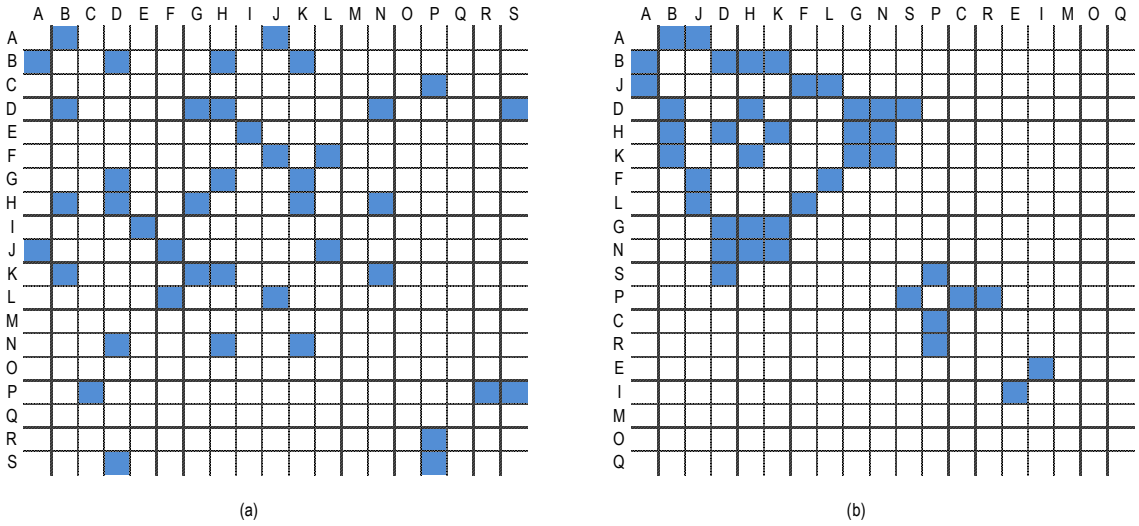


Figura 3.9 – Impacto da organização dos dados na visualização de matrizes – adaptado de Shen; Ma (2007)

Quando as dimensões da matriz aumentam mesmo que exista algum tipo de organização dos dados a visualização dos relacionamentos pode se tornar difícil. Esta situação é típica para a adoção de mapas térmicos. Os mapas térmicos são esquemas de cores criados para representar grupos de dados (LELAND; FRIENDLY, 2009).

No caso das matrizes numéricas, por exemplo, pode-se associar cores a faixas de valores, onde os valores mais altos possuem cores quentes enquanto que os valores mais baixos possuem cores frias. As matrizes apresentadas na Figura 3.10, por exemplo, possuem os mesmos valores. Considere, contudo, que somente os valores acima de 50 são de interesse e que quanto mais próximo de 100, maior a sua relevância. Identificar tais valores na matriz 3.10(a) é trabalhoso, enquanto que na matriz 3.10(b) os valores de interesse se destacam pelo gradiente de cores utilizado.

84	84	89	78	19	61	32	99	92	99	3	75	83	92	67	67	44
86	28	45	62	49	75	8	86	84	20	85	90	80	79	90	89	85
65	46	29	50	12	55	72	13	16	11	78	41	8	22	81	7	31
77	59	92	77	99	83	76	20	99	35	35	54	82	16	3	37	44
82	14	86	56	62	84	27	62	21	37	62	72	38	33	83	17	38
15	3	60	13	78	57	84	34	84	77	5	90	51	26	3	55	60
5	44	81	67	87	80	62	81	3	42	7	46	5	54	63	71	26
66	69	35	61	47	64	74	97	1	69	1	56	81	23	65	77	90
25	8	3	60	94	85	44	41	33	73	22	85	49	72	61	64	42
85	59	53	28	63	24	74	78	67	78	35	58	51	15	83	4	19
39	41	98	24	2	19	11	50	47	60	44	84	33	17	90	33	78
61	82	26	42	33	55	42	21	88	35	90	50	43	76	50	45	36
79	92	83	80	18	83	21	90	32	96	0	87	62	64	70	35	82
68	18	7	69	99	66	98	50	26	38	90	30	73	93	34	1	18
59	44	50	42	68	20	82	29	34	53	41	48	43	49	9	74	21
42	84	25	90	73	15	31	39	59	91	90	49	85	13	17	68	2
14	82	88	70	81	58	57	53	93	30	87	30	30	94	31	0	34

(a)

84	84	89	78	19	61	32	99	92	99	3	75	83	92	67	67	44
86	28	45	62	49	75	8	86	84	20	85	90	80	79	90	89	85
65	46	29	50	12	55	72	13	16	11	78	41	8	22	81	7	31
77	59	92	77	99	83	76	20	99	35	35	54	82	16	3	37	44
82	14	86	56	62	84	27	62	21	37	62	72	38	33	83	17	38
15	3	60	13	78	57	84	34	84	77	5	90	51	26	3	55	60
5	44	81	67	87	80	62	81	3	42	7	46	5	54	63	71	26
66	69	35	61	47	64	74	97	1	69	1	56	81	23	65	77	90
25	8	3	60	94	85	44	41	33	73	22	85	49	72	61	64	42
85	59	53	28	63	24	74	78	67	78	35	58	51	15	83	4	19
39	41	98	24	2	19	11	50	47	60	44	84	33	17	90	33	78
61	82	26	42	33	55	42	21	88	35	90	50	43	76	50	45	36
79	92	83	80	18	83	21	90	32	96	0	87	62	64	70	35	82
68	18	7	69	99	66	98	50	26	38	90	30	73	93	34	1	18
59	44	50	42	68	20	82	29	34	53	41	48	43	49	9	74	21
42	84	25	90	73	15	31	39	59	91	90	49	85	13	17	68	2
14	82	88	70	81	58	57	53	93	30	87	30	30	94	31	0	34

(b)

Figura 3.10 – Exemplo de mapa térmico

Segundo Shapiro (2010) a adoção de cores associadas aos dados, como ocorre nos mapas térmicos, é a escolha natural para se fornecer uma visão geral sobre grandes massas de dados. Esta abordagem é comum em técnicas de visualização de dados

(WARE, 2004; CHEN; HÄRDLE; UNWIN, 2008) e processos de *Data Mining* (CLARKE; FOKOUÉ; ZHANG, 2009; MYATT; JOHNSON, 2009). Na área aeronáutica algumas empresas têm empregado técnicas de *Data Mining* e visualização de dados por meio de mapas térmicos para a análise de dados de incidentes aéreos e programação de manutenções nas aeronaves (NAZERI, 2003; LARDER; SUMMERHAYES, 2004; PÉLADEAU; STOVALL, 2005).

Outra maneira de se visualizar os dados de uma matriz é por meio de grafos. Os dados dispostos nas linhas e colunas da matriz correspondem aos nós do grafo, enquanto que os relacionamentos são representados pelas arestas. O grafo resultante pode ser dirigido ou não-dirigido dependendo do tipo de relacionamento entre os dados. Nas DSM, por exemplo, o grafo correspondente é sempre do tipo dirigido, pois os dados das colunas são produtores, enquanto que os dados nas linhas são consumidores. A Figura 3.11 ilustra este exemplo.

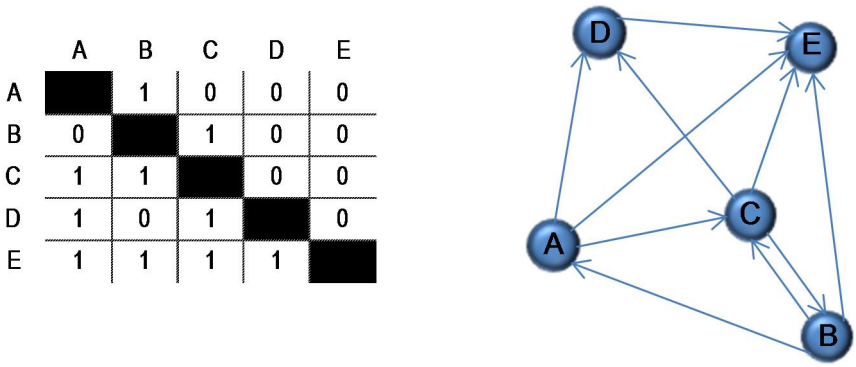


Figura 3.11 – Visualização de matrizes em grafos

Da mesma maneira que uma matriz pode ser visualizada na forma de grafo, um grafo também pode ser visualizado na forma de uma matriz. Contudo, a escolha por uma forma ou outra depende do uso que se pretende fazer da informação. Enquanto que matrizes são mais apropriadas para comparações e operações aritméticas os grafos propiciam a identificação de padrões mais facilmente. Tilstra et al. (2010) apresentam um conjunto que questionamentos no sentido de direcionar a escolha por um formato ou outro.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A representação de sistemas por meio de matrizes permite a comparação, dois a dois, de diferentes características de seus elementos. A disposição dos elementos do sistema em linhas e colunas permite determinar de maneira clara e não ambígua a existência ou não de algum tipo de conexão entre eles. Além disso, os métodos de manipulação das matrizes são bastante consolidados o que facilita a realização de operações matemáticas e transformações com suporte computacional.

A representação de sistemas em matrizes permite que seus elementos e correspondentes conexões possam ser visualizados como um todo. Neste caso, a utilização de mapas térmicos pode ser útil para evidenciar conexões entre elementos consideradas relevantes segundo um critério definido. Apesar de empregados em processos de *Data Mining* e visualização de dados em geral, os mapas térmicos têm sido pouco explorados no contexto de análise de sistemas.

A representação de sistemas por meio de matrizes evidencia a estrutura de conexões entre os elementos de um sistema (conexões internas) e entre sistemas (conexões externas). A partir de estruturas básicas que surgem nas arquiteturas de sistemas é possível representar, por exemplo, redundâncias e monitores. Tal aspecto é importante para se obtenha um modelo representativo do sistema. O Apêndice C apresenta algumas dessas estruturas e sua representação em matrizes.

A matriz que resulta da modelagem de um sistema é do tipo esparsa. Isso acontece, pois em termos práticos, não é esperado que todos os elementos do sistema estejam conectados entre si. Quanto maior o número de elementos do sistema esta característica se torna mais evidente.

A utilização de matrizes para armazenar dados, que já se sabe *a priori* serem esparsos, não é eficiente. Contudo é importante observar que não estão sendo discutidas aqui possíveis formas de armazenamento de dados, mas somente a sua

apresentação. A solução computacional para o armazenamento das matrizes não é objeto desta Tese.

Uma limitação da utilização de matrizes é quanto à representação de mais de um tipo de conexão entre os elementos de um sistema. Neste caso é necessária a utilização de outras matrizes, uma para cada tipo de conexão ou, como proposto por Pimmler e Eppinger (1994), adotar matrizes capazes de armazenar mais de um valor por célula.

As matrizes são utilizadas em geral para a representação de informações estáticas. Mesmo quando se trata de matrizes relacionadas à informações dependentes do tempo (seção 3.2.3) a modelagem visa, em essência, estabelecer sequências fixas de eventos. A associação das conexões entre elementos a uma evolução temporal ou a determinados estados e modos do sistema têm sido pouco explorada na literatura.

4 ACOPLAMENTO

O objetivo deste capítulo é apresentar o conceito de acoplamento no contexto de projeto de sistemas. A abordagem adotada apresenta inicialmente uma definição para o termo, bem como outros conceitos que estão relacionadas a acoplamento. Em seguida, são discutidas diferentes formas como os elementos de um sistema podem interagir e a intensidade dessas interações. São apresentadas então algumas maneiras de se quantificar o acoplamento. Por fim é apresentado um sumário do capítulo. A Figura 4.1 apresenta a estrutura de tópicos deste capítulo.

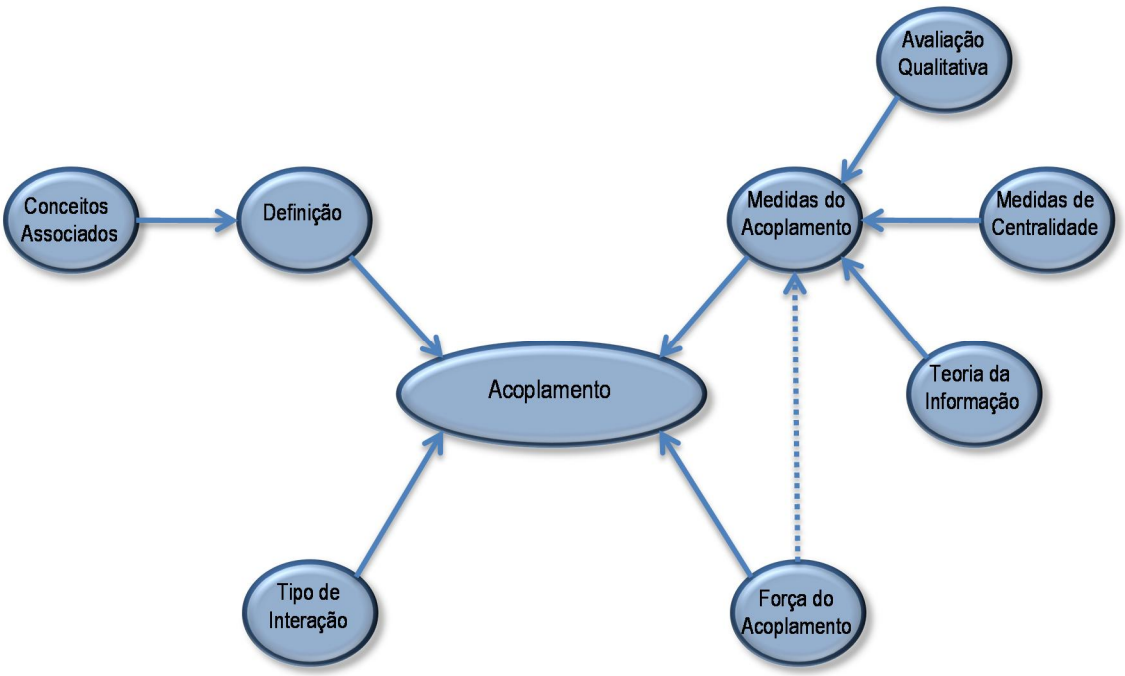


Figura 4.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 4

4.1 O QUE É ACOPLAMENTO

O comportamento de um sistema pode ser determinado por três aspectos básicos. O primeiro refere-se às características individuais de cada um de seus elementos. O segundo está relacionado com a maneira com que tais elementos estão conectados, dando origem à estrutura do sistema. Por fim, está a forma com que os elementos interagem entre si por meio da estrutura.

O termo acoplamento aparece em diferentes contextos, contudo sempre no sentido de expressar interação entre elementos. Na Física acoplamento significa a existência de duas forças atuando em paralelo, mas em direções contrárias provocando movimento de rotação (RESNICK; HALLIDAY, 1983). Na Eletrônica refere-se a interferência provocada por sinais elétricos de uma parte do circuito em outra (US NAVY, 2004). Em circuitos óticos acoplamento é utilizado no sentido da transmissão de energia luminosa de uma fonte para outro elemento (RODITI, 2005). Na área de software acoplamento é definido, em geral, como uma medida da força da interconexão entre elementos de um sistema (STEVENS; MYERS; CONSTANTINE, 1974; YOURDON; CONSTANTINE, 1990).

O conceito de acoplamento também é abordado de maneira implícita ou explícita no processo de desenvolvimento de sistemas. Lipson (2007) afirma que um sistema modular possui, por definição, baixo acoplamento. A busca pela modularidade visa essencialmente (BALDWIN; CLARK, 2006):

- Controlar a complexidade do sistema
- Permitir desenvolvimentos dos elementos de maneira independente ou paralela
- Preparar o sistema para acomodar possíveis evoluções
    - Tornando-o menos susceptível a problemas do tipo propagação de defeitos
    - Minimizando custos

No que se refere à segurança de sistemas, a utilização de particionamento é uma forma usual de se quebrar o acoplamento entre elementos. Uma das razões para se particionar um sistema é a contenção de falhas. Por princípio uma falha em uma partição do sistema não deve se propagar para outra partição (RUSHBY, 2000). O termo segregação é utilizado no mesmo sentido de particionamento (KLEEMANN; DEY; RECKSIEK, 2000; MOIR; SEABRIDGE, 2008).

A tarefa de encontrar a melhor configuração do sistema em termos do particionamento de seus elementos pode ser apoiada com a utilização de técnicas de *clustering. Clustering* é uma denominação genérica de um conjunto de técnicas que visam a identificação de grupos de elementos que satisfazem alguma condição de semelhança (ALDENDERFER; BLASHFIELD, 1984). Dessa maneira, um *cluster* é um grupo de elementos que possui alto acoplamento pelo critério de semelhança utilizado.

De maneira independente do contexto em que o conceito de acoplamento é utilizado, um aspecto que é comum a todos é a existência de interação entre elementos. A próxima seção aborda diferentes tipos de interação entre elementos de um sistema que influenciam a ocorrência de acoplamento.

4.2 INTERAÇÃO ENTRE ELEMENTOS

O acoplamento entre elementos de um sistema está diretamente relacionado à forma com que tais elementos interagem. A interação exige que haja um meio conectando os elementos e que ocorra a passagem de energia, informação ou material entre eles.

O meio pelo qual se dá a interação pode ser físico ou não-físico. Engrenagens, cabos elétricos e barramentos de dados são exemplos típicos de meio físico. Existe, contudo a possibilidade de que dois elementos interajam por um meio não-físico como ocorre hoje com as comunicações sem cabo.

A interação pode ocorrer pela passagem de energia. Exemplos neste caso são energia elétrica, mecânica, calor e radiação. Também pode ser do tipo informação. A transmissão de dados em uma rede de computadores é exemplo típico de interação por passagem de informação. Ainda há a possibilidade de passagem de algum ente físico entre os elementos do sistema, neste caso diz-se que a interação é do tipo material.

As interações podem ser analisadas também sob a ótica de como os elementos do sistema estão conectados. Dois elementos de um sistema podem interagir, por exemplo, de maneira direta ou indireta. No primeiro caso existe um meio que conecta de maneira direta dois elementos de um sistema (Figura 4.2(a)). A interação indireta ocorre quando há dependência entre dois elementos, entretanto há um ou mais elementos entre eles. Na Figura 4.2(b) o elemento B depende do elemento A, contudo existem elementos intermediários na sequência de interação (YANG; TEMPERO; BERRIGAN, 2005).

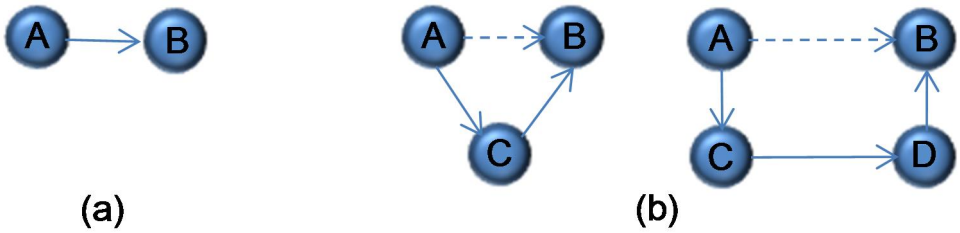


Figura 4.2 – Interação direta e indireta entre elementos de um sistema

Em termos práticos as arquiteturas de sistemas federados em aeronaves adotam o tipo de interação direta. Em geral, cada comando no painel de controle da aeronave aciona de maneira direta o sistema correspondente. Já nas arquiteturas integradas, é comum haver um sistema supervisor que funciona como intermediário para os comandos acionados pelo piloto. Tais sistemas são responsáveis, entre outras funções, por garantir a coerência entre os comandos em execução. Neste cenário o comando chega ao seu destino por meio de um sistema intermediário, o que caracteriza a interação indireta.

Os circuitos ou ciclos de informação constituem um tipo de interação onde os elementos são interdependentes (YASSINE, 2004). Os circuitos podem ocorrer tanto de maneira direta quanto indireta. Na Figura 4.3 o elemento A influencia o elemento D que, por sua vez influência o elemento A, caracterizando um circuito de interações diretas. Por outro lado, o Sistema 1 apresenta um circuito de interações indiretas formado pelos elementos *a*, *c*, *b* e *d*. A existência de ciclos de informação é apontada como fator que aumenta a complexidade de um sistema (PERROW, 1999). Nesse sentido, English, Bloebaum e Miller (2001) propõem uma técnica para a otimização deste tipo de interação.

As interações entre elementos de um sistema podem também ser vistas como lineares e complexas (PERROW, 1999). Interações lineares são aquelas que ocorrem de acordo com o projeto do sistema. Já as interações complexas surgem a partir de sequencias não planejadas/inesperadas ou não familiares aos operadores. Segundo Perrow uma interação complexa surge de ramificações em sequências lineares de elementos de um sistema, ciclos de realimentação, e conexões provocadas por elementos externos ao sistema ou não evidentes.

Na Figura 4.3 os elementos A e F fazem parte do sistema 2, contudo não há interação entre eles. Contudo, caso sejam consideradas também as conexões externas oriundas o sistema 1, fica evidenciado que os elementos A e F interagem de maneira indireta por meio do elemento *d*. No exemplo, uma vez que a conexão entre os elementos A e F foi evidenciada, a interação entre eles pode ser considerada linear pelo critério proposto por Perrow (1999). Entretanto, conexões desta natureza não são de fácil identificação. É necessária a adoção de análises específicas a fim de evidenciá-las. Em sistemas com poucos elementos e conexões essa tarefa é relativamente simples. Por outro lado, em sistemas com muitos elementos e conexões tal identificação pode não ser viável, o que leva à possibilidade do surgimento de comportamentos emergentes advindos de interações complexas.

Para Lindemann, Maurer e Braun (2009) o tipo de interação existente entre os elementos A e F é considerada como uma forma de interação indireta que ocorre entre elementos de domínios diferentes.

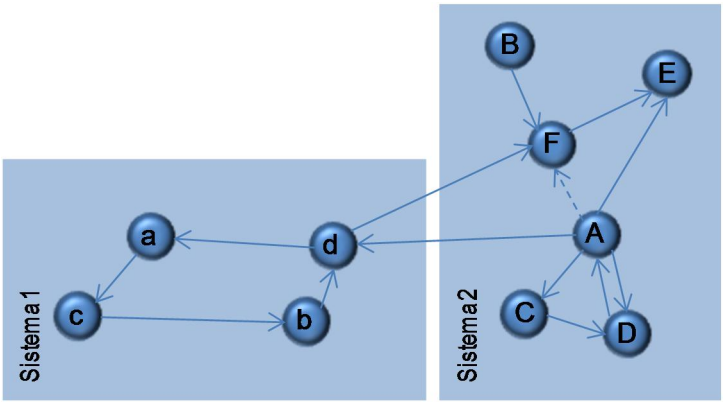


Figura 4.3 – Interação por meio de elemento externo ao sistema

No processo de desenvolvimento de uma aeronave, uma das primeiras atividades consiste em definir as funções que a mesma deve desempenhar. Uma função típica neste caso é a de parar a aeronave. Do ponto de vista dos sistemas, tanto os freios quanto o reverso contribuem para a parada da aeronave. Em termos de instalação, ambos os sistemas não possuem interação entre si, contudo ambos estão relacionados à função de parar a aeronave. Neste caso a conexão entre os sistemas ocorre por meio de um elemento fora do domínio das funções de sistema (Figura 4.4).

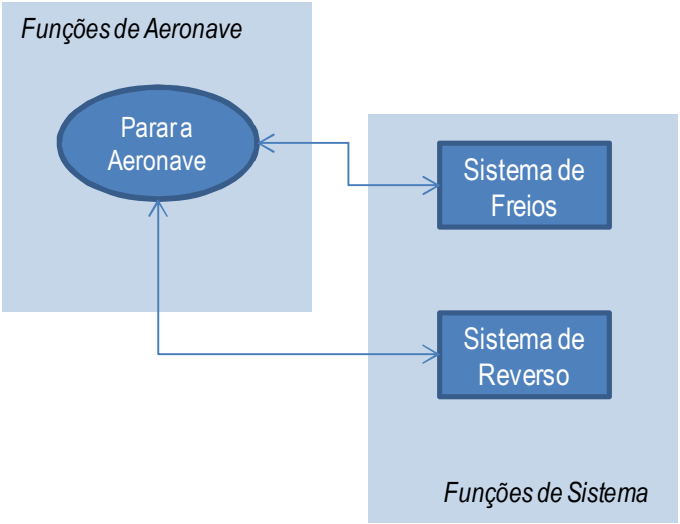


Figura 4.4 – Interação de funções de domínios diferentes

A interação entre elementos de um sistema ou mesmo entre sistemas pode ser influenciada pelo tempo. Sistemas onde as interações ocorrem de maneira síncrona possuem um tipo de interação mais forte do que o provocado por interações assíncronas. Enquanto que no primeiro caso existem condições temporais rigorosas para que a interação ocorra, quando a interação ocorre de maneira assíncrona as margens correspondentes são maiores.

A questão do tempo pode ser estendida para o caso onde as interações dependem dos estados do sistema. Dessa maneira, os elementos podem ou não interagir em função de condições específicas. No exemplo da Figura 4.5 os elementos A e B estão ativos enquanto que o elemento C está desativado apesar de existir uma conexão entre ele e os elementos A e B. Quando o sistema passa para o estado 1 o elemento C é ativado iniciando a interação dele como os elementos A e B. No estado 2 todos os elementos do sistema são desativados.

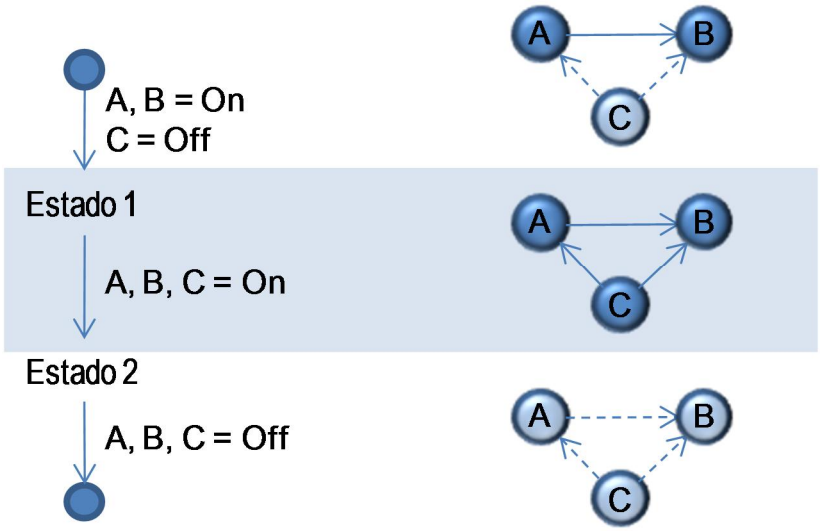


Figura 4.5 – Interação com influência temporal

No contexto de uma aeronave, por exemplo, durante a fase de decolagem (*take off*) o trem de pouso encontra-se baixado. Nesta situação o arrasto provocado pelo trem de pouso é considerado nas leis de controle da aeronave. Contudo, quando a aeronave passa para a fase de subida (*climbing*) o trem de pouso é recolhido. Em

consequência, o arrasto correspondente deixa de existir assim como sua influência nas leis de controle da aeronave.

4.3 ACOPLAMENTO FORTE E FRACO

O acoplamento entre elementos está na essência de um sistema. Conforme discutido no Capítulo 2, Bertalanffy (1969, p.33) refere-se a sistemas como sendo elementos em interação. Uma vez que existe interação então existe acoplamento também. Dessa maneira a questão que subjaz às preocupações relacionadas ao acoplamento no projeto de um sistema reside no grau com que ele ocorre.

O acoplamento é maior quanto mais os elementos do sistema forem dependente uns dos outros. Lindemann, Maurer e Braun (2009) afirmam que um sistema é fortemente acoplado na medida em que as saídas de qualquer elemento do sistema tem o potencial de atingir todos os demais elementos. Tal abordagem corresponde, em essência, à definição de um grafo fortemente conexo, onde dados dois vértices quaisquer cada um pode ser atingido a partir do outro (NETTO, 1979).

De acordo com Charles Perrow (1999) sistemas fortemente acoplados apresentam 3 características principais:

a) Possuem mais processos dependentes do tempo (acoplamento temporal);
b) As sequências de execução dos elementos do sistema apresentam pouca ou nenhuma variação;
c) Possuem margens pequenas (tais margens podem ser temporais, tolerâncias, etc).

A preocupação de Perrow é com a combinação entre interações complexas e acoplamento. Segundo ele, quando um sistema apresenta tais características a ocorrência de acidentes é inevitável. Complexidade e acoplamento constituem a base da *Normal Accident Theory* (NAT) (PERROW, 1999).

Se o acoplamento forte significa a possibilidade de interação de cada elemento do sistema com todos os demais, no extremo oposto a ausência de interação entre os elementos implica também na ausência de acoplamento. O grau de acoplamento, ou sua força, é uma medida que se situa entre estes dois polos. Quando a interdependência entre os elementos é reduzida ao mínimo então diz-se que ocorre um acoplamento fraco (WEICK, 1976; WEICK; SUTCLIFFE, 2001; HERZIG, VARZINCZAK, 2005).

Um conceito discutido no contexto de redes sociais, mas que pode ser generalizado para sistemas em geral é a importância de ligações fracas (*weak ties* ou *weak links*). Alguns elementos podem não ter relevância em termos do seu número de conexões, contudo tais elementos podem estar conectados a outros elementos importantes para o sistema como um todo (BARABÁSI, 2003; CSERMELY, 2006). Por exemplo, na Figura 4.7 o elemento F interage com o elemento G. Apesar de ter poucas conexões problemas ocorridos com o elemento F podem afetar os elementos G, A, E, H, C e B.

4.4 AVALIAÇÃO DO ACOPLAMENTO

O acoplamento pode ser avaliado sob diferentes perspectivas dependendo das características do sistema e tipo de informação que se quer obter. Tal avaliação pode ser qualitativa ou quantitativa. Na abordagem qualitativa os sistemas ou elementos de um sistema são relativizados uns em relação aos outros de acordo com o seu acoplamento. Perrow (1999), por exemplo, criou uma escala onde coloca sistemas de natureza diversa ordenados pelo grau de acoplamento, conforme apresentada na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Acoplamento relativo entre sistemas (Adaptado de Perrow (1999))

O conceito de acoplamento foi introduzido no contexto de software por Stevens, Myers e Constantine (1974). Stevens, Myers e Constantine identificaram que módulos de software apresentavam características comuns quanto às suas conexões. Tais características constituem-se em 5 tipos de acoplamento: Acoplamento de Dados, Identificação, Controle, Comum e de Conteúdo. Estes tipos de acoplamento podem ser considerados em uma escala onde o acoplamento mais fraco é o de dados e o mais forte o de conteúdo (FENTON; MELTON, 1990; DHAMA, 1995; PRESSMAN, 2002). Neste caso em particular é possível não somente identificar características associadas à ocorrência do acoplamento, como também quantificá-los. Alghamdi (2008) propõe associar valores de 1 a 5 ao acoplamento de Dados, Identificação, Controle, Comum e de Conteúdo respectivamente. A ausência de acoplamento recebe o valor 0.

Uma forma de se quantificar o acoplamento é a utilização de medidas de centralidade. Este tipo de medida determina a importância relativa de um elemento do sistema em relação aos demais. Existem várias abordagens para se medir a centralidade de um elemento tais como Centralidade de Grau (*Degree Centrality*), de Proximidade (*Closeness*), de Intermediação (*Betweenness*).

A medida de centralidade mais simples de ser calculada é a Centralidade de Grau (NEWMAN, 2010). Esta medida consiste em determinar o número de conexões de cada elemento do sistema. As conexões são contabilizadas por meio daquelas que incidem sobre o elemento (*fan-in*) e aquelas que incidem a partir dele (*fan-out*). Assim quanto maior for o resultado dessa contagem, também maior é o grau de acoplamento do elemento.

A principal limitação desta abordagem é considerar somente as conexões diretas de um elemento, não avaliando a extensão da sua influência sobre os demais elementos do sistema. Em termos de um grafo, tal medida refere-se aos elementos que são atingidos por um caminho de comprimento 1. Neste caso o acoplamento é dado por:

$$C_{grau}(e_i) = e_{i_{fan-in}} + e_{i_{fan-out}} \tag{4.1}$$

A forma normalizada desta fórmula é:

$$C_{grau}(e_i) = \frac{e_{i_{fan-in}} + e_{i_{fan-out}}}{S-1} \tag{4.2}$$

Onde *S* é o número de elementos do sistema (*S* > 2).

Pela Centralidade de Grau, um elemento que esteja segregado do sistema possui acoplamento 0. Por outro lado o acoplamento é máximo se cada elemento estiver conectado a todos os demais elementos do sistema em termos de *fan-in* e *fan-out*, ou seja, 2*(n-1), onde n é o número total de elementos. Tal definição equivale àquela de um sistema fortemente acoplado.

O grafo apresentado na Figura 4.7 representa um sistema contendo 8 elementos. O acoplamento do elemento A é 9/7 = 1,28 e do elemento B é 2/7 = 0,28. O acoplamento máximo é 14/7 = 2.

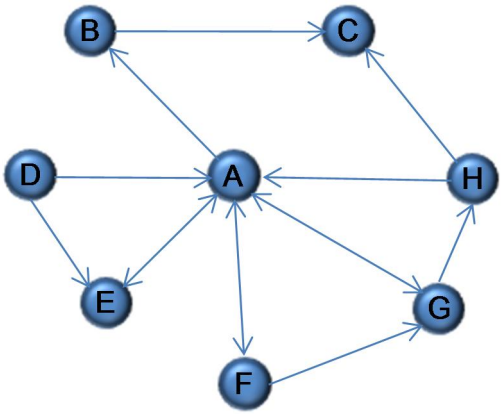


Figura 4.7 – Grafo referente a um sistema de 8 elementos

A medida de Proximidade (*Closeness*) é uma alternativa à Centralidade de Grau, pois elimina a limitação de se considerar elementos com distância 1. A Proximidade é definida como o inverso da média do comprimento dos menores caminhos entre um elemento e_i do sistema e todos os demais elementos e_j possíveis de se atingir a partir de e_i (NEWMAN, 2010). Assim quanto menor a distância entre dois elementos, maior é o seu acoplamento. De maneira oposta, quanto maior a distância entre dois elementos, menor é o seu acoplamento. A Centralidade de Proximidade de um elemento é calculada pela expressão (já normalizada):

$$C_{Proximidade}(e_i) = \left[\frac{\Sigma^S d(e_i,e_j)}{S-1}\right]^{-1} \tag{4.3}$$

Onde

S é o número total de elementos do sistema (*S* > 2)

d() é a distância mínima entre dois elementos

No sistema representado na Figura 4.7 a medida de Proximidade (eq. 4.3) do elemento A é 1,143 enquanto que para o elemento C é 2,143. Neste caso, A é o elemento com maior acoplamento e C possui o menor.

A medida de Centralidade de Intermediação de um determinado elemento é definida pelo número de menores caminhos entre todos os pares de elementos do sistema que passam por ele (COHEN; HAVLIN, 2010). Assim quanto mais um elemento

aparece nos menores caminhos entre elementos do sistema, maior é o seu acoplamento. A Centralidade de Intermediação de um elemento é calculada pela expressão (já normalizada):

$$C_{Intermediação}(e) = \frac{\sum_{s \neq t \neq e} \frac{\sigma_{st}(e)}{\sigma_{st}}}{(S-1)(S-2)} \quad (4.4)$$

Onde

S é o número total de elementos do sistema (*S* > 2)

σ_{st} é o número de menores caminhos de *s* para *t*

$\sigma_{st}(e)$ é o número de menores caminhos de *s* para *t* em que *e* ocorre

No sistema representado na Figura 4.7 a medida de Centralidade de Intermediação do elemento A é 1 enquanto que para os elementos D, E e F é 0. Neste caso, A é o elemento com maior acoplamento e D, E e F possuem o menor.

Outras medidas de Centralidade podem ser utilizadas para avaliação do acoplamento entre elementos de um sistema. Entre elas está a medida de Centralidade de Katz (KATZ, 1953), Centralidade da Informação (STEPHENSON; ZELEN, 1989) e a Centralidade de Autovalor (LEWIS, 2009).

Allen e Khoshgoftaar (1999) propõem o uso da Teoria da Informação para a medida do acoplamento inter e intra-modular em arquiteturas de software. O acoplamento inter-modular consiste na avaliação das conexões entre módulos, enquanto que o acoplamento intra-modular avalia as conexões existentes entre os elementos de cada módulo. Nesta abordagem um módulo equivale a um subsistema. Caso o sistema possua um único módulo, as medidas de acoplamento inter e intra-modular se coincidem.

O cálculo do acoplamento parte da criação de uma tabela correlacionando os elementos dos módulos do sistema, sendo que a existência de conexão é assinalada com 1 e a inexistência com 0. A matriz contém um elemento adicional

referente ao ambiente externo ao sistema, mas que não é conectado com nenhum dos demais elementos.

O padrão formado por zeros e uns em cada linha é comparado com os demais da matriz. O número de vezes que cada padrão ocorre na matriz é então contabilizado e normalizado pelo total de elementos do sistema considerando o elemento adicional relativo ao ambiente. Os resultados são somados e a quantidade de informação calculada.

Considerando o sistema representado na Figura 4.7 pode-se gerar a matriz com o mapeamento das conexões entre elementos. A Figura 4.8 apresenta tal matriz. É importante observar que a última coluna da matriz contém o coeficiente $p_{L(i)}$ calculado a partir dos padrões de zeros surgidos em cada linha. No caso do elemento A o padrão "001001110" ocorre uma única vez na matriz e por isso o coeficiente $p_{L(A)}$ é 1/9 = 0,1111. Por outro lado, o padrão "000000000" ocorre duas vezes, uma em "Ambiente" e outra em C. Sendo assim os coeficientes $p_{L(Ambiente)}$ e $p_{L(C)}$ são 2/9 = 0,2222.

		Destino									
		Ambiente	A	B	C	D	E	F	G	H	$p_L(i)$
Origem	Ambiente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2222
	A	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0,1111
	B	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,1111
	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2222
	D	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0,1111
	E	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,1111
	F	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0,1111
	G	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,1111
	H	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0,1111

Figura 4.8 – Tabela de conexões do sistema apresentado na Figura 4.7

Com a tabela preenchida a quantidade de informação *H*(*S*) (entropia) na abordagem proposta por Allen e Khoshgoftaar (1999) pode ser então calculada.

$$H(S) = \sum_{i=0}^{n} \frac{-\log_2 p_L}{n+1} \qquad (4.5)$$

Assim *H*(*S*) = 2,94 bits.

Multiplicando *H*(*S*) (eq. 4.5) pelo número de elementos obtém-se o comprimento mínimo da descrição (*minimum description lenght*).

$$I(S) = (n+1)H(S) \; = \; \sum_{i=0}^{n}(-\log_2 p_{L(i)}) \qquad (4.6)$$

Neste caso *I*(*S*) = 26,46 bits. Este valor representa o total de informação na estrutura do sistema.

Em outra abordagem, Shereshevsky et al. (2005) propõe que para um par de elementos de um sistema o acoplamento entre eles é definido como a entropia do seu fluxo de informação. Neste caso a entropia é calculada por:

$$CPL_A(A,B) = -\sum_{x \in T_{A\to B}} P_{A\to B}(x) \log P_{A\to B}(x) \qquad (4.7)$$

Onde

$CPL_A(A,B)$ é o acoplamento de A para B

$T_{A\to B}$ representa o conjunto de todas as informações que podem ser passadas de A para B.

$P_{A\to B}$ é a distribuição de probabilidade que representa as frequências relativas das transmissões de A para B.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conceito de acoplamento aparece de maneira implícita ou explícita em diversos contextos associado a termos tais como “conexão”, “dependência”, “interação” e “ligação” (*link*, *tie*). O acoplamento afeta diretamente as principais características de um bom projeto de sistema que é sua modularidade. Nesse sentido, sistemas com alto acoplamento têm modularidade mais baixa enquanto que sistemas com baixo acoplamento têm modularidade mais alta. Na busca por sistemas modulares são utilizadas técnicas tais como *clustering*, particionamento e segregação. Estas técnicas visam o controle do acoplamento entre os elementos de um sistema.

A questão da terminologia estende-se também no que se refere a força com que o acoplamento ocorre. O acoplamento é denominado como baixo, fraco, relaxado (*loosely*). No sentido oposto as denominações usuais são alto, forte, apertado (*tight*). Tais termos expressam uma ideia qualitativa de acoplamento que, contudo podem ser quantificados por meio de medidas específicas. Não há uma forma padronizada para se medir o acoplamento. A medida adotada em cada situação depende das características do sistema que se quer avaliar. Medidas de distância e a Teoria da Informação são maneiras possíveis de se quantificar o acoplamento de um sistema conforme discutido na seção 4.4

Fenton e Melton (1990) consideram ambíguo esse tipo de definição por não deixar claro se o acoplamento está associado à interação entre pares de elementos de um sistema ou se trata de uma característica do sistema tomado no seu todo. Sobre esse aspecto Chidamber e Kemerer (1994) são mais específicos estabelecendo que dois elementos estão acoplados se e, somente se, pelo menos um deles atua sobre o outro. Neste caso, uma vez que existe interação, mesmo que ocorra só em um sentido, existe também acoplamento. Xia (2000), por sua vez, afirma que o acoplamento é a relação entre um elemento do sistema e os demais conectados a ele.

A medida do acoplamento utilizando a Teoria da Informação será discutida no Capítulo 7. A abordagem adotada, contudo será outra. Entende-se que a Teoria da Informação traz vantagens à medida do acoplamento por não depender de técnica específica para o projeto de sistemas. O foco na estrutura do sistema e não nas técnicas de desenvolvimento torna sua aplicação geral.

5 COMPLEXIDADE

O objetivo deste capítulo é apresentar o conceito de complexidade. Inicialmente a complexidade é abordada sob o ponto de vista do senso comum. Em seguida é discutida sua etimologia e apresentadas algumas definições. É feita também a diferenciação entre os conceitos de simples, complicado e complexo. São apresentadas características dos sistemas complexos e as abordagens que vem sendo adotadas no contexto da engenharia. Por fim, são apresentadas diferentes técnicas para se medir a complexidade de um sistema.

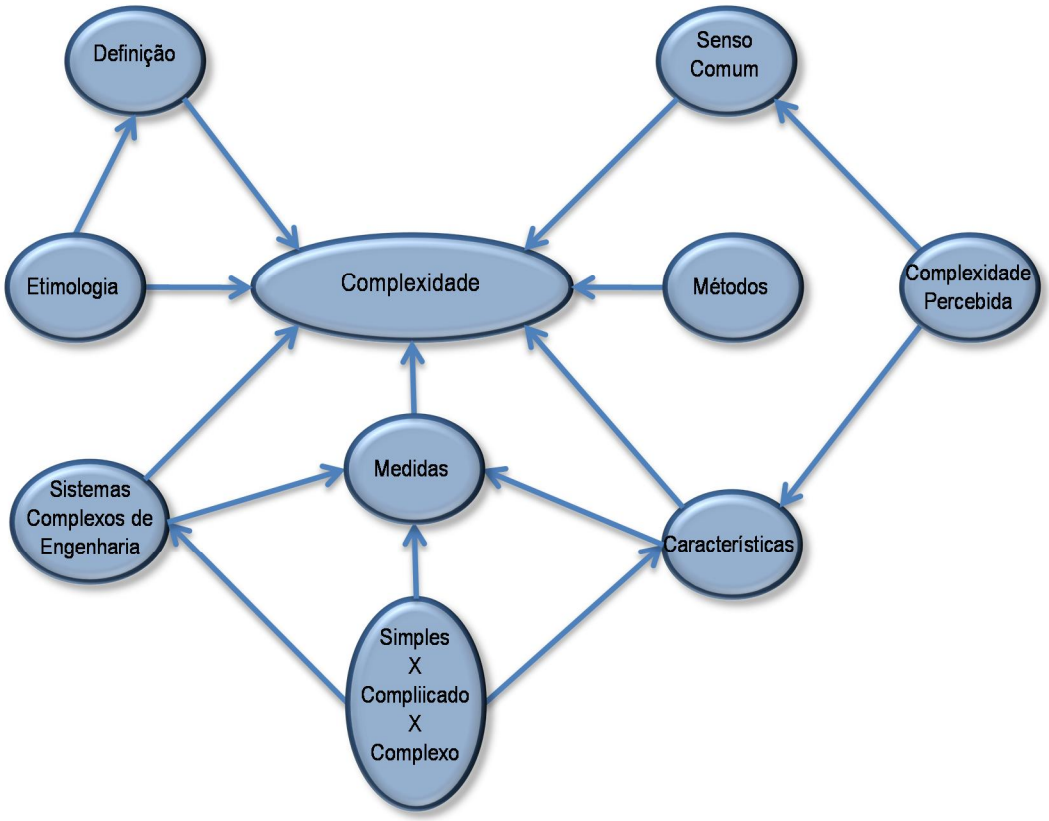


Figura 5.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 5

5.1 COMPLEXIDADE – SENSO COMUM

A maioria das pessoas não parece ter dúvida quando perguntadas se algo é complexo ou não. Em geral a resposta para tal questionamento baseia-se nos conhecimentos e experiências prévias das pessoas consultadas. Os termos "complexidade" e "complexo" são frequentemente utilizados para designar algo de difícil entendimento, explanação ou realização. Sob essa ótica a complexidade é algo que está associado à percepção do observador[13] e não às propriedades do objeto observado. Tais propriedades são na verdade interpretações da realidade assumidas pelo observador. Hebert Simon afirma que a complexidade pode ser associada à estrutura de um sistema, contudo pode também ser atrelada ao olhar daquele que o manipula (SIMON, 1976). Para John Casti determinar se algo é complexo ou não depende de como ele é visto, trata-se de um conceito subjetivo. (CASTI, 1995). Dessa forma, um mesmo objeto pode ser percebido de diferentes maneiras por diferentes observadores.

O prof. Leônidas Hegenberg admite que o termo complexidade seja vago e que assuntos considerados complexos tornam-se simples depois que são criados métodos adequados para tratá-los (HEGENBERG, 1974). Biggiero (2001) por sua vez afirma que um objeto é mais ou menos complexo dependendo da ignorância (quantidade de informação) que se tem sobre ele. Tal visão traz em si o pressuposto de que a complexidade é algo transitório. Uma vez eliminada a ignorância sobre determinado objeto este passa a ser considerado simples. Dessa maneira, o objeto observado, gerador de um estímulo, permanece inalterado. O que se modifica é a percepção sobre ele na medida em que vai se tornando mais familiar ao observador.

A complexidade tanto pela ótica da dependência do observador quanto da sua transitoriedade é denominada por Rouse (2003) e Shlindwein e Ison (2004) de Complexidade Percebida e por Suh (2005) de Complexidade Imaginária.

---

[13] O termo "observador" é utilizado neste texto no sentido de quem ou algo que observa, mas também interage e manipula o objeto observado.

5.2 COMPLEXIDADE – ETIMOLOGIA E CONCEITUAÇÃO

A complexidade não é algo novo, contudo o seu reconhecimento pela ciência é recente (VASCONCELLOS, 2003, p. 104). O conceito que subjaz ao termo complexidade tem sido explorado em diversas áreas com diferentes interpretações (MITCHELL, 2009). Sobre isso Murray Gell-Man[14] afirma que qualquer definição de complexidade depende do contexto (GELL-MANN, 1995).

Quanto à sua origem, a etimologia da palavra "complexo" pode ser reconstruída até se chegar a palavra grega "σύνθετος"[15] (BABYLON DICTIONARY, 2011). No Latim a composição das palavras *complectus* (enlaçar, estreitar) e *plici* (dobrar, redobrar) dá origem à *complexo*, ou seja, algo que engloba as dobras (HEYLIGHEN, 1988; UNIVERSITY OF NOTRE DAME, 2011). A palavra *complexo* também significa, de maneira figurada, o ato de compreender certo número de coisas diferentes, número este que pode ser pequeno ou grande (MARIOTTI, 2002). Implica na multidisciplinaridade necessária para se compreender um determinado ente, ou conjunto deles (BINDÉ, 2003).

Os dicionários Longman (LONGMAN, 2005) e Aurélio (FERREIRA, 2010) associam a palavra "complexo" a algo que possui muitos elementos ou partes. Já o American Heritage Dictionary (AMERICAN HERITAGE DICTIONARIES, 2006) acrescenta a ideia de que os elementos e partes encontram-se interligados. Heylighen, Ciliers e Gershenson por sua vez, sintetizam tais definições afirmando que para se considerar algo complexo é necessário ter (HEYLIGHEN; CILIERS; GERSHENSON, 2006):

- Dois ou mais elementos ou partes.
- Os elementos precisam estar conectados de alguma forma, tornando difícil separá-los.

[14] Murray Gell-Man é professor emérito da CalTech e foi prêmio Nobel de Física em 1969.
[15] Lê-se *synthetos*.

Para Dörner[16] (1996) a Complexidade é um rótulo que se dá à existência de muitas variáveis interdependentes em um dado objeto sob observação, sendo que quanto mais variáveis interdependentes, maior a complexidade do objeto. Humberto Mariotti destaca a questão da interdependência, afirmando que o que é importante não são os elementos em si, mas as maneiras como eles se relacionam (MARIOTTI, 2002).

Charles Perrow afirma que sistemas não são lineares ou complexos, somente a interação entre os seus elementos o são. Interações complexas são aquelas que ocorrem em função de sequências inesperadas ou não familiares no funcionamento de um sistema. Além disso, não são visíveis ou compreendidas de maneira imediata. As interações lineares são o oposto das interações complexas. Neste caso, ainda que ocorram interações inesperadas ou não familiares estas são evidentes. Mesmo em sistemas cujos elementos interagem de maneira linear existe ao menos uma fonte de interação complexa, o ambiente (PERROW, 1999).

A complexidade é também associada à dificuldade de se descrever um sistema ou, de outra maneira, ao tamanho da sua descrição. Uma forma de se ilustrar este conceito é considerar um sistema composto por um número qualquer de elementos. Na Figura 5.2(a) os elementos do sistema não estão conectados, enquanto que em (f) todas as conexões possíveis estão presentes. De maneira intuitiva pode-se dizer que (a) é o padrão mais simples enquanto (f) é o mais complexo. Gell-Mann (1995) argumenta, contudo que (a) e (f) são semelhantes em termos da sua complexidade. Baseando-se no conceito relativo ao tamanho da descrição do sistema, enquanto (a) pode ser descrito como “nenhuma conexão”, (b) pode ser descrito como “todas as conexões”. Dessa maneira as descrições são semelhantes. Entretanto nos demais padrões representados em (b), (c), (d) e (e) o tamanho da descrição necessária é maior. Sendo assim, tais padrões são considerados mais complexos do que (a) e (f). Este tipo de complexidade foi denominada por Gell-Mann de Complexidade Rudimentar.

[16] Dietrich Dörner é professor de Psicologia da Universidade de Bamberg – Alemanha.

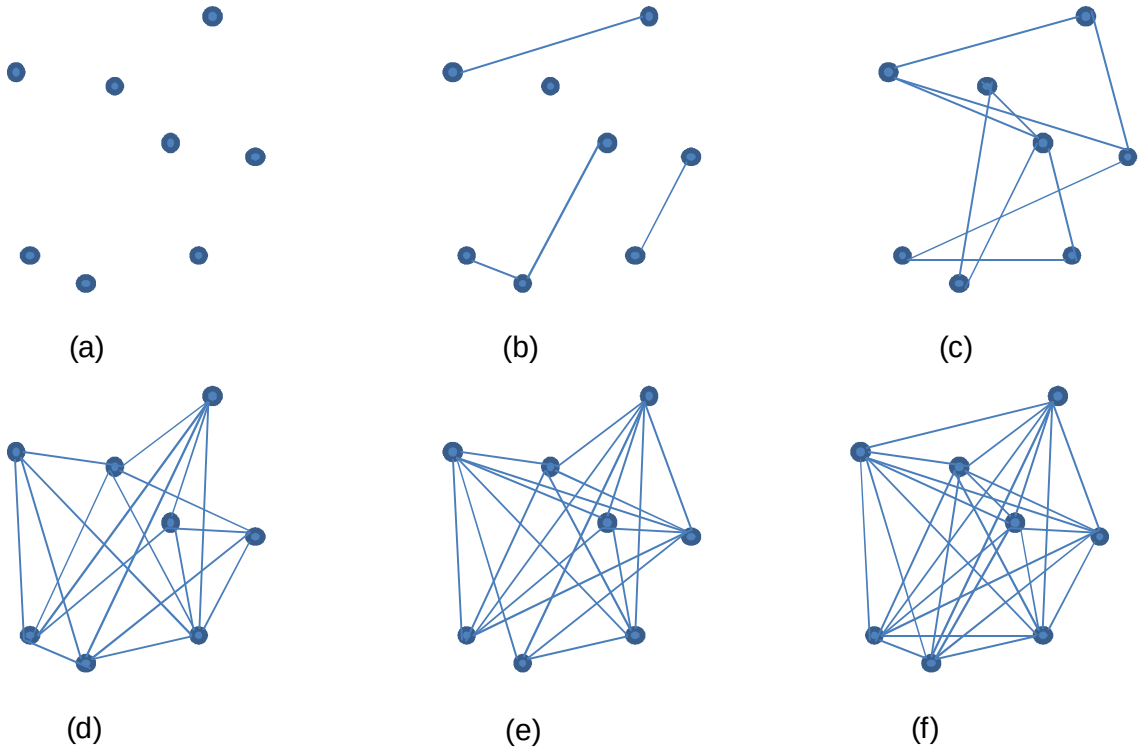


Figura 5.2 – Padrões de conexões entre elementos de um sistema (GELL-MANN, 1995)

Por essa abordagem padrões que se complementam possuem complexidade semelhante. Uma forma de se descrever o padrão representado em (f) é “complemento de nenhuma conexão”, ou ainda “complemento de (a)” o que resulta em “todas as conexões”. Tal situação ocorre também com os padrões representados em (c) e (d). O padrão representado em (c) é o complemento de (d). Assim (c) e (d) possuem complexidade semelhante.

Uma extensão do conceito de Complexidade Rudimentar é a Complexidade Algorítmica. Neste caso a complexidade é associada ao tamanho do menor programa de computador capaz de gerar um determinado objeto. Assim, considerando que o objeto de interesse seja a *string* “01010101010101010101” um programa de computador capaz de gerar tal sequência é “imprima ‘01’ dez vezes”. Por outro lado, se a sequência em questão fosse “10110111101001100010” não é possível adotar abordagem semelhante à primeira. O programa gerador desta sequência necessita de um conjunto de instruções do tamanho da própria *string*. Neste caso, quanto maior a ausência de padrões maior a complexidade.

A existência de padrões oriundos da forma com que os elementos de um sistema estão conectados remete ao conceito de Complexidade Estrutural (LINDEMANN; MAURER; BRAUN, 2009). Tais conexões entre os elementos podem variar em termos do tipo e força (ver Capítulo 4). Diferentes padrões de conexão levam a níveis de complexidade também diferentes. A Complexidade Estrutural é importante, pois é por meio das conexões entre os elementos do sistema que ocorrem as interações e a propagação de informações.

Muitos outros conceitos relativos à complexidade podem ser encontrados na literatura. Capra (1996), por exemplo, apresenta um sumário sobre os principais conceitos relativos à complexidade vistos a partir da Teoria de Sistemas. Sussman (2000a; 2002) apresenta 20 diferentes abordagens para a complexidade, cada uma delas adaptadas a um contexto específico. Neil Johnson aborda de maneira introdutória os principais conceitos relativos à complexidade sem recorrer à formalismos (JOHNSON, 2007). Érdi (2008) faz um histórico da pesquisa realizada no campo dos sistemas complexos. Mitchell (2009) apresenta uma explanação abrangente sobre as diferentes abordagens da complexidade bem como um retrospecto da evolução do conceito.

Ainda que tais ponderações abordem alguns aspectos fundamentais do que se entende por Complexidade, elas não são precisas. A próxima seção apresenta novas informações fazendo uma análise comparativa entre os conceitos relacionados a algo simples, complicado e complexo.

5.3 O SIMPLES, O COMPLICADO E O COMPLEXO

Complexidade e simplicidade são conceitos opostos, porém não disjuntos. Para Gell-Mann simplicidade se refere à “[...] ausência (ou quase ausência) de complexidade” (GELL-MANN, 1996, pag. 44). A fronteira onde termina a complexidade e começa a simplicidade não é algo fácil de determinar (KLUGER,

2008). De maneira paradoxal, em algumas situações, a simplicidade surge em função da complexidade. O estudo dos sistemas complexos foca no entendimento das relações entre simplicidade e complexidade. Isso requer compreensão de que comportamentos complexos emergem de elementos e regras simples (BAR-YAM, 1997; CASTI, 1995). John Maeda considera "[...] complexidade e simplicidade como tendo importância relativa uma para com outra na condição de rivais necessárias" (MAEDA, 2007, pag. V).

No caso de uma aeronave, por exemplo, a diminuição da carga de trabalho dos pilotos pela simplificação dos seus procedimentos de operação, implica no aumento das funções e responsabilidades desempenhadas pelos sistemas embarcados. O número de funções realizadas por uma aeronave moderna é muito maior que as construídas 20 anos atrás. Por outro lado a carga de trabalho dos pilotos na operação das aeronaves atuais é também muito menor comparada com aeronaves mais antigas.

Complexidade e simplicidade são algumas vezes comparadas em termos de quantidades. Para Amaral e Ottino (2004) sistemas simples possuem pequeno número de elementos e suas leis de funcionamento são bem conhecidas, enquanto que os sistemas complicados possuem grande número de elementos. Os papéis desses elementos encontram-se bem definidos e seu funcionamento é regido por regras bem entendidas. Nos sistemas complexos seus elementos reagem de acordo com leis que podem mudar ao longo do tempo. As regras de funcionamento, contudo, podem não ser bem entendidas.

A complexidade definida em termos do número de elementos do sistema pode ser questionada. É possível que poucos elementos gerem comportamentos complexos. No Jogo da Cerveja, criado por Jay Forrester nos anos 60, é simulado o comportamento de uma cadeia simplificada de produção e distribuição de cerveja. Tal cadeia é constituída por uma fábrica, um distribuidor, um atacadista e um varejista. Mesmo tendo somente 4 elementos interagindo os comportamentos gerados durante o jogo são complexos (STERMAN, 2000; SENGE, 2006).

No campo das normas a RTCA DO-254 é bem conhecida no contexto aeronáutico por ser um meio de demonstração de cumprimento de requisitos para o desenvolvimento de hardware eletrônico de uso embarcado em aeronaves. O rigor do desenvolvimento requerido pela norma é estabelecido em função da contribuição do hardware para falhas do sistema e sua complexidade. No primeiro caso, quanto maior a consequência da falha para a qual um determinado sistema contribui maior o rigor requerido. Quanto ao segundo aspecto, hardware simples tem rigor de desenvolvimento menor enquanto que hardware complexo tem rigor maior. Para a DO-254 um sistema é considerado simples se é possível criar testes determinísticos para todas as possíveis condições de operação do equipamento. Caso isso não seja possível então o hardware é considerado complexo (RADIO TECHNICAL COMISSION FOR AERONAUTICS, 2000).

Já a norma SAE ARP4754 utilizada em projeto de sistemas aeronáuticos considerados altamente integrados e complexos define que a Complexidade é um atributo dos sistemas ou seus elementos que torna sua operação de difícil compreensão. Um fator que contribui para o aumento da Complexidade dos sistemas é o grau de sofisticação de seus elementos constituintes e a ocorrência de inter-relacionamentos múltiplos (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996).

Warren Weaver, um dos precursores da Cibernética, classificou a complexidade de três maneiras: Simplicidade Organizada, Complexidade Organizada e Complexidade Desorganizada (WEAVER, 1948). A Simplicidade Organizada é característica de sistemas com pequeno número de elementos que interagem de maneira determinística e podem ser modelados por técnicas reducionistas, cartesianas. A Complexidade Desorganizada está associada a problemas que envolvem um número grande de variáveis e que cada variável tem comportamento próprio. Apesar disso, o sistema quando analisado no seu todo apresenta características que podem ser modeladas por meio de ferramentas como a probabilidade e a estatística. Tais ferramentas apresentam, contudo limitações quando o fenômeno em questão está relacionado à modelagem da evolução de um determinado organismo, internet, comportamento do mercado financeiro ou mudanças climáticas no mundo. Estes sistemas, conhecidos como sistemas complexos adaptativos, estão em contínua

modificação em função de estímulos recebidos. Os fenômenos dessa natureza estão associados ao conceito de Complexidade Organizada.

Peter Senge define dois tipos básicos de complexidade: complexidade de detalhes e complexidade dinâmica. A complexidade de detalhes está associada a sistemas cuja relação de causa e efeito entre suas variáveis é evidente ou passível de ser determinada. Na complexidade dinâmica as relações de causa efeito são sutis, nem sempre evidentes, sendo que intervenções no sistema provocam, ao longo do tempo, consequências não obvias (SENGE, 2006).

Para Snowden (2003), Minai, Braha e Bar-Yam (2006) um sistema complicado pode possuir grande quantidade de elementos, contudo, tais elementos e as relações entre estes são passíveis de identificação e definição e podem ser catalogados.

Stacey (1993) na área da Teoria das Organizações também fez distinção entre o complicado e o complexo. Dois parâmetros principais são utilizados como referência: nível de concordância existente sobre um determinado assunto e nível de certeza que se tem sobre esse mesmo assunto. Quando é possível se obter acordo sobre o assunto em questão e seu entendimento não dá margem a incertezas, diz-se então que se trabalha em uma região em que se caracteriza pela simplicidade. No extremo oposto, quando não há concordância sobre o assunto e o nível de incerteza sobre o mesmo é elevado, diz-se que se trabalha em uma região de anarquia ou caos. As situações onde se está longe de um acordo, mas próximo da certeza e longe da certeza, mas próximo de um acordo são consideradas regiões onde se trabalha em assuntos complicados. A complexidade surge entre o complicado e o caos. A Figura 5.3 ilustra o que é conhecido como Matriz de Stacey.

Tendo como referência as diferentes abordagens apresentadas é possível estabelecer uma correspondência entre o conceito de complicado e a Complexidade Desorganizada de Weaver. Os sistemas em que ocorre a Complexidade Desorganizada apresentam comportamentos emergentes predominantemente do tipo nominal[17]. Seus elementos são projetados para interagir de maneira a produzir

[17] Ver Capítulo 2 para a definição dos tipos de Emergência.

resultados semelhantes mediante os mesmos estímulos. Contudo, devido ao número de elementos envolvidos ou o tipo de interação entre os elementos é difícil determinar todos os comportamentos possíveis que podem surgir. Já os sistemas em que ocorre a Complexidade Organizada apresentam predominância de comportamentos emergentes do tipo fraco. O comportamento observado no seu todo não é possível de ser deduzido a partir de suas partes tomadas em separado.

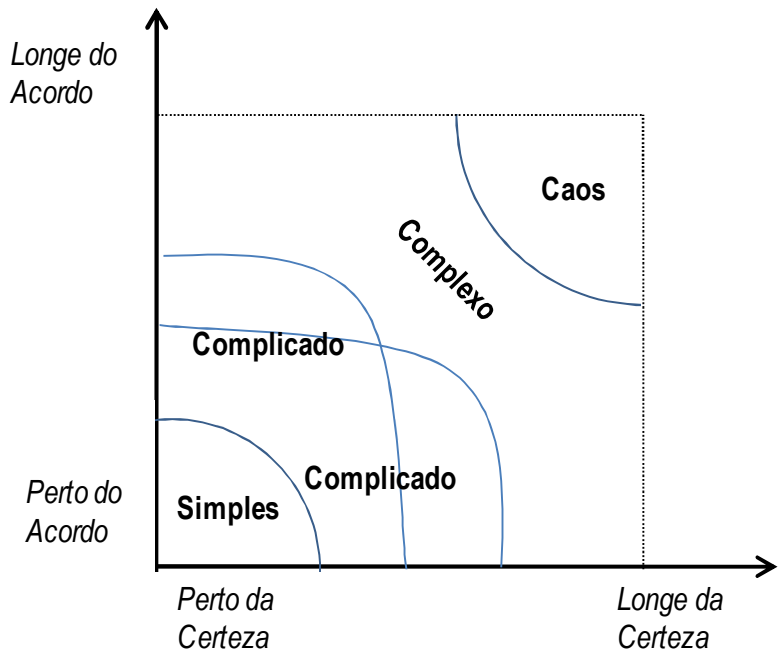


Figura 5.3 – Matriz de Stacey (adaptado de STACEY (1993))

Outros autores também discutem as diferenças entre o que vem a ser um sistema simples, complexo ou complicado (KEMENY, 1955; PROCACCIA, 1988; CILLIERS, 1998; KURTZ; SNOWDEN, 2003; PRICE, 2004; HAYENGA, 2008; SCHWANINGER, 2009). O fato é que no estágio atual dos estudos sobre complexidade não há um conceito capaz de unificar todas as abordagens adotadas nas diversas áreas do conhecimento. Segundo Gell-Mann (1996) pode haver a necessidade de se definir diversos tipos de complexidade, sendo que alguns destes podem não ter sido concebidos ainda.

5.4 TÉCNICAS DA COMPLEXIDADE

Sistemas simples, complicados e complexos exigem técnicas específicas, bem como conhecimentos que sejam suficientes e permitam o entendimento de toda a sua dimensão. A solução de problemas envolvendo sistemas simples é feita tipicamente por técnicas reducionistas (WEAVER, 1948). O princípio básico consiste na decomposição do problema em partes menores até que cada uma delas possa ser resolvida de maneira isolada (DESCARTES, 2006).

No caso dos sistemas complicados ou com Complexidade Desorganizada é possível realizar a decomposição de um sistema em partes menores a fim de melhor entendê-lo, contudo existem características importantes do sistema que só podem ser observadas considerando-o no todo. A solução de problemas dessa natureza envolve a combinação tanto de técnicas reducionistas como estatísticas (WEINBERG, 1975).

Já com relação aos sistemas complexos ou com Complexidade Organizada existem dificuldades básicas em função da falta de uma terminologia uniforme e conceitos de consenso. As técnicas utilizadas em sistemas complexos têm forte influência da Teoria da Informação (SHANNON; WEAVER, 1963), Cibernética (ASHBY, 1970), Teoria do Caos (GLEICK, 1990), adaptação, evolução (KAUFFMAN, 1993), Sistemas Dinâmicos (STERMAN, 2000), emergência (BRAHA; MINAI; BAR-YAM, 2006), fractais (NUSSENVEIG, 2008), redes (NEWMAN, 2010) entre outras áreas. A Complexidade Organizada carece, contudo, de técnicas específicas. Algumas iniciativas no campo da engenharia têm sido propostas como é o caso da engenharia evolutiva (BAR-YAM, 2006), e a engenharia emergente (ULIERU; DOURSAT, 2011).

Os sistemas simples exigem um tipo de conhecimento que pode ser chamado de disciplinar. Neste caso, o domínio de uma ou poucas disciplinas é suficiente para a resolução de problemas. Segundo Edgar Morin (2005) uma disciplina pode ser

definida como uma categoria que organiza o conhecimento científico e que institui nesse conhecimento a divisão e especialização do trabalho.

Os sistemas que apresentam Complexidade Desorganizada exigem maior esforço intelectual. A solução de problemas neste contexto requer o envolvimento de várias disciplinas. Em geral, tais disciplinas são independentes umas das outras. Bindé (2003) chama este tipo de conhecimento multidisciplinar. Nicolescu (1999), por sua vez, sugere que é necessário que as disciplinas não sejam utilizadas independentemente, mas que haja a transferência de técnicas de uma disciplina para outra. Este tipo de conhecimento é chamado de Interdisciplinar (KLEIN, 2004; MORIN, 2005).

Os sistemas complexos exigem outro tipo de conhecimento denominado transdisciplinar (LERBET, 2004). A transdisciplinaridade propõe uma abertura em termos dos limites impostos na estrutura disciplinar existente na atualidade. É a procura de soluções envolvendo um conjunto de saberes onde não distingue as fronteiras da tradicional segmentação das áreas de conhecimento do Homem (MORIN, 2005). Diz respeito àquilo que está ao mesmo tempo entre as disciplinas, através das disciplinas e além de qualquer disciplina (NICOLESCU, 1999).

A Tabela 5-1 apresenta um sumário sobre as diferentes visões sobre sistemas simples, complicados e complexos tomando como referência a abordagem proposta por Weaver (1948). A Tabela 5-1 sintetiza o conteúdo das seções 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1 – Características de sistemas simples, complicados e complexos

Weaver (1948)	Senge (1990)	Snowden (2003)	Amaral (2004)	Braha, Minai, Bar-Yam (2006)	Técnicas	Emer-gência	Tipo de Conhecimento
Simplicidade Organizada	Simples	-	Simples	-	Reducionista	Nominal	Disciplinar
Complexidade Desorganizada	Complexidade de Detalhes	Complicado	Complicado	Complicado	Reducionista e Estatísticos		Multidisciplinar e Interdisciplinar
Complexidade Organizada	Complexidade Dinâmica	Complexo	Complexo	Complexo	Estatísticos e específicos	Fraca	Transdisciplinar

5.5 CARACTERÍSTICAS DA COMPLEXIDADE

Atualmente é difícil propor uma definição de consenso ou abordagem única para a complexidade. Os conceitos associados à complexidade são dependentes do contexto (GELL_MAN, 1996) em que são aplicados e muitas vezes subjetivos (CASTI, 2002). Contudo é possível relacionar as principais características atribuídas à complexidade e identificar aspectos comuns a elas.

Edgar Morin destaca, por exemplo, que sistema complexos caracterizam-se pela existência de comportamentos emergentes que se manifestam em decorrência da forma com que os elementos do sistema estão organizados (MORIN, 1990). Heylighen (1988) considera que um sistema complexo possui dois ou mais elementos que estão conectados e interagem entre si. O comportamento deste sistema não é previsível e sua evolução não é controlada. Simon (1996) destaca também a questão da incerteza quanto a previsões em sistemas complexos, usando como exemplo fatores diversos que influenciam a economia de um país. O autor menciona outras características presentes em sistemas complexos tais como a capacidade de adaptação, evolução e a presença de estruturas hierárquicas das quais surgem comportamentos emergentes. Para Wu (1999) sistemas complexos apresentam as seguintes características:

- Possuem grande número de elementos em interação.
- São sistemas abertos, ou seja, interagem com o ambiente.
- As interações são não lineares e possuem ciclos de realimentação.
- Possuem auto-organização.
- Apresentam comportamentos emergentes.

John Casti propõe que sistemas complexos possuem 4 características básicas (CASTI, 2002):

- Instabilidade – no sentido que os sistemas complexos tende a ter muitos modos possíveis de comportamento.
- Irredutibilidade – sistemas complexos formam um todo que não pode ser separado sem a perda de suas características fundamentais.

- Adaptabilidade – sistemas complexos são formados, em geral, por agentes inteligentes que ajustam seu comportamento em função das informações que recebem.
- Emergência – apresentam comportamentos que não pode ser previsto a partir da análise dos comportamentos de seus elementos de maneira isolada.

Normam e Kuras sugerem que um sistema é considerado complexo se atende os seguintes critérios (NORMAN; KURAS, 2006):

- Sua estrutura e comportamento não são dedutíveis, nem podem ser inferidas, a partir da estrutura e comportamento de seus elementos constituintes (emergência).
- Seus elementos podem mudar em resposta a pressões impostas a partir de elementos vizinhos (auto-organização).
- Possui um grande número de arranjos coerentes de seus elementos.
- Continuamente aumenta sua complexidade dado receber um fluxo de energia (evolução).
- Caracteriza-se pela presença de agentes independentes de mudança (adaptação).

Moysés Nussenzveig afirma que o cérebro humano talvez seja o sistema mais complexo conhecido. A partir deste define um conjunto de características encontradas em maior ou menor grau em outros sistemas complexos. As principais características relacionadas são (NUSSENZVEIG, 2008):

- Encontram-se em constante evolução.
- São sistemas abertos.
- A interação entre seus elementos ocorre de maneira não linear.
- São adaptativos.
- Possuem auto-organização.
- Apresentam comportamentos emergentes.
- Possuem estrutura hierárquica.

Na visão Charles Perrow os sistemas complexos apresentam as seguintes características principais (PERROW, 1999):

- Proximidade – no sentido que os elementos do sistema estão fisicamente próximos uns dos outros.
- Conexões de modo comum – determinados elementos funcionam como *hubs*, estabelecendo conexões comuns.
- Não linearidades – não existe a necessidade de que os elementos do sistema sejam executados em sequência.
- Subsistemas interconectados – os elementos do sistema, ou subsistemas, estão conectados segundo uma determinada arquitetura que torna difícil o seu isolamento.
- Substituições limitadas – dadas as características dos elementos do sistema torna-se difícil substituí-los.
- Ciclo de realimentação – As sequências de execução do sistema possuem realimentações. Tais realimentações podem ocorrer de maneira não planejada.

Donna Rodhes[18] destaca como características dos sistemas complexos a auto-organização com controle descentralizado, comportamento emergente e adaptação (MITRE, 2005).

As características dos sistemas complexos apresentadas em cada uma das diferentes abordagens encontram-se sumarizadas na Tabela 5-2. Ao todo foram identificadas 14 características principais, sendo que Emergência, Auto-Organização e Adaptação são as que aparecem com maior frequência. É importante observar que tais características não constituem uma lista completa, porém são representativas das principais abordagens adotadas para o assunto. Autores como Kohl (1965); Pagels (1988), Lewin (1993), Prigogine (1996; 2002), Cilliers (2000), Miller e Page (2007) também discutem o assunto identificando características dos sistemas complexos sem, contudo acrescentar novos elementos à lista já apresentada.

[18] Donna Rodhes é a principal pesquisadora em engenharia do *Center for Technology, Policy, & Industrial Development* do *Massassuchets Institute of Technology* (MIT).

Tabela 5.2 – Principais características dos sistemas complexos

Características / Abordagens	Heylighen (1988)	Morin (1990)	Simon (1996)	Wu (1999)	Perrow (1999)	Casti (2002)	Donna Rhodes (MITRE, 2005)	Normam e Kuras (2006)	Honour (2006)	Nussenzveig (2008)
Emergência		X	X	X		X	X	X	X	X
Adaptabilidade			X			X	X	X	X	X
Incerteza	X		X							
Irredutibilidade						X				
Auto-Organização		X		X			X	X		X
Instabilidade						X				
Sistemas abertos				X						X
Ciclos de realimentação				X	X			X	X	
Não linearidades				X	X					X
Proximidade					X					
Conexões de modo comum					X					
Substituições limitadas					X					
Evolução	X		X					X		X
Estrutura hierárquica			X							X

5.6 SISTEMAS COMPLEXOS DE ENGENHARIA

Os sistemas podem ser classificados em dois grandes grupos. O primeiro refere-se aos sistemas naturais. O sistema solar, o ciclo das chuvas, a floresta amazônica, um formigueiro, os biomas em geral constituem-se em exemplos deste tipo de sistema. O segundo grupo diz respeito aos sistemas construídos ou modificados pelo Homem. Estão incluídos neste grupo sistemas de geração de energia hidrelétrica, navios, aeronaves e sistemas de controle de tráfego aéreo. Outros sistemas de natureza virtual, sociais e de processos como a internet, as cidades e as bolsas de valores também são exemplos de sistemas construídos pelo Homem. Os sistemas de engenharia fazem parte deste segundo grupo.

A engenharia pode ser definida como a aplicação de conhecimentos em matemática e ciências básicas, adquiridos por meio de estudo, experimentação e prática, no sentido de desenvolver meios para utilizar, de maneira econômica, materiais e forças da natureza em benefício da humanidade (ACCREDITATION BOARD FOR ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2005). Leonhardt (2011) complementa que a engenharia trabalha também com a criação e desenvolvimento de novos materiais, estruturas, máquinas, processos e sistemas. A criação e desenvolvimento de sistemas de engenharia seguem, por sua vez, etapas bem definidas que consistem na concepção, projeto e realização de um determinado processo e/ou produto.

A complexidade é uma propriedade sistêmica que surge em decorrência das características do ente em questão (ROSEN, 1986). As características que tornam um sistema complexo são diversas e é difícil encontrar consenso sobre elas. A Tabela 5.2 relaciona 14 características citadas em grande parte dos textos que versam sobre sistemas complexos. Essas características podem ser associadas à Complexidade de Detalhes e Dinâmica no sentido proposto por Weaver (1948). Contudo é importante observar que algumas dessas características podem surgir em ambos os tipos de complexidade. A Emergência, por exemplo, ocorre tanto no contexto da Complexidade de Detalhes quanto na Dinâmica. No primeiro caso predomina a Emergência Nominal e no segundo a Emergência Fraca.

Dentre as abordagens apresentadas na Tabela 5.2 Perrow (1999), Rhodes (MITRE, 2005), Norman e Kuras (2006) usam como pano de fundo os sistemas de engenharia para definir as características dos sistemas complexos. A partir de tais características é possível correlacioná-las com o tipo de complexidade utilizada. A Tabela 5.3 sumariza esses elementos destacando características que são típicas de sistemas com Complexidade Organizada e Desorganizada. A faixa central, delimitada pelas linhas tracejadas, corresponde àquelas características que podem ocorrer ambos os tipos de complexidade.

Tabela 5.3 – Características da complexidade em sistemas de engenharia

Weaver (1948)	Características	Perrow (1999)	Donna Rhodes (MITRE, 2005)	Normam e Kuras (2006)
Complexidade Organizada	Auto-Organização		X	X
	Adaptabilidade		X	X
	Sistemas abertos			X
	Irredutibilidade			
	Incerteza			
	Emergência		X	X
	Ciclos de realimentação	X		
	Não linearidades	X		
	Instabilidade			
Complexidade Desorganizada	Proximidade	X		
	Conexões de modo comum	X		
	Substituições limitadas	X		

Outros autores também têm se dedicado a compreender as implicações da complexidade na engenharia. Suh (2005) define, por exemplo, que a complexidade é uma medida da incerteza em compreender o que se quer conhecer ou realizar em termos do conjunto de requisitos funcionais que definem um sistema. Nesse sentido,

Suh identifica quatro tipos de complexidade: real, imaginária, combinatórica e periódica.

A complexidade real está relacionada à medida da dificuldade em se realizar uma determinada tarefa. Tal complexidade está associada à quantidade de informação no sistema. Quanto maior a quantidade de informação do sistema maior é a sua complexidade. A complexidade imaginária corresponde à complexidade percebida. Ela surge em função da falta de conhecimento sobre o projeto de um sistema, arquitetura e/ou seu comportamento. A complexidade combinatórica ocorre quando algumas das características do sistema se alteram com o tempo. Suh fornece um exemplo onde um sistema programação de viagens precisa ser ajustado em função do cancelamento de pousos e decolagens por causa de condições climáticas. A complexidade periódica tende a crescer com o tempo, contudo pode ser eliminada colocando o sistema em seu estado inicial. Um exemplo simples desse tipo de complexidade é a organização de dados em um disco rígido. Na medida em passa a ter arquivos gravados e apagados, os setores do disco ficam fragmentados aumentando a complexidade das tabelas de endereçamento. Tal situação pode ser resolvida com uma desfragmentação do disco.

Braha, Minai e Bar-Yam (2006, p. 3) apontam a auto-organização como sendo as característica mais importante compartilhada entre os sistemas complexos (Complexidade Organizada). Tal característica é comum nos sistemas naturais, contudo é difícil encontrá-las nos sistemas de engenharia. Dessa maneira os artefatos produzidos por meio de processos de engenharia são considerados complicados, ou seja, possuem Complexidade Desorganizada.

Snowden (2003) analisa o caso de uma aeronave com relação à complexidade e conclui que

> Uma aeronave é um sistema complicado. [...] Se necessário, a aeronave pode ser desmontada para que seja mais bem explorada a natureza de seus componentes e suas relações. Causa e efeito podem ser separados e, pela compreensão de suas ligações, é possível controlar os resultados. O sistema

> pode ser melhorado pela otimização de suas partes, uma vez que o todo não é mais nem menos que a soma delas.

Considerando ainda uma aeronave como o ente de interesse e analisando-a tendo como referência as características de complexidade identificadas na Tabela 5.3, chega-se a uma conclusão similar a de Snowden. No caso as características principais que caracterizam a Complexidade Organizada não são atendidas. As demais características, as quais são atendidas, apontam para a Complexidade Desorganizada. A análise das características da complexidade encontra-se sumarizada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Complexidade de uma aeronave

Características da complexidade	Análise
Auto-Organização	**Não Atende**: A arquitetura de uma aeronave segue regras rígidas, havendo pouca possibilidade para variações de configurações em seus sistemas, contudo não se auto-organiza em função de seus estímulos.
Adaptabilidade	**Não Atende**: Algumas aeronaves militares e o programa especial americano já utilizam sistemas adaptativos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2010). Contudo, apesar de alguns estudos considerarem sua aplicação em aeronaves civis (RUSHBY,2009), tal abordagem ainda não é aceita pelas autoridades aeronáuticas.
Sistemas abertos	**Não atende**: Apesar de uma aeronave interagir com o ambiente por meio de seus sensores ele não pode ser considerado um sistema aberto.
Emergência	**Atende**: Uma aeronave é desenvolvida para funcionar conforme seu projeto. Sendo assim apresenta comportamento emergente nominal.
Ciclos de realimentação	**Atende**: Os processos que são executados durante a operação de uma aeronave possuem ciclos de realimentação. Exemplo clássico são suas leis de controle.
Não linearidades	**Atende**: As atuais arquiteturas integradas de sistemas permitem o surgimento de interações em sequências não lineares.

Tabela 5.5 – Complexidade de uma aeronave (Cont.)

Características da complexidade	Análise
Proximidade	**Atende**: Os sistemas são montados em regiões específicas da aeronave. No caso das arquiteturas integradas as antigas caixas de sistemas deram lugar à placas eletrônicas que são montadas em *racks*.
Conexões de modo comum	**Atende**: As arquiteturas integradas possuem elementos que servem como *hubs* na comunicação com outros elementos de sistemas.

Por outro lado, Braha, Minai e Bar-Yam (2006) admitem que a auto-organização surge em processos de criação, como ocorre nos projetos de engenharia. Bar-Yam afirma que em sistemas complexos de engenharia não há um produto em si. O que é considerado complexo, no sentido da Complexidade Organizada, são os ambientes ou processos por meio dos quais o sistema surge e continua sendo melhorado (MITRE, 2005).

Um sistema complicado torna-se parte de um sistema complexo quando considerado seu processo de desenvolvimento e quando inserido em um contexto de operação. Este tipo de situação ocorre no caso dos sistemas de sistemas. Os sistemas de sistemas podem ser considerados complexos uma vez que seus elementos, ou sistemas, evoluem de maneira independente dos demais. Não há um elemento centralizador de controle e o todo se ajusta em função de modificações em seus elementos. Tais sistemas apresentam comportamento que corresponde à emergência fraca.

O sistema de transporte aéreo pode ser considerado como um exemplo de sistema de sistemas. Os sistemas aeroporto, aeronave, controle de tráfego aéreo, sistemas de venda de passagem, fabricantes e oficinas de manutenção de aeronaves, entre outros possuem capacidade de evoluir de maneira independente dos demais, contudo o todo se ajusta para acomodar cada um de seus elementos.

Pode-se ainda considerar a questão da Complexidade Percebida. Suas implicações na engenharia são importantes principalmente no que se refere a fatores humanos, processos de desenvolvimento e operação de sistemas. Em especial, no que se refere à engenharia aeronáutica o assunto tem sido abordado no contexto de controle de tráfego aéreo (PAWLAK et al., 1996; MASALONIS et al., 2003) e manutenção de aeronaves (CIVIL AVIATION AUTHORITY, 2003).

5.7 ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPLEXOS

Assim como a compreensão dos sistemas complexos é algo recente a engenharia de sistemas complexos também o é. Nota-se um crescente interesse sobre o assunto, contudo é nítida a divergência, ou ao menos, a falta de consenso sobre algumas definições básicas.

A engenharia de sistemas é abordagem interdisciplinar que visa o desenvolvimento de sistemas (INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING, 2011), sendo que para Honour (2006) a engenharia de sistemas é também a engenharia da complexidade. Honour afirma que os sistemas complexos possuem 4 características principais: multiplicidade de elementos interagindo (agentes), realimentação (reflexibilidade), adaptação e comportamentos emergentes. Ainda que os sistemas tenham evoluído ao longo dos últimos 40 anos desde que o termo tenha sido usado pela primeira vez, tais características encontram-se presentes na grande maioria dos sistemas de interesse da engenharia de sistemas.

Hibertson e Sheard (2008) consideram, contudo que a engenharia de sistemas na sua concepção tradicional não responde completamente as questões relacionadas aos sistemas complexos. Para tanto sugerem que existe uma engenharia de sistemas antiga utilizada para o desenvolvimento de grandes sistemas que necessitam uma abordagem multidisciplinar. Tais sistemas possuem interfaces bem definidas, possuem relativa estabilidade e seu comportamento previsível. A engenharia de sistemas estendida como se referem as autoras complementa a

antiga. Nessa nova abordagem aspectos como auto-organização e adaptação passam a ser incorporados no conjunto de disciplinas utilizadas pela engenharia de sistemas. A intenção é desenvolver um conjunto apropriado de ferramentas que possam ser aplicadas a sistemas de sistemas, organizações, sistemas sócio técnicos, bem como sistemas biológicos. Tal visão é compartilhada por Bar-Yam (2003).

Buchli e Santini (2005) afirmam que enquanto a engenharia de sistemas tradicional visava eliminar a complexidade dos sistemas a engenharia da complexidade procura considerá-la como parte do sistema e tomar vantagem disso. Os autores reforçam a ideia de que a engenharia de complexidade não tenciona substituir a engenharia de sistemas e sim complementá-la. Para tanto sugerem a necessidade de 5 aspectos principais para a existência de uma engenharia da complexidade madura: a) teoria; b) princípios universais; c) implementações; d) metodologias de desenvolvimento; e e) coletânea e compartilhamento de experiências na área.

Frei e Serugendo (2011) distinguem 4 tipos diferentes de engenharia: engenharia clássica, engenharia de sistemas clássica, engenharia da complexidade e engenharia de sistemas complexos. A engenharia clássica utiliza, em essência, técnicas e ferramentas para a resolução de problemas seguindo uma abordagem reducionista, seja do tipo de cima para baixo ou de baixo para cima. A engenharia de sistemas clássica segue uma abordagem multidisciplinar procurando olhar o sistema como um todo ao invés de partes separadas. Contudo, ainda utiliza como base técnicas e ferramentas da engenharia clássica, sem considerar de maneira apropriada o conceito de emergência. A engenharia da complexidade pode ser definida em poucas palavras como sendo a criação de sistemas utilizando técnicas e ferramentas oriundas da ciência da complexidade. Neste caso o processo de desenvolvimento do produto, o produto em si e sua utilização em um ambiente operacional são considerados. Por fim, a engenharia de sistemas complexos aplica as técnicas e ferramentas utilizadas na engenharia da complexidade a sistemas de sistemas.

Ulieru e Doursat (2011) argumentam que os sistemas produzidos por meio da engenharia clássica partem de requisitos bem estabelecidos os quais definem

também o comportamento esperado produto final. Contudo, em alguns sistemas baseados em redes virtuais é muito difícil especificar qual o comportamento do produto. Os autores destacam ainda que o conceito de adaptação já vem sendo empregado em alguns sistemas sob o título de sistemas auto reconfiguráveis sem que existam técnicas específicas para dar suporte a tal tipo de desenvolvimento. Para tanto os autores propõem um novo tipo de engenharia denominada engenharia de emergência. A engenharia de emergência admite que as principais características de alguns sistemas não podem ser definidas a priori, pois emergem das interações entre máquinas e pessoas, facilitadas por redes de comunicação.

Zapf e Weise (2008) aplicam os conceitos da engenharia de emergência à engenharia de software. Os autores apresentam o cenário em que sistemas são construídos por coleções de agentes autônomos que cooperam entre si para produzir algo. Neste caso comportamentos emergentes podem ser observados a partir da interação de tais agentes. O problema levantado é que, novamente, faltam ferramentas e técnicas específicas para dar suporte a esse tipo de desenvolvimento. Xiong (2011) também procura aplicar os conceitos relacionados à complexidade nos processos tradicionais utilizados dentro da engenharia de software.

5.8 MÉTRICAS DA COMPLEXIDADE

Da mesma maneira que existem diferentes definições sobre o que vem a ser complexidade é natural esperar que também haja diferentes formas de medi-la. Seth Lloyd relaciona, por exemplo, 40 tipos diferentes de medidas de complexidade e ressalta que a lista encontra-se incompleta (LLOYD, 2001). Em seu artigo Lloyd procura classificar as métricas em função de resposta a três perguntas sobre um determinado objeto:

a) O quão difícil é descrevê-lo?
b) O quão difícil é criá-lo?
c) Qual o seu grau de organização?

As métricas de complexidade podem, contudo, ser agrupadas segundo outros critérios. Talvez o tipo de medida de complexidade mais simples esteja relacionada à ideia de tamanho. Por essa abordagem, quanto mais um sistema possuir uma determinada característica de interesse, maior é a sua complexidade. As características do sistema podem ser, por exemplo, número de elementos do sistema, requisitos funcionais, conexões, etc.

Em geral, no caso das medidas baseadas em tamanho a complexidade cresce de maneira linear com aumento do item de interesse sendo contabilizado. A Complexidade Ciclomática de McCabe (1976) é um exemplo típico de cálculo da complexidade baseado em tamanho do código fonte de um software. Por esta abordagem a complexidade cresce em função do número de decisões existentes na estrutura de um programa. Um programa cuja estrutura de controle não possui decisões tem V(G) = 1, já um programa com 1 decisão tem complexidade 2, e assim por diante.

O número de conexões de um elemento de um sistema é outro tipo de contagem utilizada para a medida da complexidade. Neste caso, o número máximo de conexões de um elemento cresce de maneira linear com o número de elementos do sistema. Para um sistema com n elementos ($n > 0$) o número máximo de conexões de cada elemento é dado por n-1 (NEWMAN, 2010).

Outro tipo de métrica está relacionado à complexidade computacional. Seu objetivo é provar que determinados problemas podem ser resolvidos (ou não) em um tempo computacional mínimo (WEGENER, 2005). Por esta abordagem um problema é considerado mais complexo na medida em que o tempo computacional necessário para a solução do problema aumenta.

A Teoria da Informação, por sua vez, ocupa papel de destaque na medida da complexidade em diferentes abordagens. Sua origem remonta aos anos 1940 quando Claude Shannon adaptou os conceitos propostos por Boltzmann na área de Mecânica Estatística para solucionar um problema de transmissão de informação.

Dentre as ideias desenvolvidas por Shannon está o próprio conceito de Informação e Entropia Informacional[19] (SHANNON; WEAVER, 1963).

O conceito de informação está relacionado à variedade. Considere que para a composição de uma determinada mensagem só há disponível um símbolo. Neste caso, seja qual for o tamanho da mensagem esta será formada por repetições de um único símbolo. Pela Teoria da Informação tal mensagem não contém informação. Só há informação se houver variedade.

5.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da complexidade não ser algo novo o interesse pelo assunto tornou-se maior na última década. Como toda nova área do conhecimento ainda carece de definições básicas como um vocabulário unificado e um corpo de disciplinas que a caracterize. Contudo, apesar dessas carências já é possível identificar algumas características comuns em diferentes abordagens como as apresentadas na seção 5.5.

Existe um debate no meio científico para determinar o que é complexo e o que não é. Torna-se importante, neste caso, reconhecer que existem diferentes tipos de complexidade e que é necessário definir o escopo de cada um destes tipos. A proposta de Weaver contemplando dois tipos de complexidade (desorganizada e organizada) fornece um arcabouço inicial para caracterizar que tipo de complexidade um determinado sistema possui.

No caso dos sistemas de engenharia pode-se fazer uma distinção entre processos e os objetos produzidos. No caso dos processos é possível associar o conceito de Complexidade Organizada enquanto que a Complexidade Desorganizada está relacionada aos objetos. Um caso especial refere-se aos sistemas de sistemas que podem ser ligados à Complexidade Organizada (seção 5.3). Essa classificação é

[19] O Apêndice B apresenta alguns aspectos da Teoria da Informação.

importante no sentido em que permite definir as características de complexidade associadas aos sistemas. Contudo, as técnicas que abordam os problemas de engenharia sob a ótica da complexidade ainda estão em desenvolvimento (seções 5.6 e 5.7).

Outro tipo de complexidade que pode ser associada aos sistemas de engenharia é a Complexidade Estrutural. Este tipo de complexidade surge em decorrência das conexões entre os elementos do sistema. A natureza da conexão e a sua força influenciam na avaliação da Complexidade Estrutural.

Pode-se medir a Complexidade Estrutural utilizando-se diferentes abordagens, contudo para efeito deste trabalho adotou-se o cálculo da quantidade de informação da descrição das conexões do sistema. Tal escolha justifica-se por alguns motivos:

a) Trata-se de um tipo de métrica que não depende do tipo do sistema;
b) Permite avaliar a complexidade do projeto, podendo ser aplicada antes que o produto esteja pronto;
c) Permite a determinação da complexidade e compará-la com a complexidade máxima do sistema.

O Capítulo 7 detalha como a quantidade de informação é medida no escopo da abordagem proposta nesta Tese.

6 SEGURANÇA E RISCO

O objetivo deste capítulo é apresentar conceitos relativos à segurança de sistemas. Os sistemas de aplicação aeronáutica são enfatizados, contudo os conceitos abordados podem ser estendidos para sistemas embarcados de natureza diversa. Em primeiro lugar são discutidos alguns conceitos referentes à segurança e risco. Em seguida, a segurança é colocada no contexto do processo de desenvolvimento de sistemas. Algumas normas são referenciadas, contudo é dado ênfase para a SAE ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011). São apresentadas preocupações com a segurança em relação aos sistemas complexos. É dada atenção à *Normal Accident Theory* proposta por Charles Perrow (1999). O capítulo encerra referenciando duas abordagens para a análise de segurança, concebidas para trabalhar com características de sistemas complexos. A Figura 6.1 apresenta a estrutura de tópicos do capítulo.

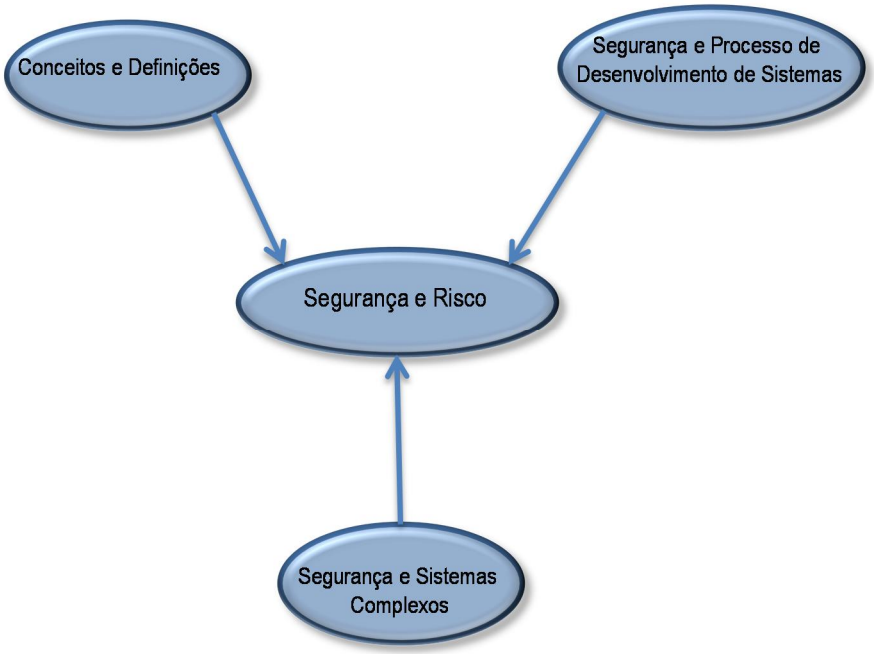


Figura 6.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 6

6.1 SEGURANÇA, CONCEITOS E DEFINIÇÕES

O conceito de segurança é algo que, implícita ou explicitamente, influencia decisões e ações das pessoas. Sob a ótica do senso comum, a ideia de segurança pode ser associada à percepção de risco que as pessoas têm em relação a alguma coisa. Em geral, caso o risco percebido seja baixo, as pessoas tendem a se envolver em ações que aumentam sua exposição até um limite considerado aceitável por elas. Por outro lado, se o risco é percebido como além desse limite a tendência é que sejam evitados. A segurança sob essa perspectiva pode ser definida como o julgamento da aceitabilidade de um determinado risco (LOWRANCE, 1976; WILDE, 2005).

No contexto de sistemas a norma IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998), por exemplo, estabelece três critérios para a avaliação de risco. Tais critérios consistem em determinar se o risco é:

- Tão grande que não pode ser aceito, ou
- Tão pequeno que pode ser considerado insignificante, ou
- Situa-se entre os estados especificados em (a) e (b) e encontra-se reduzido ao menor nível praticável.

Este último critério implica dizer que o risco é considerado tão baixo quanto razoavelmente praticável (*As Low As Reasonably Practicable* – ALARP). Esse conceito baseia-se nos benefícios da aceitação do risco e os custos em reduzi-lo ainda mais. Uma vez empregado o conceito de ALARP o risco resultante é considerado tolerável, aceitável, em relação a aplicação específica para o qual foi analisado (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998).

Neste sentido, a segurança no contexto de sistemas pode ser vista como resultado do esforço de redução de riscos a níveis aceitáveis (VICOLI, 2006). Tal esforço recebe frequentemente outras designações tais como “abordagem”, “disciplina”, “conceito”, “doutrina” ou ainda “filosofia” (STEPHANS, 2004). Contudo, é reconhecido que, independente do esforço realizado, os riscos nunca poderão ser completamente eliminados (LEVESON, 1995).

Risco pode ser definido por uma combinação de frequência e probabilidade de que ocorra um determinado evento que possa provocar dano a pessoas e meio ambiente (STOREY, 1996). Em termos de segurança é necessário também considerar a severidade do dano provocado pelo evento. Em particular, no contexto aeronáutico, os eventos de interesse são aqueles relacionados às condições de falha identificadas para uma aeronave. A *Advisory Circular* (AC) 25.1309 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002) publicada pelo FAA classifica a severidade destes eventos em 5 tipos, como apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Severidade dos danos provocados por um acidente (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002)

Efeito da condição de falha	Descrição
Catastrófico	Resulta em múltiplas fatalidades e/ou perda do sistema.
Hazardous	Reduz a capacidade do sistema ou habilidade do operador em lidar com condições adversas no sentido em que ocorre: • Grande redução nas margens de segurança ou capacidade funcional • Estresse físico/carga de trabalho excessiva da tripulação de maneira que não se pode confiar que os operadores irão realizar suas tarefas de maneira acurada ou completa • Ferimentos graves ou fatalidades para um pequeno número de ocupantes da aeronave (exceto operador) • Fatalidades para pessoal de solo e/ou público em geral
Maior	Reduz a capacidade do sistema ou dos operadores em lidar com condições adversas no sentido em que ocorre: • Significativa redução nas margens de segurança ou capacidade funcional • Significativo aumento nas margens de segurança ou capacidade funcional • Significativo aumento na carga de trabalho do operador • Condições que comprometem a eficiência do operador ou cria desconforto significativo • Estresse físico dos ocupantes da aeronave (exceto operador) incluindo ferimentos • Dano ocupacional dos ocupantes, ambiental ou à propriedade considerados de ordem maior
Menor	Não reduz significativamente a segurança do sistema. Ações requeridas dos operadores estão dentro de suas capacidades. Inclui: • Leve redução nas margens de segurança ou capacidade funcional • Leve aumento na carga de trabalho de maneira que a rotina de trabalho é modificada • Algum desconforto físico aos ocupantes (exceto operadores) • Dano ocupacional dos ocupantes, ambiental ou à propriedade considerados de ordem menor
Sem efeito	Não possui impacto na segurança

Outras normas tais como a SAE ARP4761 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996), IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998), BS EN 50.126 (BRITISH STANDARDS, 1999) e Def Stan 00-56 (MINISTERY OF DEFENSE, 2007) também propõem esquemas para classificar a severidade de eventos quanto ao dano causado.

De acordo com a AC 25.1309 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002) existe uma relação inversa entre a probabilidade de ocorrência de um evento por hora de voo e seu efeito. Dessa forma, quanto maior a severidade do evento provocado por uma condição de falha menos provável ele deve ser. A Tabela 6.2 apresenta essa relação.

Tabela 6.2 – Condições de falha X probabilidade de ocorrência (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002)

Efeito da condição de falha	Probabilidade qualitativa	Probabilidade por hora de voo
Catastrófico	Extremamente improvável	$< 10^{-9}$
Hazardous	Extremamente remoto	$< 10^{-7}$
Maior	Remoto	$< 10^{-5}$
Menor	Provável	$< 10^{-3}$
Sem efeito	Sem probabilidade requerida	Sem probabilidade requerida

Aceitabilidade de uma determinada combinação entre probabilidade de ocorrência de uma condição de falha e a severidade dos efeitos correspondentes é sumarizada na Figura 6.2. No caso, a cor verde corresponde às combinações aceitáveis e a cor vermelha às combinações não aceitáveis. As situações que forem identificadas como não aceitáveis precisam ser tratadas até que possam ser consideradas aceitáveis.

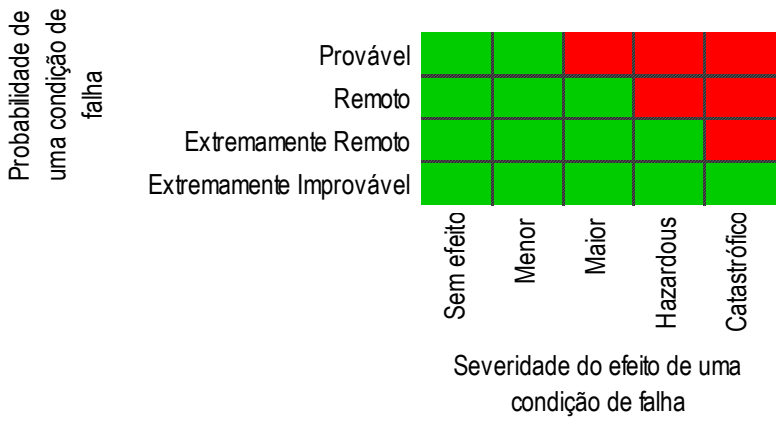


Figura 6.2 – Probabilidade x severidade do efeito de uma condição de falha

Segurança pode ser definida ainda como a probabilidade, em um dado intervalo de tempo, de um sistema desempenhar sua função ou descontinuá-la sem causar mortes, ferimentos, prejuízos ambientais e materiais (CAMARGO Jr., 2002). Para Woods segurança é uma propriedade emergente que surge da interação entre componentes, subsistemas, software, organização e do comportamento humano (WOODS; HOLLNAGEL, 2006).

Nancy Leveson sugere que segurança é a ausência de acidentes ou perdas. Contudo reconhece que em termos práticos é difícil, senão impossível, conceber algo ou situação que esteja completamente livre do risco de algum acidente ou perda. Leveson argumenta que mesmo assim faz sentido trabalhar com o conceito de segurança em termos absolutos. A razão para isso é que aceitando a possibilidade de uma segurança relativa pode ocorrer um relaxamento em termos das ações que poderiam ser tomadas no sentido de eliminar ou, ao menos, minimizar situações de risco (LEVESON, 1995).

Independentemente da definição adotada é reconhecido que a segurança é algo que de deve ser considerado como parte intrínseca do processo de desenvolvimento do sistema. As atividades referentes à segurança podem ser vistas como uma função de integração, que devem ser introduzidas no projeto de um sistema desde as etapas iniciais de seu desenvolvimento.

6.2 SEGURANÇA COMO PARTE DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS

As normas e procedimentos de organizações governamentais são as principais referências para a definição de atividades relacionadas à segurança que devem ser realizadas durante o processo de desenvolvimento de um sistema de uso aeronáutico. A ARP4761 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996), IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998), BS EN 50126 (BRITISH STANDARDS, 1999), Def Stan 00-56 (MINISTERY OF DEFENSE, 2007) e ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011) são exemplos de normas utilizadas em projetos de sistemas críticos quanto à segurança[20]. No que se refere à atuação de órgãos governamentais a Order 8040.4 *Safety Risk Management* (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 1998) e o manual de segurança de sistemas da Força Aérea Norte americana (U.S. AIRFORCE, 2000) são exemplos de publicações.

As atividades de segurança realizadas no desenvolvimento de sistemas constituem-se em um processo que provê evidências analíticas para a demonstração de cumprimento com os requisitos do projeto. Existem diversas abordagens para a condução das atividades referentes à segurança. No contexto aeronáutico, em particular, as normas SAE ARP4761 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996) e SAE ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011) são usualmente aplicadas.

A segurança, conforme proposto nestas normas, é algo que vai sendo construído ao longo do desenvolvimento do sistema. Trata-se de um processo iterativo que é realizado em três atividades principais: *Functional Hazard Assessment* (FHA), *Preliminary System Safety Assessment* (PSSA) e *System Safety Assessment* (SSA) (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011).

O FHA visa identificar as condições de falha e seus efeitos sob o ponto de vista funcional. Em um primeiro momento o foco são funções realizadas pela aeronave

[20] Ainda há a ISO IEC 26262 - *Road vehicles -- Functional safety* (em fase de elaboração)

como, por exemplo, manter o controle de rotação da aeronave ou prover capacidade de frenagem. As funções são associadas à cenários de operação da aeronave para o levantamento de condições de falha considerando tanto condições normais quanto modo degradado (ERICSON II, 2005). Tais condições de falha advêm de três possíveis causas (HABLI; KELLY; PAGE, 2009):

- Interrupção no fornecimento da função.
- A função é fornecida quando não requerida.
- A função provê dados incorretos.

Uma vez consideradas as condições de falha que ocorrem com as funções de aeronave, o processo passa a analisar as funções realizadas pelos sistemas. Neste caso são consideradas as condições de falha dos sistemas e sua contribuição para as condições de falha da aeronave. Os efeitos das condições de falha identificadas são classificados quanto à sua severidade segundo um critério como, por exemplo, o apresentado na Tabela 6.1. A partir dessa classificação são definidos os requisitos de segurança que o sistema deve atender. Assim, quanto maior a severidade associada a uma determinada condição de falha do sistema, mais rigorosos são os requisitos de segurança.

A norma IEC 61.508 utiliza o conceito de *Safety Integrity Level* (SIL) para definir os requisitos de segurança que um sistema deve atender. Por essa abordagem, uma função que tem associada a ela uma condição de falha classificada como catastrófica, deve atender os requisitos de SIL 4. Os requisitos são atenuados na medida em que os efeitos das condições de falha também diminuem (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998). O mesmo ocorre com a norma ARP4754A que utiliza o conceito de *Development Assurance Level* (DAL). De maneira similar à ideia de SIL, o DAL define também o nível de rigor que o desenvolvimento de sistema deve seguir a fim de atender aos requisitos de segurança (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011). A Tabela 6.3 correlaciona os efeitos das condições de falha com o SIL e DAL correspondentes.

Tabela 6.3 – Níveis de integridade e correspondentes condições de falha

SIL	DAL	Efeito de uma condição de falha
4	A	Catastrófico
3	B	Hazardous
2	C	Maior
1	D	Menor
	E	Sem efeito em segurança

A norma IEC 26262 propõe o uso do conceito de *Automotive* SIL (ASIL). Não há uma correspondência exata entre o conceito de SIL e ASIL. O ASIL A aproxima-se ao SIL 1, o ASIL B aproxima-se do SIL 2, o ASIL C situa-se entre o SIL 2 e 3, enquanto que o ASIL D aproxima-se do SIL 3. Não existe ASIL equivalente ao SIL 4 (GRIESSER; SCHEINER; STOLZL, 2008).

Concluído FHA inicia-se o PSSA. O objetivo do PSSA é identificar estratégias de proteção necessárias ao cumprimento dos requisitos de segurança do sistema, considerando aspectos relacionados à arquitetura do sistema, como por exemplo, particionamento, dissimilaridades, redundâncias, uso de monitores, etc. Identifica possíveis novas condições de falhas introduzidas pela arquitetura ou requisitos derivados e realimenta o projeto dos sistemas e o FHA (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996).

A terceira atividade do processo de segurança de sistemas é a realização do SSA. O SSA consiste na verificação de que a implementação do projeto atende qualitativa e quantitativamente os requisitos de segurança do projeto definidos a partir do FHA e PSSA. A Figura 6.3 apresenta a sequência dessas atividades conforme proposto na norma ARP4754A.

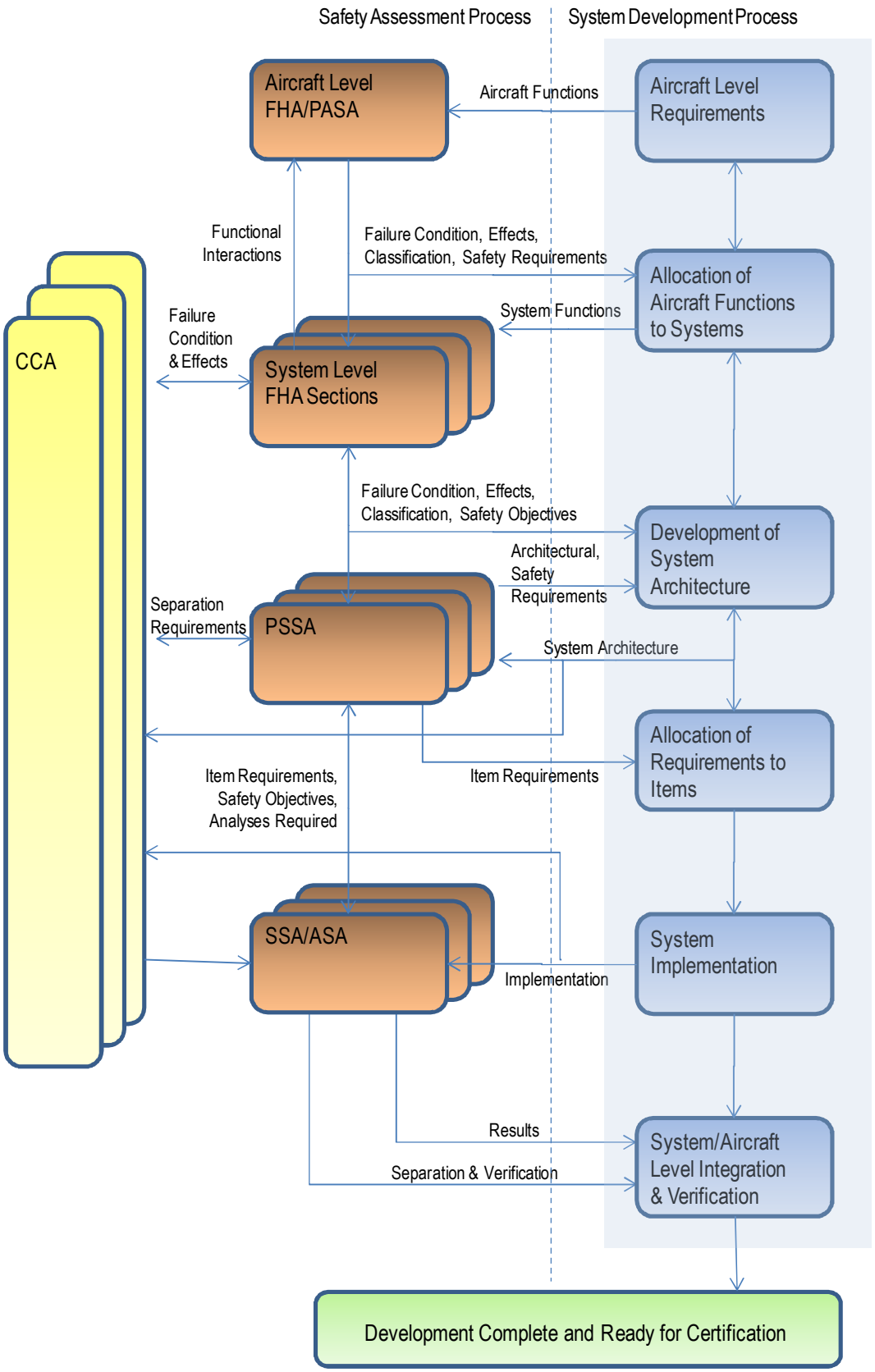


Figura 6.3 – Processo de desenvolvimento de sistemas (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011)

6.3 SEGURANÇA E SISTEMAS COMPLEXOS

A crescente complexidade dos sistemas tem suscitado preocupação dos especialistas em segurança. Dois aspectos principais têm contribuído para o aumento dessa complexidade (BOZANNO; VILLAFIORITA, 2010). O primeiro aspecto diz respeito ao surgimento de novas tecnologias, principalmente as relacionadas ao uso de computadores. A utilização extensiva de recursos computacionais tem permitido que os sistemas passem a realizar cada vez mais funções sendo que algumas delas com implicações em segurança. Um exemplo desse tipo de função é realizada pelos sistemas do tipo *fly-by-wire* encontrados em algumas aeronaves. Outro aspecto está relacionado aos métodos de desenvolvimento de sistemas. Por exemplo, é cada vez mais comum a adoção do paradigma de desenvolvimento de sistemas baseado em modelos (*Model-Based Development* – MBD). Neste caso em particular, a preocupação é com a falta de suporte específico para a análise de segurança de sistemas especificados utilizando este paradigma.

O problema que surge da rápida evolução das tecnologias e métodos é que as técnicas de análise de segurança não conseguem acompanhar o mesmo ritmo, ficando sempre um passo atrás com relação ao estado da arte das práticas de engenharia (DULAC; LEVESON, 2004). A preocupação com este cenário justifica-se, pois a complexidade implica não somente em novos tipos de perigos, mas também torna sua identificação mais difícil (LEVESON, 1995; SHA, 2001). Cook (2010) apresenta um conjunto de fatores que contribuem para que surjam falhas em sistemas complexos. De maneira geral, Cook destaca a dificuldade de se analisar todos os aspectos do sistema que podem levar o sistema a falhar. Tal dificuldade advém de aspectos técnicos em termos do número de elementos e possibilidades de interação entre eles e também de fatores humanos tanto no desenvolvimento do sistema quanto na sua operação.

No contexto aeronáutico, Lloyd e Tye (1982) afirmam que a segurança das aeronaves tornou-se dependente de sistemas complexos. Segundo Charles Perrow

acidentes[21] são inevitáveis em sistemas complexos e com alto acoplamento. A complexidade e o acoplamento entre os elementos do sistema possibilitam o surgimento de interações não esperadas que levam à ocorrência de acidentes. Tal conceito é a base da Teoria de Acidentes Normais (*Normal Accident Theory* – NAT) (PERROW, 1999).

Perrow distingue duas origens para a ocorrência de acidentes em sistemas. A primeira está relacionada a falha de componentes. Neste caso, o acidente ocorre por causa da falha de um ou mais componentes do sistema que estão conectados em uma sequência conhecida e esperada. Já a segunda origem refere-se a acidentes ocorridos em função de interações não previstas entre os componentes do sistema. Em geral são provocadas por múltiplas falhas que se propagam de maneira não previamente conhecida ou esperada. Neste caso os projetistas e operadores do sistema não são capazes de compreender ou mesmo antecipar todas as possibilidades de interações entre os componentes do sistema de maneira a intervir antes que o acidente ocorra. Tais acidentes são denominados acidentes normais (PERROW, 1999).

6.3.1 Complexidade Interativa

Os engenheiros projetam sistemas para funcionar de maneira repetitiva, determinística, conforme as suas especificações. O fundamento da simplicidade como prática geral, deve nortear a concepção dos sistemas no sentido de promover um melhor entendimento dos seus princípios e modos de operação (SHA, 2001). Dentro dessa abordagem, os elementos de um sistema, considerando todos os níveis (subsistemas, unidades e partes), são projetados para possuírem interações ocorrendo conforme seu projeto, em uma sequência prevista. Esse tipo de interação é denominado como interações lineares (PERROW, 1999 pag. 75).

Na medida em que os componentes de um sistema crescem em quantidade, número de funções realizadas e, principalmente interações, aumenta também a sua

[21] Acidente – evento que implica em dano a subsistemas ou ao sistema como um todo, interrompendo seu funcionamento ou o afetando de maneira que precise ser desligado imediatamente (PERROW, 1999).

complexidade. De acordo com Perrow, as interações lineares predominam entre os componentes de um sistema. Porém, decorrente do aumento da complexidade destes sistemas, é possível o surgimento de ramificações, iterações, desvios de uma sequência de operações lineares para outra, etc, com o potencial para a ocorrência de interações inesperadas. Essas interações são denominadas como interações complexas (PERROW, 1999 pag. 75).

As interações complexas ocorrem de maneira não planejada, fora de uma sequência prevista, não sendo visíveis ou passíveis de compreensão imediata (PERROW, 1999 pag. 78). Segundo Perrow as interações complexas não são comuns. Este sugere que somente 1% das interações entre os componentes de um sistema linear são capazes de gerar interações complexas. Já em sistemas complexos esse número sobe para 10% (PERROW, 1999 pag. 75). Os percentuais citados são proposições, não havendo demonstração teórica ou empírica dos mesmos. A Tabela 6.4 abaixo apresenta um sumário das características dos sistemas complexos e lineares.

Tabela 6.4 – Sistemas complexos X lineares (PERROW, 1999 pg. 88)

Sistemas Complexos[22]	Sistemas Lineares
Pouco espaçamento entre equipamentos.	Equipamentos espalhados.
Etapas de produção próximas.	Etapas de produção segregadas.
Muitas conexões com modos comuns de falha de componentes.	Conexões com modos comuns limitadas a fornecimento de energia e ambiente.
Isolamento limitado de componentes com falha.	Isolamento fácil de componentes com falha.
Substituição limitada de fornecedores e materiais.	Substituição extensiva de fornecedores e materiais.
Laços (*loops*) não familiares ou inesperados.	Poucos laços (*loops)* não familiares ou inesperados.
Muitos parâmetros de controle com interações em potencial.	Poucos parâmetros de controle, diretos e segregados.
Informações indiretas ou por inferência.	Informações diretas.
Entendimento limitado de alguns processos.	Entendimento extensivo de todos os processos.

[22] Segundo Perrow (1999) sistemas que apresentam interações complexas entre seus elementos são denominados sistemas complexos. Por sua vez, sistemas que possuem somente interações lineares entre seus elementos são denominados sistemas lineares.

6.3.2 Acoplamento

Dois sistemas podem ser considerados como sendo independentes se cada um puder funcionar sem a presença do outro (YOURDON, 1990 pag. 95). Em outras palavras, a independência entre dois sistemas é conseguida quando não há qualquer tipo de interação entre eles. Quando isso não é possível diz-se que estes sistemas estão, de alguma forma, acoplados[23].

O grau de acoplamento entre dois sistemas pode variar quanto a sua intensidade. Na visão de Perrow os sistemas podem ser fortemente acoplados (*tight coupled*) ou fracamente acoplados (*loosed coupled*). Sistemas com acoplamento fraco são mais desejáveis do que aqueles cujo acoplamento é considerado forte (PERROW, 1999). Esse fato se torna mais evidente quando o sistema em consideração desempenha funções críticas quanto à segurança. Em sistemas fortemente acoplados é maior o risco de que uma falha em um determinado componente afete outros componentes. A propagação dessa falha pode, então, conduzir a um acidente (LISAGOR et al., 2006; GRUNSKE; KAISER; PAPADOPOULOS, 2005).

Perrow destaca um conjunto de aspectos que caracterizam sistemas fortemente acoplados. Talvez o principal ponto abordado seja a ausência de margens (PERROW, 1999 pag. 93). A tolerância a imprecisões de informações pode ser contornada, porém somente dentro de alguns limites. Outro aspecto refere-se a sequência em que os processos de um sistema são projetado e realizados. O que ocorre nesse caso é que as sequências são pouco susceptíveis a variação. As dependências entre os processos são estritamente estabelecidas e reconfigurações, muitas vezes, não são triviais.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de segurança é realizada no sentido de identificar potenciais perigos relacionados à operação do sistema, seus efeitos e causas. É utilizada para

[23] O Capítulo 4 discute em detalhes o conceito de acoplamento em sistemas.

determinar riscos relacionados a sistemas e sua relevância, definindo ações apropriadas para que tais riscos sejam considerados aceitáveis (ERICSON II, 2005). A execução de uma análise de segurança é apoiada por diferentes métodos. Cada aspecto abordado na análise de segurança utiliza um conjunto de técnicas adequadas às suas características. Por exemplo, a identificação de perigos utiliza técnicas como o *Hazard and Operability Analysis* – HAZOP (REDMILL; CHUDLEIGH; CATMUR; 1999), enquanto que a análise de falhas utiliza a *Fault Tree Analysis* – FTA (SCAPIN, 1999).

Existe uma grande variedade de métodos orientados para a análise de segurança. Everdij e Blom editam desde 2004 o *Safety Method Database* – SMD, que é um repositório de técnicas, métodos, bancos de dados e modelos relacionados ao processo de segurança de sistemas (EVERDIJ; BLOM, 2010). O SMD conta, em sua última atualização realizada em 2008, com mais de 700 registros distribuídos em diversas áreas.

Apesar do grande número de métodos disponíveis existe a preocupação quanto à sua adequação às características dos sistemas complexos. Dentre as abordagens mais recentes para a análise de segurança encontra-se o conceito de Engenharia de Resiliência. De acordo com Woods e Hollnagel (2006) a Engenharia de Resiliência é um paradigma para a gestão da segurança que tem como foco auxiliar pessoas a conviver com a complexidade em situações em que exista pressão para se atingir alguma meta.

Em outra abordagem, Leveson (2004a) propõe o uso de um método denominado *Systems-Theoretic Accidents Models and Processes* (STAMP). A proposta do método é que acidentes podem ser prevenidos por meio do controle de restrições impostas ao sistema. Caso tais restrições sejam violadas então acidentes podem acontecer. O STAMP foi sendo aperfeiçoado desde que surgiu em 2002 (LEVESON, 2002). Sua proposta já leva em consideração características dos sistemas complexos, incluindo no seu escopo a análise de interações entre elementos do sistema.

A Engenharia de Resiliência traz alguns elementos novos para a formação de uma cultura organizacional voltada para a segurança. O STAMP já tem uma orientação mais voltada à engenharia de sistemas. Estes dois métodos são exemplos do esforço atual para a adequação das tradicionais abordagens de análise de segurança às características dos sistemas complexos. O índice C^2A apresentado no Capítulo 7 é mais uma contribuição neste campo.

7 CRITICALIDADE, COMPLEXIDADE E ACOPLAMENTO – C^2A

O objetivo deste capítulo é apresentar o índice C^2A. O índice C^2A é um indicador de risco que utiliza como referência três aspectos distintos: complexidade, acoplamento e criticalidade.

O capítulo inicia apresentando algumas considerações de caráter geral estabelecendo o significado dado para complexidade, acoplamento e criticalidade no contexto desta Tese. Em seguida cada um destes três aspectos é discutido isoladamente em termos da forma de medi-los e representá-los. Por fim é apresentado o índice C^2A.

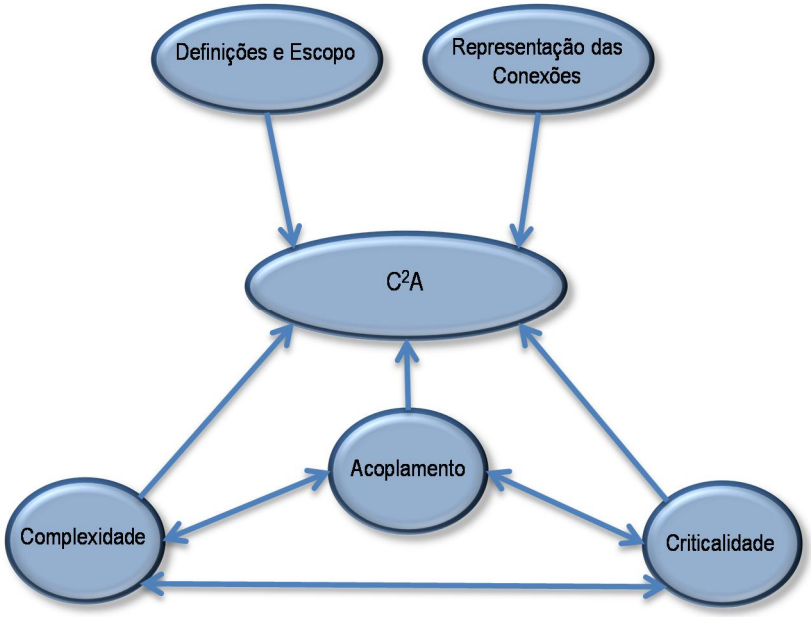


Figura 7.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 7

7.1 DEFINIÇÕES E CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESCOPO DA PESQUISA

As próximas seções discutem os elementos centrais do método sendo proposto. São apresentados os conceitos adotados para complexidade, acoplamento e criticalidade, bem como estabelecidas condições de contorno para a pesquisa.

7.1.1 Elementos da Técnica

Como abordado no Capítulo 5 existem diferentes definições para o termo complexidade. Entretanto, no contexto desta Tese, o conceito de complexidade é utilizado no sentido proposto por Charles Perrow em sua *Normal Accident Theory* (NAT) (PERROW, 1999). Segundo Perrow um sistema não é linear ou complexo, somente suas interações o são[24].

As interações entre sistemas podem ser consideradas sob o ponto de vista sintático (estrutural) ou semântico (funcional). A estrutura do sistema está relacionada a maneira com que os elementos do sistema estão conectados. Trata-se de uma visão estática do sistema. A interação entre os elementos do sistema, que ocorre por meio da sua estrutura, determina o comportamento do sistema, sua função. Nesse sentido a estrutura constitui-se em elemento básico para que um sistema realize sua função.

A maneira com que a complexidade é tratada nesta Tese segue uma abordagem estrutural. A abordagem adotada visa criar um arcabouço que permita estendê-lo, no futuro, para a avaliação de aspectos funcionais. Contudo, é necessário antes consolidar uma referência para a análise da estrutura dos sistemas. Tal análise foca nas conexões entre elementos de um sistema ou entre sistemas. Neste caso, três aspectos são considerados: complexidade (quantidade de informação), acoplamento e criticalidade.

A complexidade de um sistema é consequência da complexidade de suas conexões, sendo que a complexidade de uma conexão é medida utilizando-se os conceitos da

[24] A seção 6.3.1 discute a questão da complexidade no sentido proposto por Perrow.

Teoria da Informação. Segundo Abram Moles a ideia de informação não significa outra coisa senão uma medida da complexidade (MOLES, 1978, p.55). Outros autores também fazem a associação entre a quantidade de informação e complexidade (KOLMOGOROV, 1968; CHAITIN, 2005; BARRON, COVER, 1991). Além do suporte da literatura da área, a escolha pela Teoria da Informação obedece a alguns critérios adicionais:

a) A forma de medida deve ser genérica, podendo ser aplicada a diferentes tipos de sistema;
b) Deve medir a estrutura de conexões entre elementos de um sistema, entre sistemas e entre sistemas de sistemas;
c) Deve permitir a identificação de máximos, a fim de viabilizar comparação entre o valor efetivamente medido e o máximo possível daquele sistema.

O acoplamento é definido por um conjunto de características existentes nas conexões entre dois elementos de sistema. De maneira, a medida do acoplamento é a medida dessas características. Apesar de alguns autores proporem um conjunto específico de características de acoplamento, como é o caso de Pressman no contexto de software (PRESSMAN, 2002), não há uma padronização dessas características.

Nesse sentido optou-se não se definir a priori um conjunto específico de características de acoplamento. Dependendo do tipo de sistema, baseado em julgamento de engenharia, pode-se adotar um conjunto qualquer de características de acoplamento consideradas relevantes para o sistema em questão. Cada uma das características de acoplamento considerada relevante recebe um peso o qual é denominado fator de acoplamento. Este fator é usado para multiplicar a quantidade de informação, que corresponde à complexidade das conexões do sistema, fornecendo um indicador da sua força.

A criticalidade é um índice que indica a importância de uma determinada conexão no que se refere à segurança do sistema. A criticalidade é determinada em decorrência da classificação das condições de falha identificadas para os elementos de sistema em questão. Parte-se do princípio que um elemento do sistema possui nível de integridade compatível com as condições de falha identificadas para ele. Assim, um

elemento que tenha uma condição de falha classificada como catastrófica é desenvolvido com rigor maior do que outro cujas condições de falha não possui impacto em segurança.

Os índices denominados *Development Assurance Level* (DAL) e *Safety Integrity Level* (SIL) propostos pelas normas ARP4754 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996) e IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998) respectivamente, determinam o rigor de desenvolvimento de um sistema em decorrência de suas condições de falha. Contudo, como o objeto de interesse da Tese são as conexões entre elementos de um sistema, foi criado um índice denominado fator de criticalidade, que indica o impacto que a falha de um elemento do sistema pode provocar em outro elemento devido à conexão entre eles.

Cada um dos três aspectos citados tem significado próprio e trazem informações importantes sobre as conexões entre os elementos do sistema. Contudo, em se tratando da NAT, complexidade e acoplamento são considerados como fatores contribuintes para a ocorrência de acidentes. Neste sentido, propõe-se que a quantidade de informação (complexidade) é somada ao acoplamento no sentido de se obter um índice de risco único. Tal soma é possível, pois tanto quantidade de informação quanto o acoplamento são medidos na mesma unidade, ou seja, *bits*.

Considerou-se que, em termos de segurança, as conexões e o sentido que ocorrem contribuem de maneira diferente para as consequências de um possível acidente. Considere, por exemplo, um sistema cuja pior condição de falha é um evento catastrófico e que este passa informações para outro sistema cuja classificação da pior condição de falha é de ordem menor. Neste caso, mesmo que o primeiro sistema falhe a consequência da propagação dessa falha para o segundo não pode ser maior do que a classificação menor. Contudo, se a conexão for considerada no sentido contrário o efeito muda de proporção.

O índice de criticalidade foi criado para indicar a importância das conexões em termos do risco em segurança no caso de ocorrência de falhas. Não se questiona o processo de análise de segurança que determina a criticalidade das condições de

falha de cada sistema. O índice de criticalidade parte dessa informação para ser calculado.

O índice de criticalidade pode então ser aplicado sobre a complexidade e acoplamento ponderando o seu valor em termos do impacto em segurança. Assim mesmo que a conexão entre elementos de um sistema tenha alta complexidade e acoplamento, caso seu índice de criticalidade seja baixo o valor resultante é diminuído. Por outro lado, pode acorrer que sistemas com baixa complexidade e acoplamento tenham índice final aumentado em função do fator de criticalidade. O índice resultante dessa equação é denominado C^2A. O índice C^2A é um indicador de risco baseado em elementos estruturais de um sistema.

Tal índice tem como principais aspectos positivos:

a) Fácil contabilização. Com pouco suporte computacional é possível determinar os valores da complexidade, acoplamento e índice de criticalidade.
b) É possível estabelecer um máximo para a complexidade, acoplamento e fator de criticalidade para o sistema permitindo comparação relativa dos valores nominais obtidos.
c) Permite a comparação de resultados entre diferentes sistemas.
d) Leva em consideração as conexões dois a dois entre os elementos do sistema, mas também permite a obtenção de indicadores para o sistema como um todo.

7.1.2 Considerações Sobre Conexões e Sua Representação

As conexões entre elementos de um sistema viabilizam diferentes tipos de interação. Como discutido no Capítulo 4 as interações podem se dar pela passagem de energia, informação ou material. Contudo, no contexto desta Tese somente serão consideradas as conexões por meio das quais as interações ocorrem pela passagem de informação.

Por certo que as interações referentes à passagem de energia e material também são importantes, contudo a intenção é dar foco em arquiteturas de sistemas

computacionais embarcados em aeronaves. Neste caso a passagem de informação assume papel de relevância maior sobre as demais formas de interação.

A passagem de informação ocorre por meio de canais de comunicação discretos, barramentos de dados etc. A comunicação pode ser sequencial ou paralela. Contudo, do ponto de vista estrutural, é levado em consideração a existência ou não de conexão entre os elementos do sistema. Características específicas dos canais são consideradas somente para efeito do acoplamento e fator de criticalidade. É relevante observar que em algumas situações dois elementos podem estar conectados por mais de um canal de comunicação.

A forma adotada para representar as conexões entre elementos de um sistema baseou-se nos seguintes critérios:

a) A forma de representação deve ser genérica, podendo ser aplicada a diferentes tipos de sistemas;
b) Deve permitir a modelagem de conexões entre elementos de um sistema, entre sistemas e entre sistemas de sistema;

Duas formas de representação foram analisadas: grafos e matrizes. Ambas atendem aos critérios estabelecidos, contudo as matrizes podem ser consideradas como uma estrutura primitiva a partir da qual é possível construir grafos. Nesse sentido, as matrizes foram adotadas como o meio para a representação das conexões.

7.1.3 Representação dos Valores Medidos

Da mesma maneira que foi definida uma forma para a representação das conexões entre os elementos de um sistema, também é necessário definir a maneira com que serão representados os valores medidos quanto à quantidade de informação, acoplamento, criticalidade e índice C^2A.

Dois grupos de representações foram adotados. O primeiro refere-se aos valores medidos para cada conexão. O segundo grupo refere-se aos índices gerais aplicados ao sistema como um todo.

Os valores medidos referentes às conexões entre elementos considerados dois a dois, são representados por meio de matrizes. Neste caso, a célula correspondente à interseção de dois elementos contém o valor medido.

Dependendo do número de elementos do sistema a matriz que representa suas conexões pode assumir grandes dimensões. Dessa forma, identificar os valores em cada uma das células pode se tornar trabalhoso. Para contornar esse problema é adotado um código de cores para cada célula transformando a matriz em uma espécie de mapa térmico do sistema. Por essa abordagem os valores mais relevantes aparecem destacados na matriz em cores mais quentes enquanto que os de menor relevância em cores mais frias. A Figura 7.2 apresenta a gradiente de cores adotado.

Figura 7.2 – Gradiente de cores utilizado na representação de valores medidos

A Figura 7.3 apresenta um exemplo de matriz com a quantidade de informação medida para as conexões de um sistema qualquer.

	A	*B*	*C*	*D*	*E*
A	0	0	1,72	0	0
B	0	0,45	0	0	0
C	0	0,36	0	0,64	0
D	0	0	1,54	0	0
E	1,43	0	0	0	2,67

Figura 7.3 – Exemplo de mapa térmico representativo das conexões de um sistema

A complexidade/acoplamento de um sistema são medidas em termos de uma componente interna e outra externa. A complexidade interna é uma medida da quantidade de informação das conexões existentes entre elementos do próprio sistema. Já a complexidade externa é medida em termos das conexões entre os elementos de um sistema com elementos de outros sistemas. O acoplamento corresponde à força dessas conexões.

Como será apresentado nas próximas seções, consideradas algumas condições de contorno, é possível determinar valores máximos para a complexidade/acoplamento e suas componentes. Dessa maneira os valores medidos podem ser comparados com seus máximos correspondentes.

A visualização da relação entre o valor da complexidade/acoplamento medido e seus máximos é feita de duas maneiras. A primeira ocorre por meio de planos cartesianos. Neste caso o valor medido é representado em termos da sua relação com os valores máximos relativos à complexidade/acoplamento interno e externo. Tal representação é ilustrada na Figura 7.4.

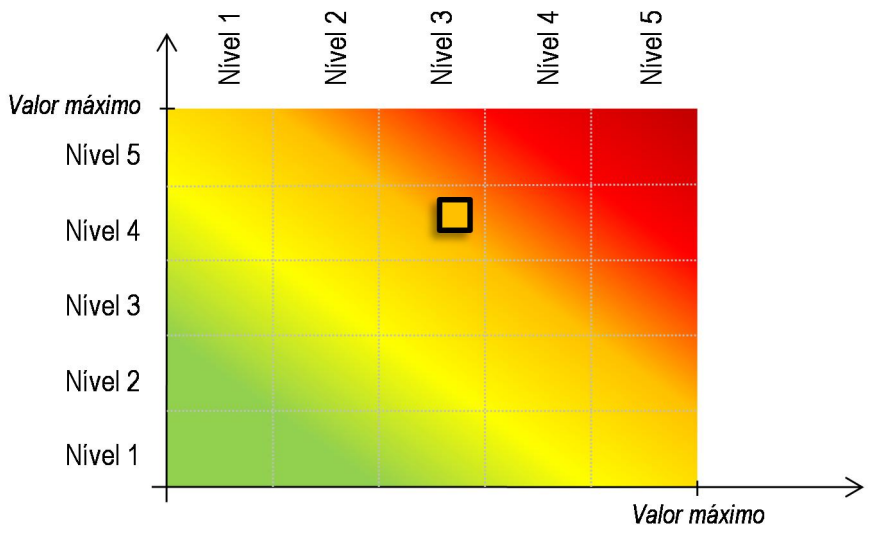


Figura 7.4 – Complexidade/acoplamento medido representado em relação ao valor máximo da complexidade/acoplamento interno e externo do sistema

A Figura 7.4 apresenta o formato geral de como a relação entre máximos e valor medido é feita. O eixo das ordenadas é usado para o valor da complexidade/acoplamento interno enquanto que a abscissa é usada para o valor da

complexidade/acoplamento externo. Na figura a complexidade (ou acoplamento) medida situa-se no nível 4 de complexidade (ou acoplamento) externa e no nível 3 de complexidade (ou acoplamento) interna.

Os eixos encontram-se divididos em 5 níveis. A escolha por 5 níveis é conveniente pois permite fazer uma analogia aos níveis de integridade utilizados tanto pela IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHINICAL COMISSION, 1998) e a AC 25.1309 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002). De qualquer forma, outra escala poderia ter sido escolhida.

O valor da complexidade/acoplamento do sistema como um todo também pode ser comparado com o seu máximo. Tal relação é apresentada em um diagrama no formato apresentado na Figura 7.5. Novamente é utilizada a escala de 5 níveis onde a complexidade medida encontra-se no nível 3.

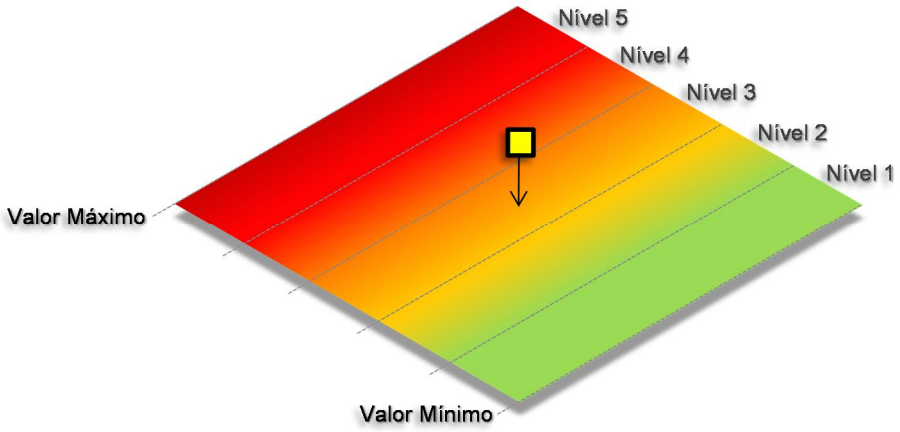


Figura 7.5 – Relação entre a complexidade medida e a correspondente máxima

É importante notar que os valores máximos para complexidade, acoplamento, fator de criticalidade e índice C^2A podem ser diferentes. Neste caso, visando permitir comparar os valores medidos foi utilizado um artifício onde o valor máximo é usado como limite superior de uma escala que contém 5 níveis. Assim, de maneira independente dos valores medidos é possível estabelecer uma escala qualitativa de comparação dos resultados. Tal escala permite também que diferentes projetos possam ser comparados.

7.2 REPRESENTAÇÕES DAS CONEXÕES

O primeiro passo dentro da técnica proposta é a identificação das conexões existentes entre os elementos do sistema. Conforme discutido no Capítulo 3, as matrizes constituem-se em um meio eficiente para a representação de relacionamentos (conexões) entre elementos diversos.

As matrizes do tipo n^2 são utilizadas como base para a representação das conexões entre os elementos de um sistema. Por convenção adotada nesta Tese os elementos produtores são dispostos nas colunas enquanto que os elementos consumidores encontram-se nas linhas da matriz.

Sejam, por exemplo, dois sistemas denominados S_1 e S_2 cujas conexões são representadas em uma matriz M. Pela notação adotada se S_1 está conectado com S_2 então a célula que está na interseção da coluna e linha correspondentes recebe o valor 1. Caso contrário, se S_1 não está conectados à S_2 a célula recebe o valor 0.

$$M_{i,j} = \begin{cases} 1, & Se\ houver\ interação\ entre\ elementos\ de\ S_1\ e\ S_2 \\ 0, & Caso\ contrário \end{cases}$$

e

$$M_{i,i} = 0, \forall i$$

As matrizes apresentadas na Figura 7.6 representam duas possibilidades de conexão entre os sistemas S_1 e S_2. Na Figura 7.6(a) é possível identificar que S_1 produz algo para S_2. Contudo, não há conexão no sentido contrário, ou seja, de S_2 para S_1. Já na Figura 7.6(b) a conexão entre os sistemas ocorre de maneira bidirecional. Neste caso S_1 produz algo para S_2 e S_2 produz algo para S_1.

	S_1	S_2
S_1	0	0
S_2	1	0

(a)

	S_1	S_2
S_1	0	1
S_2	1	0

(b)

Figura 7.6 – Representação da conexão entre sistemas por meio de matrizes n^2

Expandindo um pouco mais este exemplo, considere agora um conjunto S composto por 4 subsistemas, ou $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$. Considere também a representação das conexões existentes entre os subsistemas por meio da matriz n^2 conforme apresentado na Figura 7.7.

	S_1	S_2	S_3	S_4
S_1	0	0	1	1
S_2	1	0	0	0
S_3	1	0	0	1
S_4	0	1	0	0

Figura 7.7 – Representação da conexão entre os subsistemas do sistema S

Da leitura da matriz tem-se, por exemplo, que S_1 produz informação para S_2 e S_3, e recebe informação de S_3 e S_4. Por sua vez, o subsistema S_3 produz informação somente para S_1. A conexão entre S_1 e S_3 é bidirecional.

7.2.1 Detalhamento

Um aspecto importante na representação das conexões entre elementos de um sistema por matrizes refere-se ao nível de detalhamento. Um sistema é desenvolvido, em geral, de cima para baixo por meio de sucessivas etapas de detalhamento o que lhe confere uma estrutura hierárquica. O detalhamento das conexões é interrompido quando o conjunto de informações obtido é considerado suficiente para se implementar o sistema. Este critério de parada é importante, pois a complexidade é avaliada neste último nível.

Na Figura 7.8 é representado na forma de grafo um sistema de sistemas. No caso, só o sistema S_1 foi detalhado, possuindo três níveis hierárquicos. No primeiro nível da hierarquia encontram-se os subsistemas S_{11}, S_{12} e S_{13}. Por sua vez o sistema S_{11} é decomposto em outros subsistemas denominados S_{111}, S_{112}, S_{113} e S_{114}. A decomposição dos demais elementos de S_1 segue o mesmo princípio.

Os valores nas arestas de algumas das conexões do grafo representam o número de canais com que um elemento do sistema está conectado a outro. Por exemplo, o subsistema S_{121} está conectado ao subsistema S_{123} por meio de 3 canais. Quando não há valor indicado nas arestas significa que há um único canal conectando os sistemas.

As conexões permitem a ocorrência de interações entre os elementos do próprio sistema (conexões internas), e também com elementos de outros sistemas (conexões externas). Contudo é possível que haja a interação com o ambiente e/ou com seres humanos, definindo dois novos tipos de conexão. Por exemplo, sistemas embarcados em aeronaves possuem sensores destinados a obtenção de dados relativos à pressão, temperatura externa, temperatura da cabine de passageiros, velocidade em relação ao solo etc. Os seres humanos, por sua vez, interagem com os sistemas atuando sobre eles ou recebendo informações a partir deles. Comandos para baixar o trem de pouso, acionar a pressurização de cabine, aumentar ou reduzir a potência dos motores etc, são exemplos de ações tomadas por pilotos na condução de suas aeronaves. Por outro lado as indicações visuais ou aurais são exemplos de informações passadas pelos sistemas aos pilotos.

Na Figura 7.8 o ambiente (*A*) e os seres humanos (*H*) são representados na matriz de conexões. Contudo, para efeito desta Tese, foram assumidas algumas condições de contorno na modelagem de conexões envolvendo o ambiente e seres humanos:

a) A conexão ocorre sempre por um único canal de comunicação. Assim, as conexões envolvendo estes elementos serão representadas por “1”.
b) Não haverá detalhamento deste tipo de conexão.

Optou-se por tal simplificação, pois tanto a representação dos modos de interação com seres humanos e ambiente demanda esforço que justifica uma pesquisa dedicada ao assunto. Por outro lado a simplificação não traz prejuízo às análises desenvolvidas ao longo da Tese, pois sempre que elas ocorrem são adotadas as condições mais conservativas impostas pela técnica desenvolvida.

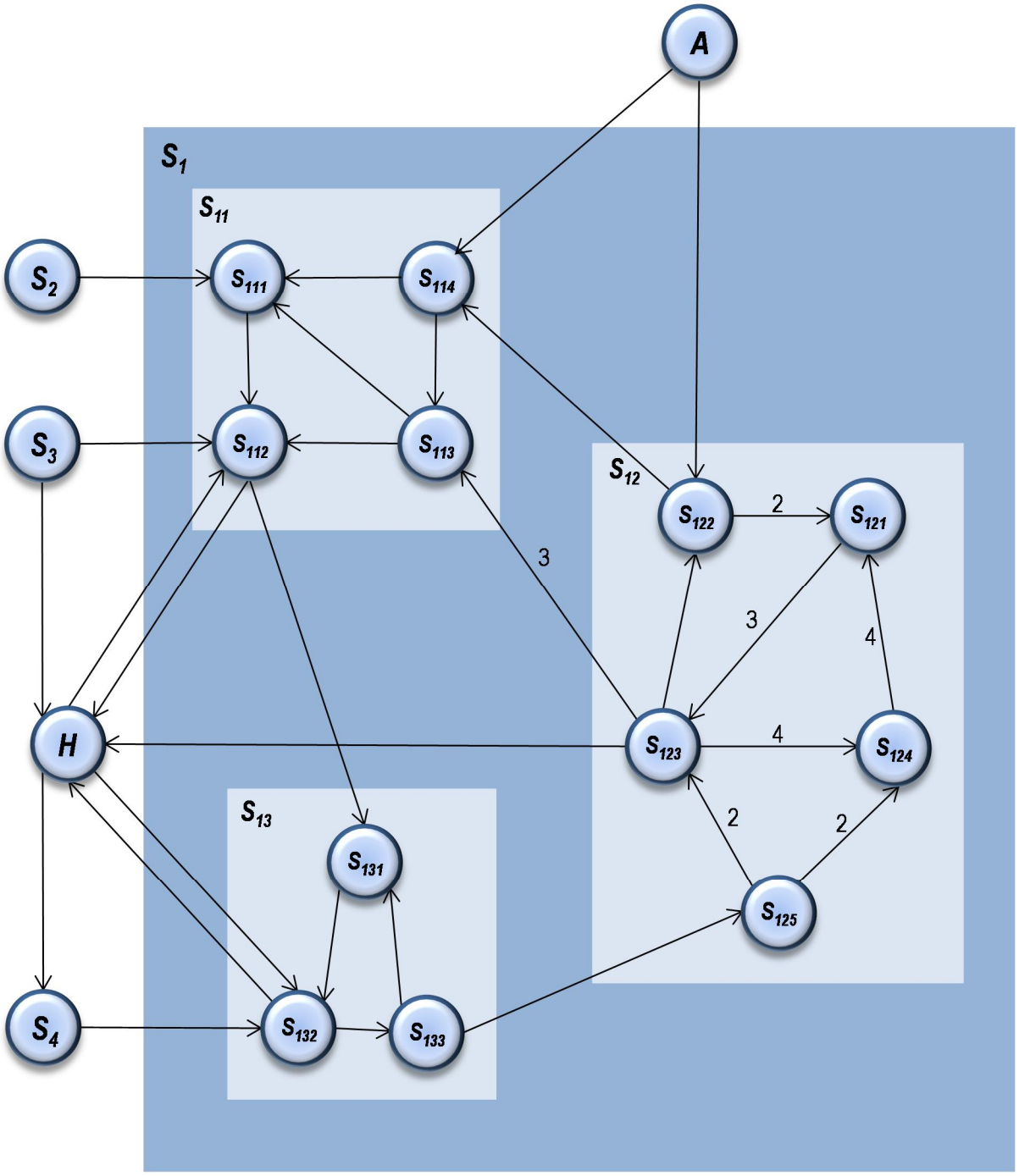


Figura 7.8 – Grafo representando as conexões entre elementos dos sistemas S_1, S_2, S_3 e S_4

A representação das conexões dos sistemas S_1, S_2, S_3 e S_4 na forma matricial é apresentada na Figura 7.9.

								S_1											
								S_{11}				S_{12}					S_{13}		
			H	A	S_2	S_3	S_4	S_{111}	S_{112}	S_{113}	S_{114}	S_{121}	S_{122}	S_{123}	S_{124}	S_{125}	S_{131}	S_{132}	S_{133}
		H	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
		A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S_{11}	S_{111}	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_{112}	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_{113}	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
		S_{114}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
S_1	S_{12}	S_{121}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4	0	0	0	0
		S_{122}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
		S_{123}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	2	0	0	0
		S_{124}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2	0	0	0
		S_{125}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	S_{13}	S_{131}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
		S_{132}	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
		S_{133}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Figura 7.9 – Representação matricial das conexões entre elementos dos sistemas S_1,S_2,S_3 e S_4

7.2.2 Representação de Diferentes Domínios

Outra representação importante é a que envolve informações de diferentes domínios. No exemplo apresentado na Figura 7.9 os sistemas S_1, S_2, S_3 e S_4 representam informações de um mesmo domínio, contudo a conexão entre sistemas com o ambiente e com seres humanos envolve informações de domínios diferentes.

Outra forma de representação da conexão entre elementos de domínios diferentes é feita pelas DMM[25]. Pelo processo de desenvolvimento de sistemas proposto na norma ARP4754 uma das primeiras atividades a ser executada é a definição das funções que a aeronave deve realizar (*FA*). As relações entre estas funções podem ser representadas por meio de uma matriz n^2. A ARP4754 estabelece que sejam definidas então as funções de sistema que irão implementar as funções de aeronave. As relações entre as funções de sistemas também podem ser representadas também por matrizes n^2. Contudo, funções de aeronave e funções de sistemas encontram-se em domínios de informação diferentes exigindo um novo tipo de matriz para ligá-las. A relação entre funções da aeronave e sistemas pode ser feita como ilustrado na Figura 7.10.

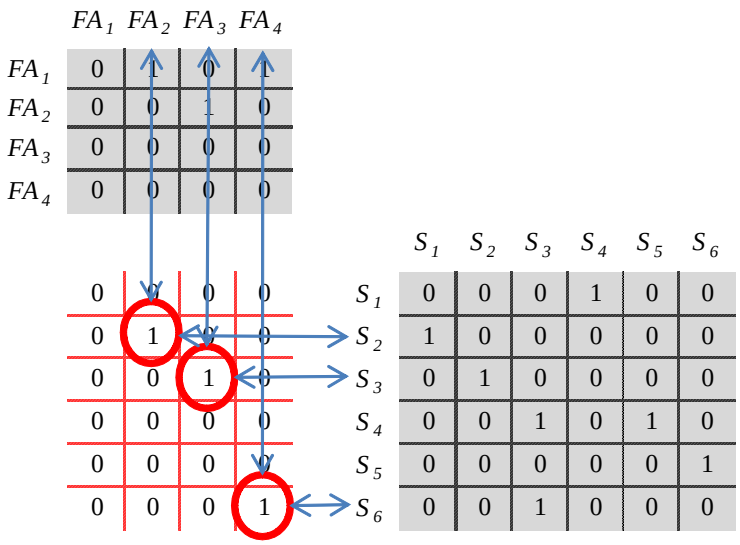


Figura 7.10 – Representação de informações de domínios diferentes

[25] As DMM são discutidas no Capítulo 3.

A matriz no alto da figura representa as funções de aeronave; a matriz no canto inferior direito representa as conexões entre sistemas; a matriz em vermelho estabelece a conexão entre as funções de aeronave e os sistemas que as implementam (DMM). Por exemplo, a função FA_2 é implementada pelo sistema S_2, enquanto que a função FA_4 é implementada pelo sistema S_6.

A matriz DMM que realiza a conexão entre os dois domínios assume as dimensões *m* X *n*, onde *m* é o número de linhas da matriz de um dos domínios mapeados e *n* é a dimensão da outra matriz.

7.2.3 Conexões e Estados do Sistema

As matrizes, da maneira com que foram abordadas até agora, correspondem a uma representação estática de todas as conexões entre elementos do sistema. Tal forma de representação é importante, pois proporciona uma visão completa do projeto do sistema. Contudo, considerando o sistema em operação pode ocorrer que nem todas as conexões existam[26] ao mesmo tempo. Sistemas operam baseados em máquinas de estados que determinam que conexões devam estar ativas e quais devem estar desativadas em um dado momento. Por exemplo, não é esperado que todas as conexões entre o sistema de trem de pouso de uma aeronave e os demais sistemas estejam ativas durante a fase de voo de cruzeiro, entretanto é esperado que o sistema esteja com todas as suas conexões ativas durante as fases de pouso e decolagem[27].

As máquinas de estado são mecanismo importante para se determinar de maneira precisa que conjunto de conexões deve ser considerado em cada estado do sistema. A Figura 7.11 ilustra este conceito.

[26] O termo “existir” foi usado no sentido da conexão estar ativa em um determinado instante da operação do sistema.
[27] O Apêndice A apresenta fases de vôo de acordo com padrão ICAO. Tais fases podem ser associadas a estados que determinam diferentes comportamentos dos sistemas.

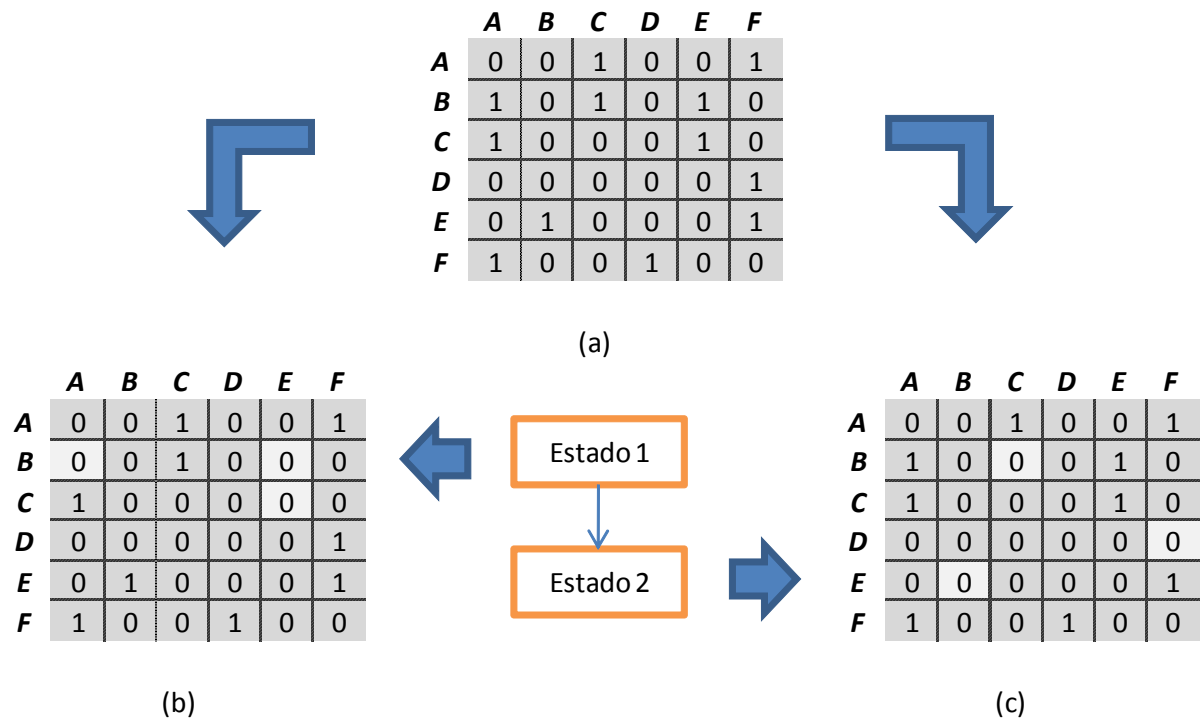


Figura 7.11 – Exemplo de máquina de estado associada às matrizes de conexão entre elementos de um sistema

No exemplo da Figura 7.11 a matriz (a) representa todas as conexões entre os elementos do sistema. As matrizes (b) e (c) representam as conexões que se encontram ativas nos estados do sistema denominados 1 e 2 respectivamente. As conexões afetadas foram destacadas em cinza claro.

7.3 COMPLEXIDADE

A quantidade de informação, no sentido da Teoria da Informação proposta por Shannon e Weaver (1963), é também uma medida da complexidade de uma determinada mensagem (MOLES, 1978). A quantidade de informação é uma quantificação da variedade e da incerteza contida na mensagem.

Para efeito desta Tese a fórmula proposta por Shannon (eq. B.8) é aplicada no contexto de sistemas no sentido de determinar a quantidade de informação existente

nas conexões entre seus elementos, ou seja, sua complexidade. Dessa maneira a leitura da eq. B.8 necessita ser adequada a este novo contexto.

$$\Gamma(S) = \sum_{i,j=1}^{|S|} \Gamma_{i,j} = -\sum_{i,j=1}^{|S|} p(x)_{i,j} \log_2 p(x)_{i,j} \tag{7.1}$$

Onde:

- $\Gamma(S)$ é a complexidade das conexões do sistema *S*. $\Gamma(S)$ equivale a $H(S)$ como apresentado na fórmula original de Shannon em (B.8).
- $\Gamma_{i,j}$ é a quantidade de informação em cada um dos elementos de *S*.
- *S* é o conjunto das conexões entre os elementos do sistema.
- $|S|$ é total de conexões entre os elementos do sistema.
- $p(x)$, $\forall\ x \in S \mid i \neq j$ é a frequência com que uma conexão entre os elementos *i* e *j* ocorre, onde *p* é dado por $\frac{n}{|S|}$. O valor de *n* representa o número de conexões existentes entre dois elementos *i* e *j* do sistema.

7.3.1 Complexidade Efetiva

A complexidade de um sistema, ou complexidade efetiva (Γ^E), é dada pela soma de dois tipos de complexidade, a interna (Γ_i^E) e a externa (Γ_e^E). Enquanto que a complexidade interna considera as conexões entre os elementos internos ao sistema, a complexidade externa considera as conexões entre os elementos do sistema sendo medido e elementos de outros sistemas.

$$\Gamma^E(S) = \Gamma_i^E(S) + \Gamma_e^E(S) \tag{7.2}$$

Para ilustrar a maneira com que a complexidade é calculada utilizou-se como referência o sistema S_{12} apresentado na matriz da Figura 7.9. O sistema S_{12} é constituído por 5 elementos {S_{121}, S_{122}, S_{123}, S_{124}, S_{125}} que encontram-se conectados entre si por meio de 18 conexões. O sistema S_{12} também está conectado externamente com dois elementos {S_{113}, S_{114}, *H*} por meio de 5 conexões. A complexidade interna de S_{12} é dada pela soma da complexidade (quantidade de informação) de cada um de seus elementos.

$$\Gamma_i^E(S_{12}) = -\left[\Gamma_{S_{121},S_{123}} + \Gamma_{S_{122},S_{121}} + \Gamma_{S_{123},S_{122}} + \Gamma_{S_{123},S_{124}} + \Gamma_{S_{124},S_{121}} + \Gamma_{S_{125},S_{123}} + \Gamma_{S_{125},S_{124}}\right]$$

$$\Gamma_i^E(S_{12}) = -\left[\left(\frac{3}{18}\log_2\frac{3}{18}\right) + \left(\frac{2}{18}\log_2\frac{2}{18}\right) + \left(\frac{1}{18}\log_2\frac{1}{18}\right) + \left(\frac{4}{18}\log_2\frac{4}{18}\right) + \left(\frac{4}{18}\log_2\frac{4}{18}\right) + \left(\frac{2}{18}\log_2\frac{2}{18}\right) + \left(\frac{2}{18}\log_2\frac{2}{18}\right)\right] = 2{,}68$$

De maneira análoga a complexidade externa de S_{12} é dada por:

$$\Gamma_e^E(S_{12}) = -\left[\Gamma_{S_{122},S_{114}} + \Gamma_{S_{123},S_H} + \Gamma_{S_{123},S_{113}}\right]$$

$$\Gamma_e^E(S_{12}) = -\left[\left(\frac{1}{5}\log_2\frac{1}{5}\right) + \left(\frac{1}{5}\log_2\frac{1}{5}\right) + \left(\frac{3}{5}\log_2\frac{3}{5}\right)\right] = 1{,}37$$

Assim a complexidade do sistema S_{12} é dada por:

$$\Gamma^E(S_{12}) = 2{,}68 + 1{,}37 = 4{,}05\ bits$$

7.3.2 Complexidade Máxima

A complexidade de um sistema é máxima (Γ^M) quando todas as suas conexões ocorrem com a mesma frequência[28]. Isso equivale dizer que todos os elementos conectados do sistema possuem o mesmo número de conexões. Não há um limitante para o número de conexões que um elemento pode ter. Um elemento do sistema pode ter de *0* a *n* conexões. Contudo, considerando que todos os elementos conectados do sistema possuem o mesmo número de conexões a quantidade de informação por elemento, ou sua complexidade, é constante. Considere por exemplo um sistema que possui 2 elementos conectados conforme apresentado na Figura 7.12. O exemplo ilustra 4 configurações onde cada elemento possui 1 até 4 conexões.

[28] O Apêndice B apresenta discussão mais abrangente sobre a questão da quantidade de informação máxima.

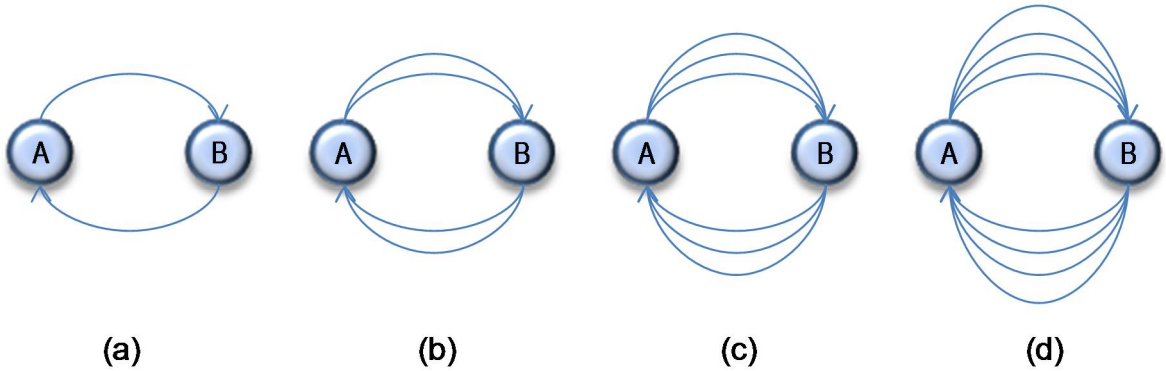


Figura 7.12 – Sistema com dois elementos conectados e 1 a 4 conexões por elemento

A complexidade de cada elemento dos sistemas é dada por:

Para *n*=1 (Figura 7.12a)

$$\Gamma_A = \Gamma_B = -\frac{1}{2}\log_2\frac{1}{2} = 0{,}5$$

Para *n*=2 (Figura 7.12b)

$$\Gamma_A = \Gamma_B = -\frac{2}{4}\log_2\frac{2}{4} = 0{,}5$$

Para *n*=3 (Figura 7.12c)

$$\Gamma_A = \Gamma_B = -\frac{3}{6}\log_2\frac{3}{6} = 0{,}5$$

Para *n*=4 (Figura 7.12d)

$$\Gamma_A = \Gamma_B = -\frac{4}{8}\log_2\frac{4}{8} = 0{,}5$$

Assim, de maneira independente do número de conexões que um sistema tenha, se elas encontram-se distribuídas uniformemente entre os elementos conectados então a complexidade é constante. Dessa maneira é possível determinar a complexidade máxima de um sistema e *n* elementos conectados de maneira independente no número de conexões entre os elementos. A complexidade máxima depende do número de conexões entre elementos do sistema. A Tabela 7.1 apresenta a complexidade de cada elemento e também a complexidade máxima do sistema para até 20 elementos conectados.

Tabela 7.1 – Complexidade máxima para até 20 elementos conectados

N. de elemento conectados	$\Gamma_{i,j}$	$\Gamma(S)$
2	0,500	1,000
3	0,528	1,585
4	0,500	2,000
5	0,464	2,322
6	0,431	2,585
7	0,401	2,807
8	0,375	3,000
9	0,352	3,170
10	0,332	3,322
11	0,314	3,459
12	0,299	3,585
13	0,285	3,700
14	0,272	3,807
15	0,260	3,907
16	0,250	4,000
17	0,240	4,087
18	0,232	4,170
19	0,224	4,248
20	0,216	4,322

A Figura 7.13 apresenta o comportamento da complexidade máxima na medida em que um sistema passa a ter mais elementos conectados.

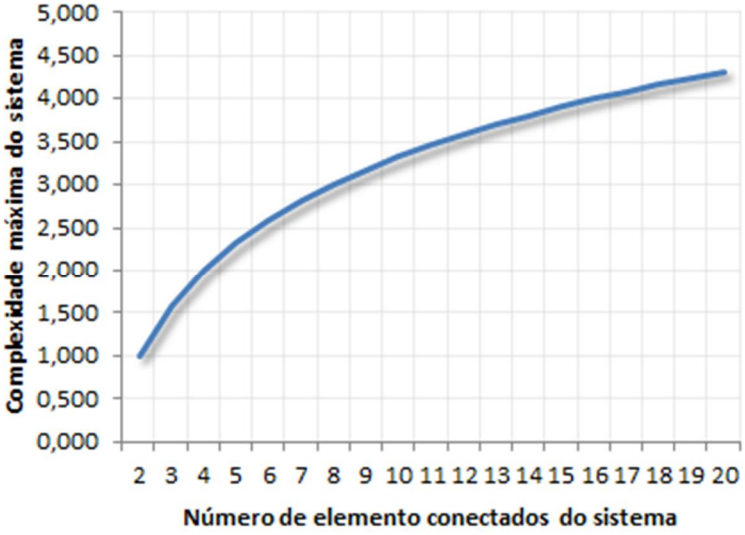


Figura 7.13 – Complexidade máxima para até 20 elementos conectados

É possível identificar que a contribuição de cada elemento para a complexidade do sistema diminui na medida em que o número de elementos conectados aumenta. A Figura 7.14 ilustra esse comportamento.

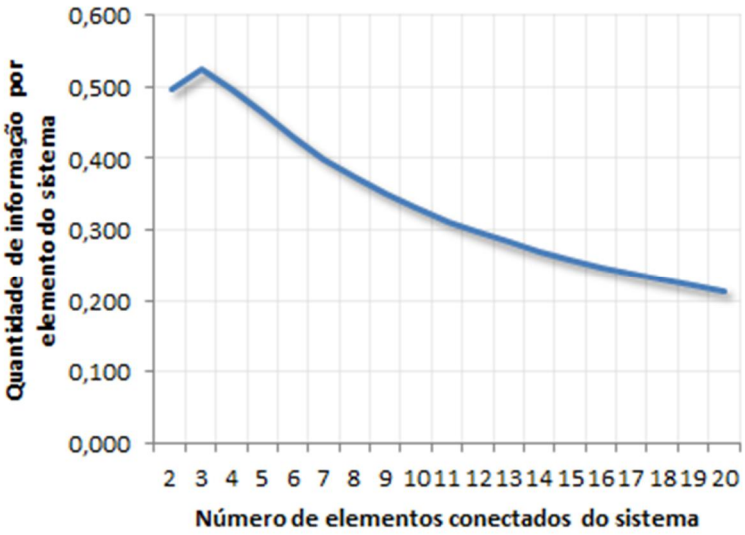


Figura 7.14 – Quantidade de informação por elemento para até 20 elementos conectados

Da mesma maneira com que ocorre com a complexidade efetiva, a complexidade máxima também é obtida pela soma da complexidade máxima interna e externa.

$$\Gamma^M(S) = \Gamma_i^M(S) + \Gamma_e^M(S) \tag{7.3}$$

Tomando como exemplo o sistema S_{12} apresentado na Figura 7.9 a complexidade máxima interna ocorreria caso as 18 conexões internas estivessem distribuídas igualmente pelos 7 elementos que se encontram conectados. Da mesma forma a complexidade máxima externa ocorreria caso as 5 conexões externas estivessem distribuídas entre os 3 elementos conectados. Assim a matriz de conexões assumiria a configuração apresentada na Figura 7.15.

											S_1							
									S_{11}				S_{12}				S_{13}	
			H	A	S_2	S_3	S_4	S_{111}	S_{112}	S_{113}	S_{114}	S_{121}	S_{122}	S_{123}	S_{124}	S_{125}	S_{131}	S_{132}	S_{133}
		H	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	5/3	0	0	0	1	0
		A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_1	S_{11}	S_{111}	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_{112}	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		S_{113}	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	5/3	0	0	0	0	0
		S_{114}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5/3	0	0	0	0	0	0
	S_{12}	S_{121}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18/7	0	18/7	0	0	0	0
		S_{122}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18/7	0	0	0	0	0
		S_{123}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18/7	0	0	0	18/7	0	0	0
		S_{124}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18/7	0	18/7	0	0	0
		S_{125}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	S_{13}	S_{131}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
		S_{132}	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
		S_{133}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Figura 7.15 – Matriz de conexões da Figura 7.9 com as freqüências das conexões de S_{12}

Partindo-se dessa distribuição de frequências a complexidade interna máxima é dada por:

$$\Gamma_i^M(S_{121}) = \Gamma_i^M(S_{122}) = \Gamma_i^M(S_{124}) = -\left(\frac{\frac{18}{7}}{18}\log_2\frac{\frac{18}{7}}{18}\right) = 0{,}4$$

$$\Gamma_i^M(S_{123}) = \Gamma_i^M(S_{125}) = = -2 * \left(\frac{\frac{18}{7}}{18}\log_2\frac{\frac{18}{7}}{18}\right) = 0{,}8$$

$$\Gamma_i^M(S_{12}) = 2{,}8$$

Da mesma forma, a complexidade externa máxima ocorre quando:

$$\Gamma_e^M(S_{12}) = -\left(\frac{\frac{5}{3}}{5}\log_2\frac{\frac{5}{3}}{5}\right) = 0{,}53$$

$$\Gamma_e^M(S_{12}) = -2 * \left(\frac{\frac{5}{3}}{5}\log_2\frac{\frac{5}{3}}{5}\right) = 1{,}06$$

$$\Gamma_e^M(S_{12}) = 1{,}59$$

Os resultados da complexidade máxima interna e externa estão coerentes com os valores apresentados na Tabela 7.1. Assim a complexidade máxima do sistema S_{12} é dada por:

$$\Gamma^M(S_{12}) = \Gamma_i^M(S_{12}) + \Gamma_e^M(S_{12}) = 2{,}8 + 1{,}59 = 4{,}39\ bits$$

7.3.3 Escopo do Sistema

A definição do sistema de interesse, ou seja, a definição dos limites do sistema foi discutida no Capítulo 2. Esta definição tem consequência direta no cálculo da complexidade do sistema. No exemplo desenvolvido na seção anterior, o qual utilizou a matriz apresentada na Figura 7.9, o sistema S_{12} foi considerado como sendo o objeto de interesse, enquanto que os demais sistemas modelados na matriz foram tratados como elementos externos. Contudo, o sistema de interesse poderia ter sido S_1. Neste caso o escopo do sistema seria S_1 = {S_{111}, S_{112}, S_{113}, S_{114}, S_{121}, S_{122}, S_{123}, S_{124}, S_{125}, S_{131}, S_{132}, S_{133}}.

A complexidade do sistema depende do escopo estabelecido para o mesmo. A adição de um novo elemento implica necessariamente em novo cálculo da complexidade. A complexidade pela abordagem adotada é uma propriedade do todo. Não há uma propriedade aditiva que permita que a complexidade de vários sistemas seja calculada em separado e posteriormente adicionada. O todo é diferente da soma das partes.

Se o objeto de interesse é S_1, então é necessário que todos os sistemas que o compõe sejam considerados em conjunto. Neste caso a complexidade de S_1 não é a soma das complexidades de S_{11}, S_{12} e S_{13}

Para haver uniformidade na maneira de se medir a complexidade é importante que sejam observados alguns critérios:

a) A medida da complexidade pode ser feita em qualquer nível da estrutura de decomposição hierárquica da arquitetura de um sistema. Contudo, recomenda-se que seja usado como referência o nível mais baixo da estrutura hierárquica do sistema, ou seja, a que apresenta maior detalhamento. Por exemplo, os elementos considerados no escopo do sistema S_{12} são S_{121}, S_{122}, S_{123}, S_{124} e S_{125}, enquanto que para S_1 são considerados S_{111}, S_{112}, S_{113}, S_{114}, S_{121}, S_{122}, S_{123}, S_{124}, S_{125}, S_{131}, S_{132} e S_{133}.

b) Um sistema pode ser considerado como uma unidade, ou seja, sem que haja a necessidade de detalhamento das suas conexões internas, como acontece com S_2, S_3 e S_4. Neste caso $\Gamma_i = 0$ uma vez que só as conexões externas influenciam no cálculo da complexidade.

7.3.4 Representação da Complexidade

A quantidade de informação referente à complexidade efetiva das conexões entre os elementos de S_{12} é representada na matriz apresentada na Figura 7.16.

			S_{121}				
			S_{121}	S_{122}	S_{123}	S_{124}	S_{125}
		H	0	0	0,46	0	0
		A	0	0	0	0	0
		S_2	0	0	0	0	0
		S_3	0	0	0	0	0
		S_4	0	0	0	0	0
S_1	S_{11}	S_{111}	0	0	0	0	0
		S_{112}	0	0	0	0	0
		S_{113}	0	0	0,44	0	0
		S_{114}	0	0,46	0	0	0
	S_{12}	S_{121}	0	0,35	0	0,48	0
		S_{122}	0	0	0,23	0	0
		S_{123}	0,43	0	0	0	0,35
		S_{124}	0	0	0,48	0	0,35
		S_{125}	0	0	0	0	0
	S_{13}	S_{131}	0	0	0	0	0
		S_{132}	0	0	0	0	0
		S_{133}	0	0	0	0	0

Figura 7.16 – Matriz com a complexidade efetiva dos elementos de S_{12}

A partir do valor da complexidade efetiva é possível representá-la em relação a complexidade máxima correspondente. Para tanto duas abordagens são adotadas. A primeira relaciona a complexidade interna e externa (efetiva) com seus respectivos máximos. A segunda compara o valor da complexidade efetiva com a complexidade máxima.

Tomando como referência o sistema S_{12} os valores correspondentes à complexidade máxima são:

$$\Gamma_i^M(S_{12}) = 2{,}8$$
$$\Gamma_e^M(S_{12}) = 1{,}59$$
$$\Gamma^M(S_{12}) = \Gamma_i^M(S_{12}) + \Gamma_e^M(S_{12}) = 4{,}39$$

Já os valores correspondentes à complexidade efetiva são:

$$\Gamma_i^E(S_{12}) = 2{,}68$$
$$\Gamma_e^E(S_{12}) = 1{,}37$$
$$\Gamma^E(S_{12}) = \Gamma_i^E(S_{12}) + \Gamma_e^E(S_{12}) = 4{,}05$$

A Figura 7.17 apresenta um plano cartesiano utilizado representando os valores das componentes da complexidade efetiva em relação aos máximos correspondentes. Os valores obtidos para a complexidade interna e externa encontram-se próximos aos seus respectivos máximos, o que leva a complexidade se posicionar no último quadrante. Tal cenário caracteriza uma complexidade alta para o sistema.

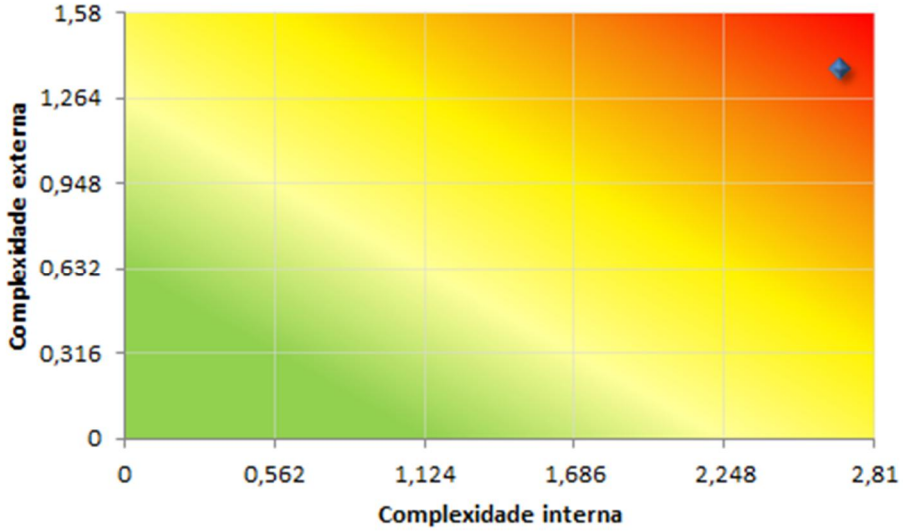


Figura 7.17 – Relação entre a complexidade interna e externa de S_{12} e correspondentes máximos

Comparando-se o valor da complexidade efetiva ($\Gamma^E(S_{12})$ = 4,05) com o da complexidade máxima (Figura 7.18) também é possível observar que a complexidade do sistema como um todo é alta, encontrando-se no nível 5.

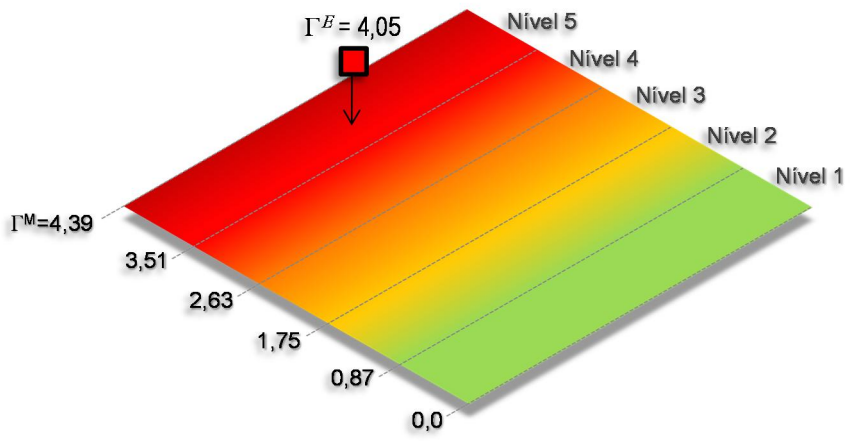


Figura 7.18 – Relação entre a complexidade de S_{12} e correspondente máximo

7.4 ACOPLAMENTO

O acoplamento é uma medida da força da conexão entre elementos de um sistema. Uma vez que existe conexão entre os elementos também existe acoplamento entre eles. Quanto maior a força da conexão entre os elementos, maior é o seu acoplamento[29].

A força da conexão é determinada em função do seu fator de acoplamento (ϕ). O fator de acoplamento consiste em um índice oriundo de diferentes características consideradas relevantes para a determinação do acoplamento de um sistema. Estas características podem ser colocadas em dois grandes grupos: acumulativas e não-acumulativas.

Algumas das características que influenciam o acoplamento de um sistema podem ocorrer de maneira simultânea em uma determinada conexão. Por exemplo, Stevens, Myers e Constantine (1974) propõem que existem 5 tipos de acoplamento no contexto de software: Dados, Identificação, Controle, Comum e de Conteúdo. Neste caso dois elementos de software (módulos) podem estar acoplados somente

[29] O Capítulo 4 discute os principais conceitos utilizados, tipos de acoplamento bem como diferentes maneiras para medi-lo.

pela passagem de dados, mas também podem apresentar acoplamento de dados e de conteúdo. Este tipo de característica é denominada acumulativa.

De outra maneira, existem características que influenciam o acoplamento de um sistema que são excludentes entre si. Do ponto de vista temporal uma conexão que possui a necessidade de sincronismos na comunicação entre elementos implica em acoplamento mais forte do que outra que pode ocorrer de maneira assíncrona. Tais características ocorrem de uma forma ou de outra. Este tipo de característica é denominada não-acumulativa.

Cada projeto pode apresentar diferentes características de acoplamento. Definir um conjunto de características de acoplamento *a priori* pode induzir ao erro de se desconsiderar aspectos relevantes do projeto. Sendo assim, a definição das características de acoplamento é feita por julgamento de engenharia. A criação de critérios para a seleção de características de acoplamento pode ser objeto de pesquisa futura.

7.4.1 Características de Acoplamento e Fator de Acoplamento

Define-se por C o conjunto de todas as características de acoplamento consideradas relevantes para um determinado sistema. Cada característica possui um peso relativo às demais o qual é denominado fator de acoplamento (ϕ). Quanto maior o acoplamento representado por uma característica maior o fator de acoplamento.

Seja $C = \{C_1, C_2, ..., C_n\}$ o conjunto das características de acoplamento identificadas para um sistema. Cada característica de C corresponde um fator de acoplamento ϕ, tal que $C_i \leftarrow \phi_i$. Os valores de ϕ devem obedecer aos seguintes critérios:

a) Cada característica em C recebe um fator de acoplamento único.
b) O valor de ϕ não se repete para as características em C.
c) Os valores de ϕ são atribuídos de maneira decrescente da característica associada ao acoplamento mais forte para a de menor força.

d) Caso exista mais de uma conexão entre dois elementos do sistema, o fator de acoplamento é dado pela soma dos fatores de acoplamento correspondentes às características de acoplamento presentes em cada uma das conexões.

e) A soma dos fatores de acoplamento deve ser 1 para qualquer número de características identificadas em *C*[30]. Dessa maneira:

$$\sum_{i=1}^{n} \phi_i = 1 \tag{7.4}$$

Onde *n* é o número de características de acoplamento identificadas para o sistema.

Para efeito desta Tese adotou-se o critério apresentado na Eq. 7.5 para a atribuição de valores para os fatores de acoplamento. Tal critério é aplicável tanto para as características de acoplamento acumulativas quanto as não-acumulativas.

$$C \leftarrow \phi = \{C_1 \leftarrow \phi_1, C_2 \leftarrow \phi_2, \dots, C_n \leftarrow \phi_n\} = \cdots$$
$$\dots = \{C_1 \leftarrow \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} i}, C_2 \leftarrow \frac{n-1}{\sum_{i=1}^{n} i}, \dots, C_n \leftarrow \frac{n-(n-1)}{\sum_{i=1}^{n} i}\} \tag{7.5}$$

f) Expandindo o conceito apresentado na eq. 7.4, a soma dos fatores de acoplamento acumulativos deve ser 1 assim como a soma dos fatores de acoplamento não acumulativos, para qualquer número de características identificadas em *C*. Dessa maneira

$$\sum \phi_A = \sum \phi_{NA} = 1 \tag{7.6}$$

g) O fator de acoplamento de uma conexão é dado pela soma dos correspondentes fatores de acoplamento acumulativo e não-acumulativo.

$$\phi = \phi_A + \phi_{NA} \tag{7.7}$$

[30] A escolha pelo valor 1 é arbitrária, podendo ser utilizado qualquer outro valor de referência, desde que respeitados os demais critérios.

h) Se C_A = {C_{A1}, C_{A2}, ... , C_{An}} é o conjunto das características acumulativas relevantes para o acoplamento de um sistema *S*, onde C_{Ai} corresponde a um ϕ_{Ai}, então o fator acoplamento da conexão entre dois elementos quaisquer de *S* é dado pela soma dos fatores de acoplamento daquela conexão.

$$\phi_A = \sum_{i=1}^{n} \phi_{Ai} \tag{7.8}$$

i) Se C_{NA} = {C_{NA1}, C_{NA2}, ..., C_{Nam}} é o conjunto das características não-acumulativas relevantes para o acoplamento de um sistema, então ϕ_{NA} é dado pela característica de acoplamento não acumulativa que ocorre em uma determinada conexão.

$$\phi_{NA} = \phi_{NA_i} \tag{7.9}$$

7.4.2 Fator de Acoplamento Máximo

O fator de acoplamento máximo para características acumulativas (ϕ_A^M) ocorre quando todas as características identificadas estão presentes na conexão entre dois elementos do sistema. Neste caso o valor máximo é 1, em decorrência da convenção estabelecida na eq. 7.4.

$$\phi_A^M = 1 \tag{7.10}$$

Já o fator de acoplamento máximo para características não-acumulativas (ϕ_{NA}^M) corresponde ao valor da característica de maior peso.

$$\phi_{NA}^M = Max(\phi_{NA1}, \phi_{NA2}, \dots, \phi_{NAn}) \tag{7.11}$$

Dessa maneira, o fator acoplamento máximo de uma conexão, tendo como referência a eq. 7.9, é dado por:

$$\phi^M = \phi_A^M + \phi_{NA}^M \tag{7.12}$$

Tomando como exemplo um sistema em que tenham sido identificadas 4 características de acoplamento de interesse, $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, e aplicando o critério definido na eq. 7.5 os fatores de acoplamento correspondentes são $\phi_1 = 0{,}4$, $\phi_2 = 0{,}3$, $\phi_3 = 0{,}2$ e $\phi_4 = 0{,}1$. Neste caso, o acoplamento máximo das características acumulativas é dado por:

$$\phi_A^M = \sum_{i=1}^{n} \phi_i = 1$$

Quanto as características não acumulativas o máximo é dado por:

$$\phi_{NA}^M = Max(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = 0{,}4$$

Sendo que:

$$\phi_{NA}^M \leq 1 \; \forall \phi \mid Max(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n) \qquad (7.13)$$

Considerando que o critério da eq. 7.5 tenha sido adotado é possível obter uma aproximação melhor para o valor do fator de acoplamento não-acumulativo máximo[31]. No caso, o valor máximo ocorre quando só uma característica de acoplamento é considerada.

$$\phi_{NA}^M = 1 \; \forall \phi \mid Max(\phi_1) \qquad (7.14)$$

Assim, considerando as condições expostas o fator de acoplamento máximo é dado por:

$$\phi^M = 2$$

Considerando um conjunto composto de 1 a 20 características de acoplamento acumulativas e não-acumulativas, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{20}\}$, o fator de acoplamento máximo assume o comportamento apresentado na Tabela 7.1 e na Figura 7.19.

[31] O critério estabelecido na eq. 7.6 será utilizado como referência para a definição dos valores dos fatores de acoplamento. Caso seja outro critério o mesmo será explicitado.

Tabela 7.2 – Fator máximo de acoplamento para *C* = [1, 20]

Número de características de interesse	Fator de acoplamento não-acumulativo máximo	Fator de acoplamento acumulativo máximo	Fator máximo de acoplamento
1	1,000	1	2,000
2	0,667	1	1,667
3	0,500	1	1,500
4	0,400	1	1,400
5	0,333	1	1,333
6	0,286	1	1,286
7	0,250	1	1,250
8	0,222	1	1,222
9	0,200	1	1,182
10	0,182	1	1,182
11	0,167	1	1,167
12	0,154	1	1,154
13	0,143	1	1,143
14	0,133	1	1,133
15	0,125	1	1,125
16	0,118	1	1,118
17	0,111	1	1,111
18	0,105	1	1,105
19	0,100	1	1,100
20	0,095	1	1,095

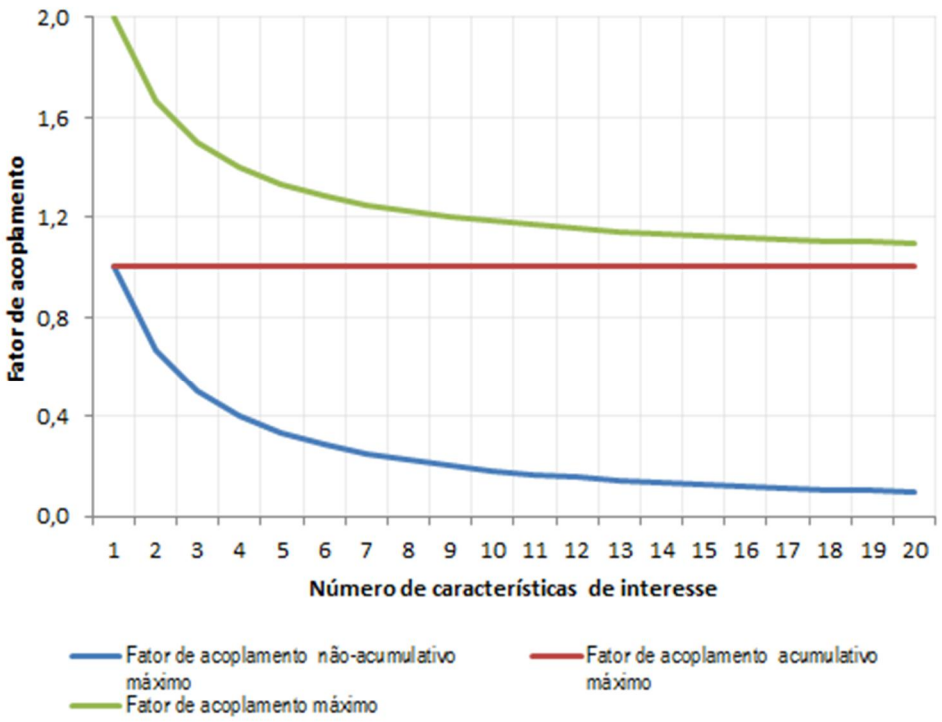


Figura 7.19 – Fator de acoplamento máximo para *C* = [1, 20]

7.4.3 Medida do Acoplamento

O acoplamento, ou acoplamento efetivo (Φ^E), é uma medida da força da conexão entre elementos de um sistema. Esta força pode ser determinada pela aplicação do fator de acoplamento de uma conexão sobre a quantidade de informação correspondente, ou seja, a sua complexidade. Dessa maneira o acoplamento entre dois elementos é dada por:

$$\Phi^E\,(S) = \sum_{i,j=1}^{n} \Gamma_{i,j}^{E}(S) * \phi_{i,j} \qquad (7.15)$$

Onde:

- $\Phi^E(S)$ é o acoplamento efetivo do sistema *S*.
- $\Gamma_{i,j}^{E}(S)$ é a complexidade efetiva de cada conexão de *S*.
- $\phi_{i,j}$ é o fator de acoplamento aplicado a cada conexão em *S*.
- *n* é o número de conexões de *S*.

O acoplamento de um sistema, ou acoplamento efetivo (Φ^E), é dado pela soma de dois tipos de acoplamento, o interno (Φ_i) e o externo (Φ_e). Enquanto que o acoplamento interno considera as conexões entre os elementos internos ao sistema, o acoplamento externo considera as conexões entre os elementos do sistema sendo medido e elementos de outros sistemas.

$$\Phi^E(S) = \Phi_i(S) + \Phi_e(S) = \sum_{i,j=1}^{n}\left(\Gamma_{i_{i,j}}^{E} * \phi_{i_{i,j}}\right) + \sum_{i,j=1}^{n}\left(\Gamma_{e_{i,j}}^{E} * \phi_{e_{i,j}}\right) \qquad (7.16)$$

Considere por exemplo o sistema S_{12} cujas conexões entre elementos são representadas na matriz da Figura 7.9. As características de acoplamento relevantes para o sistema são, por exemplo, *C* = {*Síncrono*, *Assíncrono*}. Tais características são do tipo não-acumulativas, uma vez que a conexão entre dois elementos ocorre de maneira síncrona ou assíncrona. Usando o critério da eq. 7.5 para atribuir valores aos fatores de acoplamento tem-se:

C(*Síncrono*) = 0,66
C(*Assíncrono*) = 0,33

Tal alocação de valores se justifica, pois elementos de um sistema que interagem de maneira síncrona possuem maior acoplamento do que aqueles que interagem sem restrições temporais rígidas.

É necessário determinar na matriz quais conexões possuem comunicação síncrona e quais se realizam de maneira assíncrona. A Figura 7.20 apresenta um extrato da matriz da Figura 7.9 destacando somente as conexões de interesse, no caso, as relacionadas ao sistema S_{12}. As células com a indicação da letra A correspondem às conexões cuja interação entre elementos se dá de maneira assíncrona, enquanto que as células com a indicação da letra S correspondem às conexões referentes às interações síncronas.

			S_1				
			S_{12}				
			S_{121}	S_{122}	S_{123}	S_{124}	S_{125}
		H	0	0	**A**	0	0
		A	0	0	0	0	0
		S_2	0	0	0	0	0
		S_3	0	0	0	0	0
		S_4	0	0	0	0	0
S_1	S_{11}	S_{111}	0	0	0	0	0
		S_{112}	0	0	0	0	0
		S_{113}	0	0	**A,S,S**	0	0
		S_{114}	0	**A**	0	0	0
	S_{12}	S_{121}	0	**A,S**	0	**A,A,A,A**	0
		S_{122}	0	0	**S**	0	0
		S_{123}	**A,A,S**	0	0	0	**A,S**
		S_{124}	0	0	**A,A,A,A**	0	**A,A**
		S_{125}	0	0	0	0	0
	S_{13}	S_{131}	0	0	0	0	0
		S_{132}	0	0	0	0	0
		S_{133}	0	0	0	0	0

Figura 7.20 – Características de acoplamento do sistema S_{12}

Com essa informação é possível determinar o acoplamento do sistema. O acoplamento interno é dado por:

$$\Phi_i = \left(\Gamma^E_{S_{121},S_{123}} * \phi_{S_{121},S_{123}}\right) + \left(\Gamma^E_{S_{122},S_{121}} * \phi_{S_{122},S_{121}}\right) + \left(\Gamma^E_{S_{123},S_{122}} * \phi_{S_{123},S_{122}}\right) + \left(\Gamma^E_{S_{123},S_{124}} * \phi_{S_{123},S_{124}}\right) + \left(\Gamma^E_{S_{124},S_{121}} * \phi_{S_{124},S_{121}}\right) + \left(\Gamma^E_{S_{125},S_{123}} * \phi_{S_{125},S_{123}}\right) + \left(\Gamma^E_{S_{125},S_{124}} * \phi_{S_{125},S_{124}}\right)$$

$$\Gamma^E_{S_{121},S_{123}} * \phi_{S_{121},S_{123}} = -\left[\left(\frac{3}{18}\log_2\frac{3}{18}\right) * 0{,}33 * 2 + \left(\frac{3}{18}\log_2\frac{3}{18}\right) * 0{,}66\right] = 0{,}56$$

$$\Gamma^E_{S_{122},S_{121}} * \phi_{S_{122},S_{121}} = -\left[\left(\frac{2}{18}\log_2\frac{2}{18}\right) * 0{,}33 + \left(\frac{2}{18}\log_2\frac{2}{18}\right) * 0{,}66\right] = 0{,}34$$

$$\Gamma^E_{S_{123},S_{122}} * \phi_{S_{123},S_{122}} = -\left[\left(\frac{1}{18}\log_2\frac{1}{18}\right) * 0{,}66\right] = 0{,}15$$

$$\Gamma^E_{S_{123},S_{124}} * \phi_{S_{123},S_{124}} = -\left[\left(\frac{4}{18}\log_2\frac{4}{18}\right) * 0{,}33 * 4\right] = 0{,}64$$

$$\Gamma^E_{S_{124},S_{121}} * \phi_{S_{124},S_{121}} = -\left[\left(\frac{4}{18}\log_2\frac{4}{18}\right) * 0{,}33 * 4\right] = 0{,}64$$

$$\Gamma^E_{S_{125},S_{123}} * \phi_{S_{125},S_{123}} = -\left[\left(\frac{2}{18}\log_2\frac{2}{18}\right) * 0{,}33 + \left(\frac{2}{18}\log_2\frac{2}{18}\right) * 0{,}66\right] = 0{,}34$$

$$\Gamma^E_{S_{125},S_{124}} * \phi_{S_{125},S_{124}} = -\left[\left(\frac{2}{18}\log_2\frac{2}{18}\right) * 0{,}33 * 2\right] = 0{,}22$$

$$\therefore$$

$$\Phi_i = 2{,}80$$

O acoplamento externo é dado por:

$$\Phi_e = \left(\Gamma^E_{S_{122},S_{114}} * \phi_{S_{122},S_{114}}\right) + \left(\Gamma^E_{S_{123},H} * \phi_{S_{123},H}\right) + \left(\Gamma^E_{S_{123},S_{113}} * \phi_{S_{123},S_{113}}\right)$$

$$\Gamma^E_{S_{122},S_{114}} * \phi_{S_{122},S_{114}} = -\left[\left(\frac{1}{5}\log_2\frac{1}{5}\right) * 0{,}33\right] = 0{,}15$$

$$\Gamma^E_{S_{123},H} * \phi_{S_{123},H} = -\left[\left(\frac{1}{5}\log_2\frac{1}{5}\right) * 0{,}33\right] = 0{,}15$$

$$\Gamma^E_{S_{123},S_{113}} * \phi_{S_{123},S_{113}} = -\left[\left(\frac{3}{5}\log_2\frac{3}{5}\right) * 0{,}33 + \left(\frac{3}{5}\log_2\frac{3}{5}\right) * 0{,}66 * 2\right] = 0{,}72$$

$$\therefore$$

$$\Phi_e = 1{,}02$$

O acoplamento efetivo de S_{12} é:

$$\Phi^E = 2{,}80 + 1{,}02 = 3{,}82\ bits$$

7.4.4 Acoplamento Máximo

Um sistema possui acoplamento máximo quando a sua complexidade e fator de acoplamento também são máximos.

$$\Phi^M(S) = \Gamma^M(S) * \phi^M \tag{7.17}$$

A complexidade depende do número de conexões entre elementos do sistema. Já o fator de acoplamento depende do número de características de acoplamento identificadas. O fator de acoplamento é máximo quando todas as características de acoplamento acumulativas estiverem presentes e houver somente uma característica de acoplamento não-acumulativa. Neste caso o fator de acoplamento máximo é 2, uma vez que ϕ_A = 1 e ϕ_{NA} = 1, pela convenção estabelecida na Eq. 7.6. A partir desse dado é possível determinar o acoplamento máximo do sistema para qualquer número de elementos. A Figura 7.21 apresenta o acoplamento máximo para sistemas com até 20 elementos e fator de acoplamento máximo.

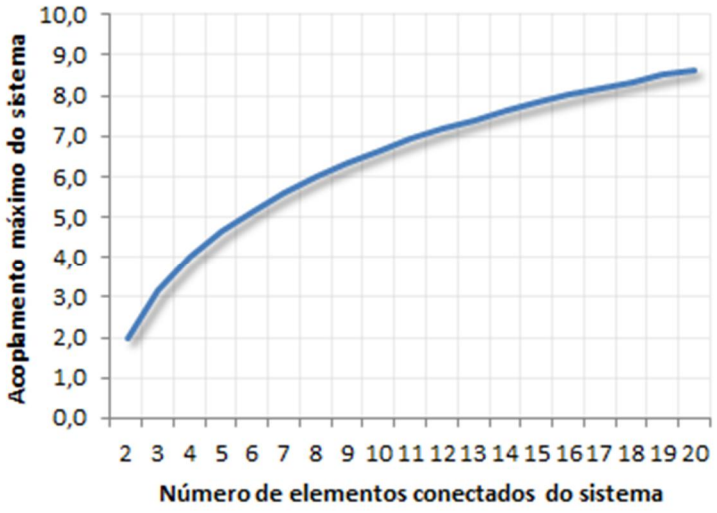


Figura 7.21 – Acoplamento máximo para sistemas com [2,20] elementos e uma característica de acoplamento acumulativo e uma não-acumulativa

A contribuição de cada elemento para o acoplamento do sistema é ilustrado na Figura 7.22. Neste caso considera-se que a complexidade do sistema é máxima, ou seja, seus elementos possuem o mesmo número de conexões (Figura 7.14) e o fator de acoplamento também é máximo. O fator de acoplamento assume seu valor máximo quando $\phi = 2$.

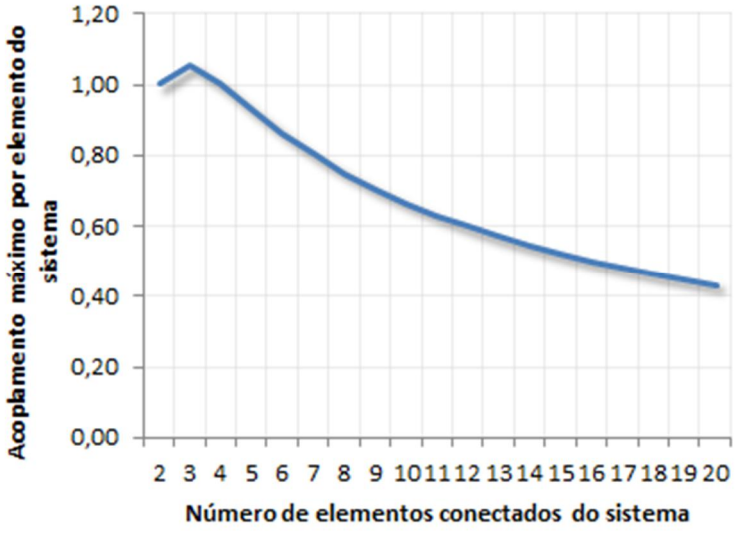


Figura 7.22 – Acoplamento por elemento para sistema com [2,20] elementos

7.4.5 Representação do Acoplamento

O acoplamento efetivo referente às conexões dos elementos de S_{12} é representada na matriz apresentada na Figura 7.23.

Considerando o valor do acoplamento é possível representá-lo em relação ao acoplamento máximo correspondente. Para tanto duas abordagens são adotadas. A primeira relaciona o acoplamento interno e externo (nominal) com seus respectivos máximos. A segunda compara o valor do acoplamento com o acoplamento máximo.

O acoplamento máximo ocorre quando a complexidade e o fator de acoplamento são máximos. Tomando como referência o sistema S_{12} apresentado na Figura 7.9 o acoplamento interno máximo é dado por:

$$\Phi_i^M(S_{12}) = \Gamma_i^M(S_{12}) * \phi^M = 2{,}8 * 2 = 5{,}6$$

O acoplamento externo máximo é dado por

$$\Phi_e^M(S_{12}) = \Gamma_e^M(S_{12}) * \phi^M = 1{,}59 * 2 = 3{,}18$$

A Figura 7.24 apresenta um plano cartesiano utilizado para representar os valores das componentes do acoplamento em relação aos máximos correspondentes.

			S_{121}				
			S_{121}	S_{122}	S_{123}	S_{124}	S_{125}
		H	0	0	0,15	0	0
		A	0	0	0	0	0
		S_2	0	0	0	0	0
		S_3	0	0	0	0	0
		S_4	0	0	0	0	0
S_1	S_{11}	S_{111}	0	0	0	0	0
		S_{112}	0	0	0	0	0
		S_{113}	0	0	0,72	0	0
		S_{114}	0	0,15	0	0	0
	S_{12}	S_{121}	0	0,34	0	0,64	0
		S_{122}	0	0	0,15	0	0
		S_{123}	0,56	0	0	0	0,34
		S_{124}	0	0	0,64	0	0,12
		S_{125}	0	0	0	0	0
	S_{13}	S_{131}	0	0	0	0	0
		S_{132}	0	0	0	0	0
		S_{133}	0	0	0	0	0

Figura 7.23 – Matriz com o acoplamento efetivo dos elementos de S_{12}

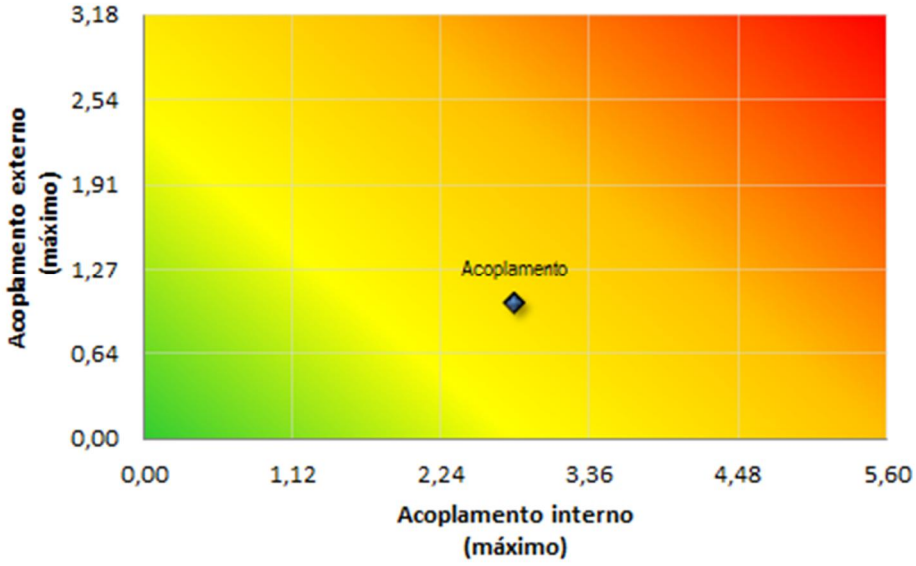


Figura 7.24 – Relação entre o acoplamento interno e externo de S_{12} e correspondentes máximos

O gráfico da Figura 7.24 evidencia que o sistema S_{12} possui acoplamento interno baixo, bem como o acoplamento externo. É possível observar também que o acoplamento interno e interno encontram-se no nível 3 da escala de acoplamento. O acoplamento máximo do sistema é:

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 5{,}6 + 3{,}18 = 8{,}78\ bits$$

Comparando-se o valor do acoplamento efetivo (Φ = 3,82) com o do acoplamento máximo (Figura 7.25) observa-se que o sistema como um todo possui acoplamento nível 3.

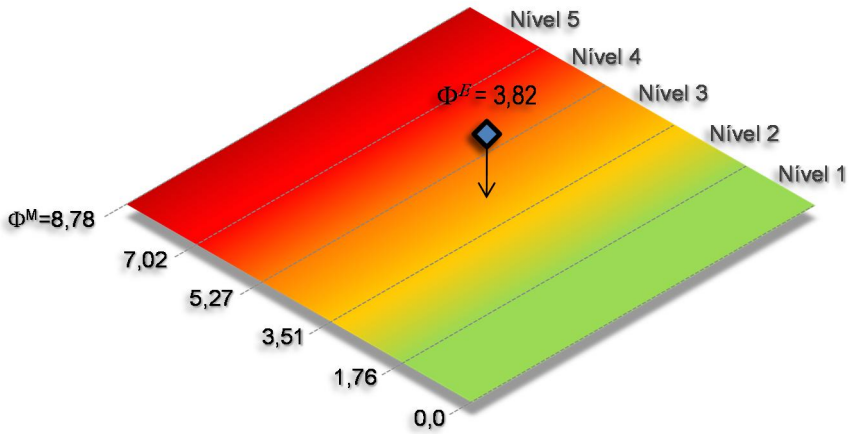


Figura 7.25 – Relação entre o acoplamento de S_{12} e correspondente máximo

7.5 CRITICALIDADE

A criticalidade está associada aos efeitos provocados pelas condições de falha identificadas para um sistema. Dessa maneira quanto mais grave o efeito associado a uma condição de falha maior é a sua criticalidade. A forma de se classificar tais efeitos pode variar dependendo do contexto considerado. A *Advisory Circular* (AC) 25.1309 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002) publicada pelo FAA e EASA, por exemplo, estabelece que os efeitos de condições de falha identificadas em sistemas embarcados de emprego aeronáutico devam ser classificados em[32]:

a) Catastrófico
b) Hazardous
c) Maior
d) Menor
e) Sem impacto em segurança

A identificação de condições de falha e classificação de seus efeitos é tarefa mandatória no desenvolvimento de sistemas críticos quanto à segurança, sendo apoiada, em geral, pela utilização de técnicas como FMEA, FMECA, HAZOP, FTA etc. Tal tarefa precisa levar em consideração falhas específicas do sistema e também aquelas oriundas da interface com outros sistemas. Neste caso é importante observar que a falha de um sistema não pode implicar em uma condição de falha pior do que a pior condição de falha identificada para os sistemas que possui interface.

Seja por exemplo os sistemas A e B representados na Figura 7.26. Os sistemas A e B têm associados a eles condições de falha catastrófica e menor, respectivamente. No caso da Figura 7.26(a) a conexão ocorre de A para B. Dessa maneira, mesmo que aconteça uma falha no sistema A o efeito de uma possível propagação da falha para o sistema B não pode ser superior à classificação menor. Já na Figura 7.26(b) o sentido da conexão é invertido. Assim, o efeito de uma falha no sistema B, apesar de ser ordem menor, pode contribuir para uma falha catastrófica em A.

[32] A classificação das condições de falha é discutida no Capítulo 6.

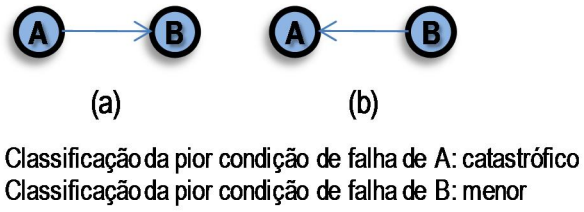


Figura 7.26 – Conexão entre elementos com classificação de condições de falha diferentes

Apesar dos atuais regulamentos aeronáuticos pedirem a realização de análises de propagação de falhas não há indicação de procedimentos analíticos para tal fim. A abordagem apresentada nas próximas seções assume que as atividades para a identificação das condições de falha e sua classificação foram realizadas. A partir dessa classificação é calculado o índice de criticalidade das conexões do sistema.

7.5.1 Criticalidade das Conexões de um Sistema

Define-se por K o conjunto de todas as classificações das condições de falha adotadas para um determinado sistema. Cada classificação possui um peso relativo as demais o qual é denominado fator de criticalidade (λ). Quanto maior a criticalidade associada a uma determinada condição de falha maior o fator de criticalidade.

Seja $K = \{K_1, K_2, ..., K_n\}$ o conjunto das classificações das condições de falha identificadas para um sistema. Cada classificação em K corresponde um fator de criticalidade λ, tal que $K_i \leftarrow \lambda_i$. Os valores de λ devem obedecer aos seguintes critérios:

a) Cada classificação de condição de falha em K recebe um fator de criticalidade único.
b) O valor do fator de criticalidade não se repete para as classificações em K.
c) Os valores dos fatores de criticalidade são atribuídos de maneira decrescente da classificação associada à pior condição de falha para a de menor impacto.

d) A soma dos fatores de criticalidade deve ser 1 para qualquer número de classificações de condições de falha identificadas em *K*[33]. Dessa maneira:

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \tag{7.18}$$

Para efeito desta Tese adotou-se o seguinte critério para a atribuição de fatores de criticalidade ao conjunto de classificações de condições de falha de um sistema.

$$K \leftarrow \lambda = \{K_1 \leftarrow \lambda_1, K_2 \leftarrow \lambda_2, \dots, K_n \leftarrow \lambda_n\} = \cdots$$
$$\dots = \{K_1 \leftarrow \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} i}, K_2 \leftarrow \frac{n-1}{\sum_{i=1}^{n} i}, \dots, K_n \leftarrow \frac{n-(n-1)}{\sum_{i=1}^{n} i}\} \tag{7.19}$$

A criticalidade de uma determinada conexão (Λ) é um indicador do nível de integridade da conexão entre dois elementos. Seu valor é obtido pela relação entre o fator de criticalidade do sistema consumidor pelo fator de criticalidade do sistema produtor.

$$\Lambda_{\mathrm{i,j}} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \tag{7.20}$$

Onde:

i é o índice correspondente ao elemento produtor

j é o índice correspondente ao elemento consumidor

Os valores de Λ podem cair em três categorias:

a) $\Lambda < 1$ – indica que a conexão tem baixa criticalidade.
b) $\Lambda = 1$ – indica que a criticalidade da conexão está equalizada.
c) $\Lambda > 1$ – indica que a conexão tem alta criticalidade

O conceito de criticalidade da conexão aplica-se tanto para conexões internas aos sistemas quanto às conexões externas. Uma vez que a conexão entre sistemas e

[33] A escolha pelo valor 1 é arbitrária, podendo ser utilizado qualquer outro valor de referência.

ambiente/ seres humanos não é detalhada nesta Tese, optou-se por adotar uma abordagem mais conservativa com relação ao fator de criticalidade. Dessa forma fica assumido que tanto ambiente quanto seres humanos podem provocar eventos catastróficos de maneira independente do tipo de conexão com os sistemas. A criação de modelos de confiabilidade humana e de ambiente, por exemplo, poderiam ser utilizados para determinar de maneira mais precisa os efeitos de falhas oriundas dessas conexões.

7.5.2 Fator de Criticalidade Máxima e Criticalidade Máxima

Uma vez que os fatores de criticalidade não são acumulativos, o fator de criticalidade máximo é aquele associado a classificação da pior condição de falha em *K*.

$$\lambda^M = Max(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \tag{7.21}$$

O fator de criticalidade torna-se maior quanto mais classificações para as condições de falha forem utilizadas. Para efeito desta Tese é utilizado como referência a classificação de condições de falha proposta na AC 25.1309 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002), ou seja, *K* = {catastrófico, *hazardous*, maior, menor, sem efeito em segurança}. Assim, os fatores de criticalidade correspondentes, conforme critério definido na eq. 7.19, são λ_1 = 0,33, λ_2 = 0,26, λ_3 = 0,20, λ_4 = 0,13 e λ_5 = 0,07. Neste caso:

$$\lambda^M = Max(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) = 0{,}33$$

É possível também estabelecer o fator de criticalidade mínimo, o qual é associado a classificação da condição de falha com menor efeito em segurança em *K*.

$$\lambda^m = Min(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \tag{7.22}$$

Usando a classificação das condições de falha propostas na AC 25.1309 tem-se que:

$$\lambda^m = Min(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) = 0{,}07$$

No caso λ_1 representa o fator de criticalidade máximo e λ_5 representa o fator de criticalidade mínimo. A relação entre estes dois fatores determinam a criticalidade máxima e mínima de uma conexão. Caso λ_5 seja o elemento produtor tem-se a criticalidade máxima, por outro lado, se λ_1 é o elemento produtor tem-se a criticalidade mínima.

$$\Lambda^M = \Lambda_{5,1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_5} = \frac{0{,}33}{0{,}07} = 4{,}71$$

e

$$\Lambda^m = \Lambda_{1,5} = \frac{\lambda_5}{\lambda_1} = \frac{0{,}07}{0{,}33} = 0{,}21$$

7.5.3 Representação da Criticalidade da Conexão

A representação da criticalidade visa apresentar os valores da criticalidade medidos de maneira a evidenciar sua a relação com o máximo correspondente.

Por exemplo, considere o sistema S_{12} apresentado na matriz da Figura 7.9. O sistema S_{12} é constituído por 5 elementos {S_{121}, S_{122}, S_{123}, S_{124}, S_{125}} que possuem 7 conexões internas e 3 externas. Considere ainda que as classificações para as condições de falha são *K* = {*catastrófico*, *hazardous, maior, menor, sem efeito em segurança*}, sendo os fatores de criticalidade 0,33, 0,26, 0,20, 0,13 e 0,07, respectivamente. A escolha das classificações das condições de falha de cada elemento, neste exemplo, é arbitrária. Contudo, ela visa exercitar todas as 5 classificações propostas na AC 25.1309. A Tabela 7.3 apresenta os elementos envolvidos na análise e seus respectivos fatores de criticalidade.

Tabela 7.3 – Classificação das condições de falha e fatores de criticalidade para o sistema S_{12}

Elemento	Classificação da pior condição de falha	Fator de criticalidade (λ)
S_{113}	Hazardous	0,26
S_{114}	Menor	0,13
S_{121}	Menor	0,13
S_{122}	Catastrófico	0,33
S_{123}	Maior	0,20
S_{124}	Maior	0,20
S_{125}	Sem efeito em segurança	0,07
H	Catastrófico	0,33

O conjunto das conexões de S_{12} e respectivas criticalidades são apresentados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Criticalidade das conexões de S_{12}

Conexão	Criticalidade da conexão (Λ) $\Lambda_{i,j} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i}$
(S_{121},S_{123})	1,54
(S_{122},S_{114})	0,39
(S_{122},S_{121})	0,39
(S_{123},H)	1,65
(S_{123},S_{113})	1,3
(S_{123},S_{122})	1,65
(S_{123},S_{124})	1
(S_{124},S_{121})	0,65
(S_{125},S_{123})	2,86
(S_{125},S_{124})	2,86

A Figura 7.27 apresenta a distribuição das criticalidades das conexões em função do valor da criticalidade máxima.

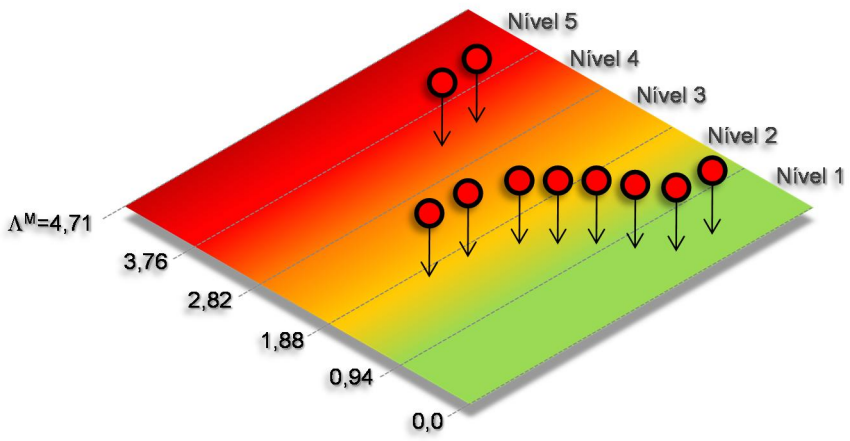


Figura 7.27 – Criticalidade das conexões do sistema S_{12}

7.6 COMPLEXIDADE, CRITICALIDADE E ACOPLAMENTO – C^2A

A *Normal Accident Theory* (NAT) conforme proposta por Charles Perrow afirma que acidentes são inevitáveis quando considerados sistemas complexos e com forte acoplamento (PERROW, 1999). Para Perrow a complexidade é consequência da interação entre sistemas e não uma propriedade do sistema em si. Em sistemas complexos algumas formas de interação entre sistemas podem ser difíceis de serem identificadas e por isso não consideradas nas análises de segurança. O acoplamento por sua vez é um agravante as interações entre sistemas. Quanto mais dependente um sistema é em relação a outro, maior é o seu acoplamento e a possibilidade de que falhas se propaguem entre eles. Perrow aborda a complexidade e acoplamento de maneira conceitual, não apresentando maneiras para medi-los.

Apesar de bastante debatida a NAT carece de trabalhos que a torne operacional. Sagan (1993), por exemplo, apresenta uma série de acidentes e situações de quase acidente analisando-os com relação à NAT e à *High Reliability Theory* (HRT). A HRT afirma, em síntese, que acidentes são possíveis de ser evitados caso cuidados sejam tomados. Sagan conclui, contudo que a NAT provê melhores recursos para explicar os acidentes e quase acidentes pesquisados. O trabalho de Sagan é

argumentativo não apresentando um modelo de que viabilize a operacionalização da NAT.

Wolf (2001), por sua vez, explora a NAT no contexto de refinarias de petróleo. Wolf modelou uma refinaria como um sistema constituído por processos, conexões e nós. As conexões são os dutos que transportam matéria prima, resíduos e produto final. Os nós são pontos que ligam processos industriais às conexões. A partir da modelagem desses elementos foi desenvolvido um índice utilizado para medir a complexidade da refinaria. Este índice foi analisado contra relatórios de acidentes da refinaria embasando as proposições da NAT. Uma limitação importante deste trabalho é que o critério utilizado para a modelagem e quantificação da complexidade é particular para refinarias.

Em outro trabalho Sammarco (2005) apresenta um conjunto de métricas baseadas em grafos para a medida da complexidade em sistemas computacionais. Sammarco mostra que os atributos previsibilidade, observabilidade e usabilidade são inversamente proporcionais à complexidade do sistema. Dessa maneira, tais atributos são utilizados como referência para indicar uma situação de perigo em projetos de sistemas. O trabalho de Sammarco apresenta uma abordagem que pode ser aplicada à sistemas em geral uma vez que se utiliza de grafos como base para a sua modelagem. Entretanto não são definidos valores máximos de referência de maneira a determinar se o valor da complexidade medido é alto ou baixo.

As normas ARP4754 e IEC 61.508 utilizam o conceito de DAL e SIL respectivamente para definir o rigor com que um sistema deve ser desenvolvido. Tanto o DAL quanto o SIL estabelecem um conjunto de requisitos que devem ser seguidos em função da classificação dos efeitos das condições de falha do sistema. Contudo, nem a ARP4754 nem a IEC 61.508 consideram a questão da complexidade e do acoplamento como fatores que influenciam na definição do rigor de desenvolvimento. A ARP4754 reconhece, contudo que a complexidade e a integração (acoplamento) entre sistemas são aspectos de preocupação. Mesmo assim não define meios para a sua quantificação, nem os levam em consideração para definir o DAL.

A proposta do índice C^2A procura cobrir as lacunas deixadas nos trabalhos anteriores atendendo aos seguintes critérios:

a) A abordagem adotada foca nas conexões existente entre elementos.
b) A modelagem das conexões utiliza-se de matrizes. Esse tipo de modelagem é genérica, não se restringindo a sistemas específicos.
c) A medida da complexidade é baseada na Teoria da Informação o que torna sua aplicação também genérica, além de permitir a determinação de máximos.
d) A medida do acoplamento usa como base a medida da complexidade. Tal medida consiste na aplicação de um fator de acoplamento à quantidade de informação (complexidade) das conexões entre elementos de um sistema e entre sistemas, determinando a força dessas conexões.
e) Os fatores de acoplamento e criticalidade foram normalizados de maneira que seja possível fazer comparações entre sistemas em que sejam adotados diferentes características de acoplamento ou diferentes tipos de classificações de condições de falha.

A determinação do índice C^2A constitui-se em uma abordagem onde complexidade (quantidade de informação), acoplamento e criticalidade são combinados para a geração de um índice indicativo do risco associado a um sistema.

7.6.1 Índice C^2A

O índice C^2A de cada conexão do sistema é dado pela soma dos valores obtidos para a complexidade e para o acoplamento, ponderado pela criticalidade da conexão. O índice C^2A é obtido por meio da seguinte equação:

$$C^2A_{i,j} = \left(\Gamma_{i,j} + \Phi_{i,j}\right) * \Lambda_{i,j} \tag{7.23}$$

Onde:

i,j representam as conexões do sistema *S*.

$\Gamma_{i,j}$ é a complexidade da conexão *i,j*.

$\Phi_{i,j}$ é o acoplamento da conexão *i,j*.

$\Lambda_{i,j}$ é a criticalidade da conexão *i,j*.

Complexidade e acoplamento constituem-se nos aspectos centrais da NAT. De acordo com a NAT, na medida em que as interações entre elementos de um sistemas tornam-se mais complexas e que passam a apresentar maior acoplamento, tais sistemas tornam-se mais vulneráveis a ocorrência de acidentes. Na abordagem apresentada por Perrow complexidade e acoplamento comportam-se de maneira ortogonal entre si. Enquanto que a complexidade ocupa um eixo, o acoplamento ocupa outro formando um plano cartesiano (Perrow, 1999 p. 97).

A proposta de somar complexidade e acoplamento surge como uma forma de integrar complexidade e acoplamento em um único indicador. Isso é possível uma vez que tanto complexidade quanto acoplamento usam a mesma unidade de medida, no caso, *bits*. A abordagem adotada permite também que a representação ortogonal conforme ilustrada por Perrow possa ser utilizada. Um exemplo dessa representação será apresentado mais adiante.

Ressalta-se, contudo, que na literatura de referência, particularmente no que se refere aos trabalhos de Wolf (2001) e Sammarco (2005), complexidade e acoplamento são consideradas de maneira separada.

A criticalidade (Λ) funciona como um fator moderador. Para um mesmo valor de complexidade e acoplamento o índice C^2A varia de acordo com o aumento ou diminuição da criticalidade das conexões. O valor de Λ é adimensional, sendo assim o índice C^2A é medido em *bits*.

Enquanto que a eq. 7.23 permite o cálculo do índice C^2A de cada conexão, a eq. 7.24 possibilita o cômputo do índice C^2A para o sistema como um todo.

$$C^2A(S) = \sum_{i,j=1}^{n} \left(\Gamma_{i,j} + \Phi_{i,j}\right) * \Lambda_{i,j} \qquad (7.24)$$

A quantidade de informação é em essência uma medida da complexidade existente nas conexões de um sistema. O acoplamento (Φ) pondera a complexidade com um

conjunto de fatores que quantificam características de acoplamento consideradas relevantes para o sistema. O valor do acoplamento fornece uma medida da força das conexões. Considerando como referência o sistema S_{12} apresentado na Figura 7.9 o índice C^2A efetivo das suas conexões é sumarizado na Tabela 7.4.

Tabela 7.5 – Índice C^2A do sistema S_{12}

Conexões internas	I^E	Φ^E	Λ	C^2A^E
(S_{121},S_{123})	0,43	0,56	1,54	1,52
(S_{122},S_{121})	0,35	0,34	0,39	0,27
(S_{123},S_{122})	0,23	0,15	1,65	0,63
(S_{123},S_{124})	0,48	0,64	1	1,12
(S_{124},S_{121})	0,48	0,64	0,65	0,73
(S_{125},S_{123})	0,35	0,34	2,86	1,97
(S_{125},S_{124})	0,35	0,22	2,86	1,63
				7,87

Conexões externas	I^E	Φ^E	Λ	C^2A^E
(S_{122},S_{114})	0,46	0,15	0,39	0,24
(S_{123},H)	0,46	0,15	1,65	1,01
(S_{123},S_{113})	0,44	0,72	1,3	1,51
				2,75

Dessa maneira:

$$C^2A^E(S_{12}) = 7{,}87 + 2{,}75 = 10{,}62\ bits$$

7.6.2 C^2A Máximo

O valor de C^2A é máximo quando os valores da complexidade, acoplamento e criticalidade de uma determinada conexão também são máximos.

A quantidade de informação máxima que um elemento pode ter ocorre quando todas as conexões do sistema têm a mesma probabilidade de ocorrer. Já o acoplamento

depende da própria complexidade e das características de acoplamento consideradas relevantes para o sistema. O fator de acoplamento assume seu valor máximo para $|C| = 1$ e dessa maneira $\phi = 2$[34]. Por fim, a criticalidade depende do conjunto de classificações de condições de falha adotada para o sistema. É assumido que K contém as classificações das condições de falha propostas pela AC 25.1309 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002) e, portanto o valor máximo de Λ é 4,71.

A partir destes dados é possível determinar o valor máximo de C^2A para um número qualquer de conexões. A Figura 7.28 apresenta o comportamento de C^2A para até 20 elementos conectados.

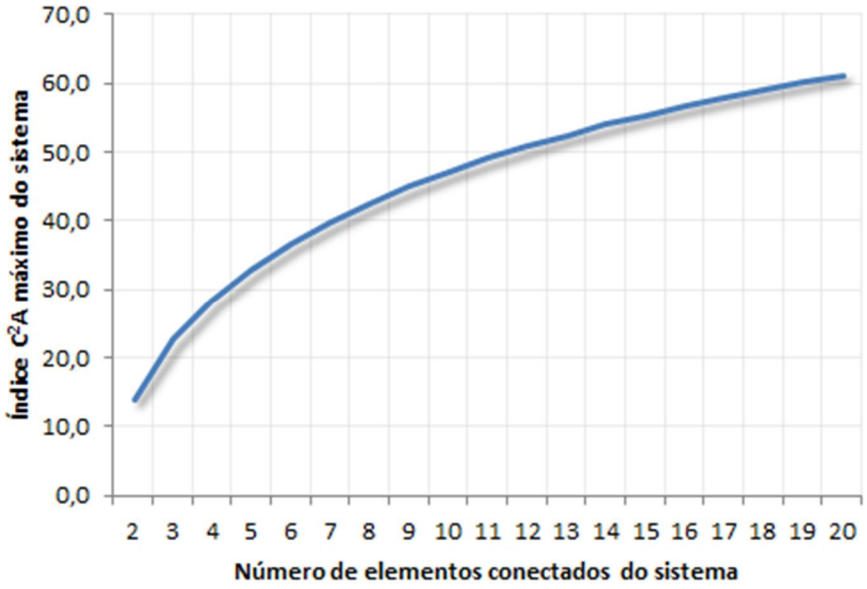


Figura 7.28 – Índice C^2A máximo para sistemas com [1,20] elementos

O índice C^2A por elemento, ilustrado na Figura 7.29, é obtido quanto as conexões do sistema ocorrem com a mesma frequência, o fator de acoplamento e o fator de criticalidade são máximos.

[34] Ver seção 7.5.5 Acoplamento máximo.

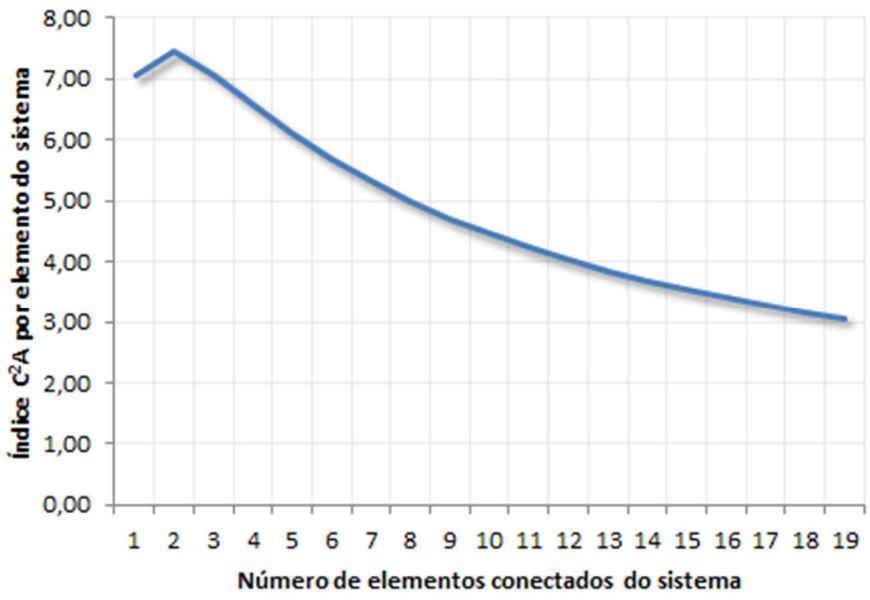


Figura 7.29 – C^2A por elemento do sistema

7.6.3 Representação do Índice C^2A

Da mesma forma como ocorreu com a complexidade e acoplamento o índice C^2A é representado em relação aos valores máximos correspondentes.

Para ilustrar a relação entre o índice C^2A e seus máximos foi utilizado o sistema S_{12} como referência. Neste caso os valores máximos de C^2A são dados por:

$$C^2A_i^M = [2{,}8 + 5{,}6] * 4{,}71 = 39{,}6$$
$$C^2A_e^M = [1{,}59 + 3{,}18] * 4{,}71 = 22{,}5$$

$$C^2A^M = C^2A_i^M + C^2A_e^M = 62{,}1\ bits$$

A representação gráfica dos valores de C^2A interno e externo com relação aos máximos correspondentes é apresentada na Figura 7.30.

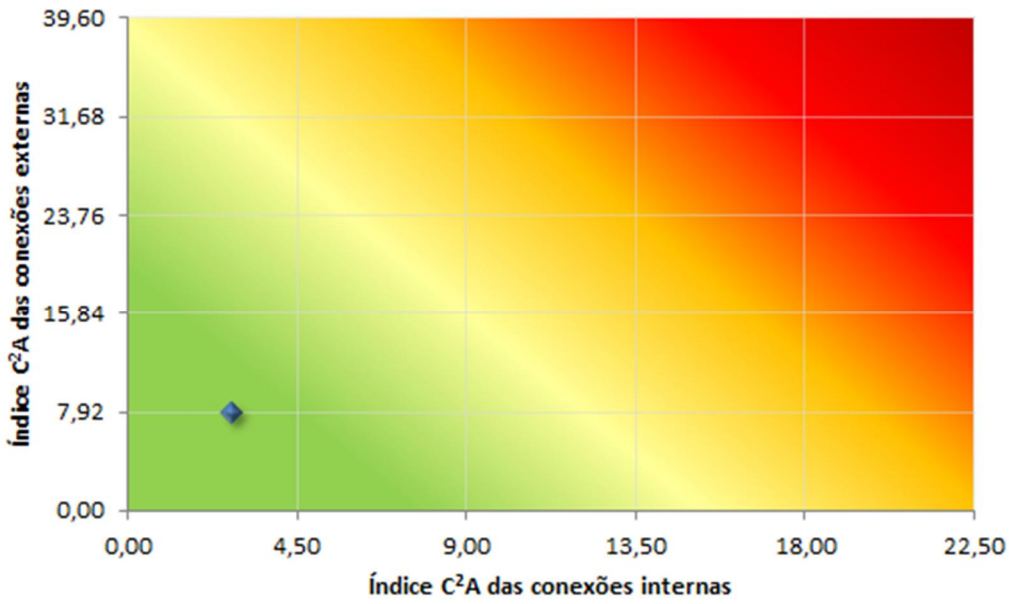


Figura 7.30 – Índice C^2A interno e externo de S_{12} em relação aos máximos correspondentes

O índice C^2A em relação ao máximo é apresentado na Figura 7.31.

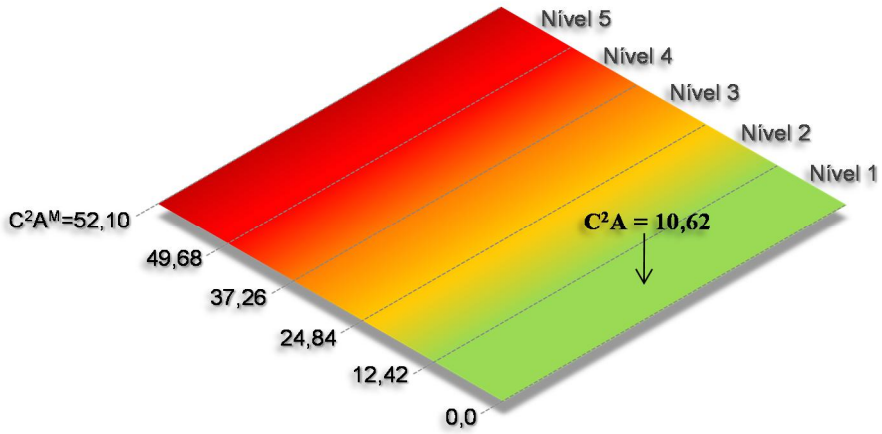


Figura 7.31 – Índice C^2A para S_{12} em relação ao máximo correspondente

Na abordagem adotada por Charles Perrow a criticalidade das conexões não é considerada. Contudo, é interessante observar como a criticalidade pode introduzir uma nova referência para se analisar o sistema. A Tabela 7.6 sumariza os valores de complexidade, acoplamento e criticalidade obtidos para o sistema S_{12}. A partir desses dados é possível representar a relação entre complexidade/acoplamento e correspondente criticalidade. O resultado apresentado na Figura 7.32 mostra que apesar das conexões $S_{125,113}$ e $S_{125,124}$ não possuírem os valores mais altos para

complexidade e acoplamento, considerando a sua criticalidade tais conexões assumem condição de maior destaque. Tais conexões precisam ter uma análise mais detalhada em termos de seus impactos em segurança.

Tabela 7.6 – Sumário dos valores de complexidade, acoplamento e criticalidade do sistema S_{12}

Conexão	Γ	Φ	Γ+Φ	Λ
$S_{121,123}$	0,43	0,56	0,99	1,54
$S_{122,121}$	0,35	0,34	0,69	0,39
$S_{123,122}$	0,23	0,15	0,38	1,65
$S_{123,124}$	0,48	0,64	1,12	1
$S_{124,121}$	0,48	0,64	1,12	0,65
$S_{125,113}$	0,35	0,34	0,69	2,86
$S_{125,124}$	0,35	0,22	0,57	2,86
$S_{122,114}$	0,46	0,15	0,61	0,39
$S_{123,H}$	0,46	0,15	0,61	1,65
$S_{123,113}$	0,44	0,72	1,16	1,3

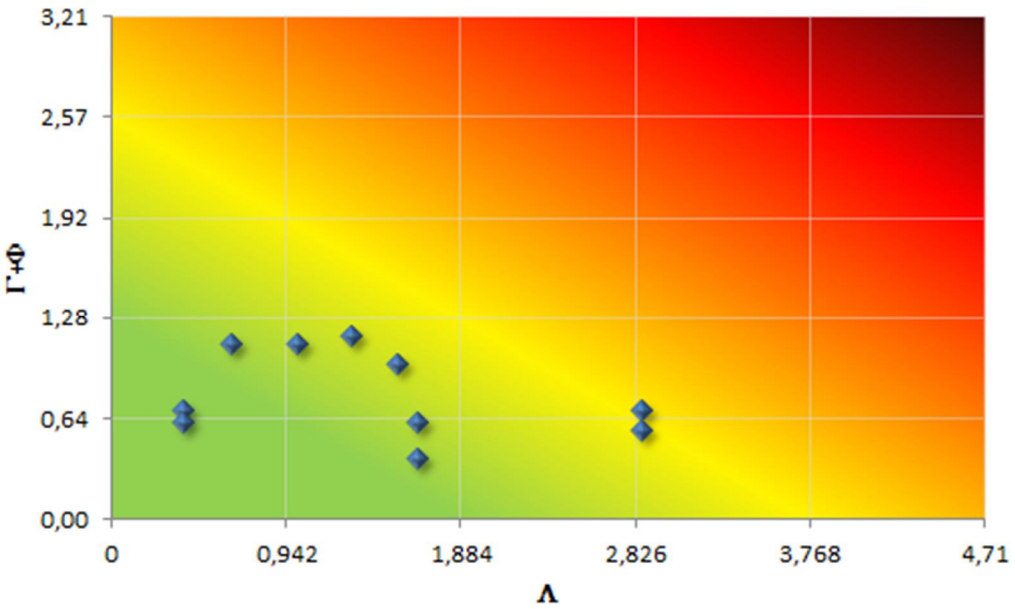


Figura 7.32 – Complexidade/acoplamento em função da criticalidade

Outra forma de ver os dados da Tabela 7.6 é correlacionando somente complexidade e acoplamento como utilizado por Perrow (1999, p.97). A Figura 7.33 ilustra a forma de representação adotada por Perrow.

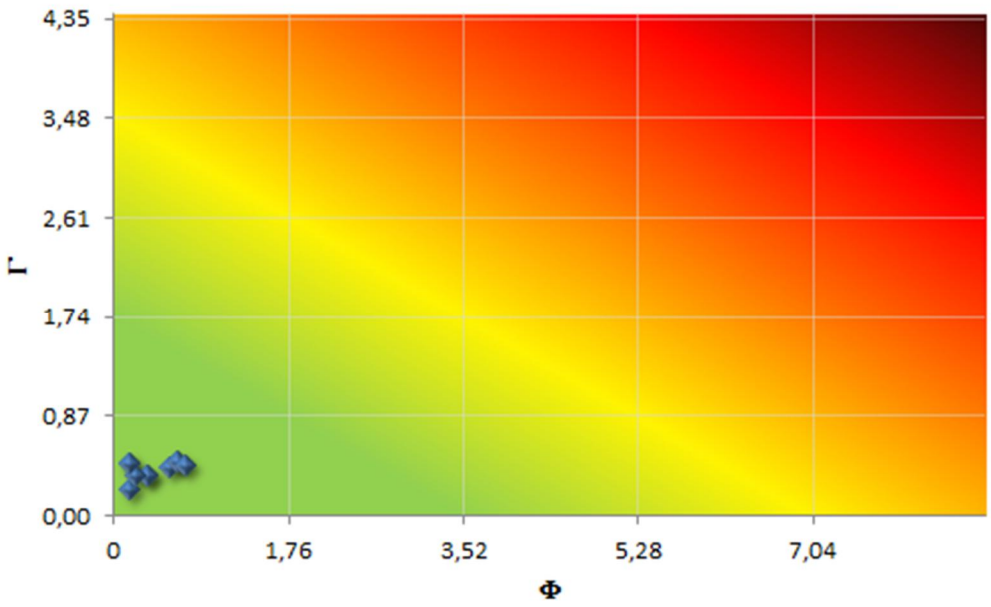


Figura 7.33 – Relação entre acoplamento e complexidade dos elementos de S_{12}

7.7 OPERACIONALIZAÇÃO

A técnica proposta não está vinculada a um processo de desenvolvimento de sistema ou análise de segurança em específico. Suas características permitem que seja utilizado de maneira independente do sistema em questão. Uma forma de evidenciar isso é mostrar como as diferentes técnicas utilizadas no cálculo do índice C^2A se ajustam a um padrão de desenvolvimento de uso geral. A norma ARP4754, apesar de estar direcionada para o desenvolvimento de sistemas aeronáuticos, apresenta um conjunto de diretrizes que podem ser aplicadas a qualquer tipo de sistema.

A utilização do índice C^2A em conjunto com a ARP4754 implica na necessidade de alguns ajustes no processo de desenvolvimento proposto pela norma. A Figura 7.34 apresenta um conjunto de tarefas que devem ser consideradas no processo.

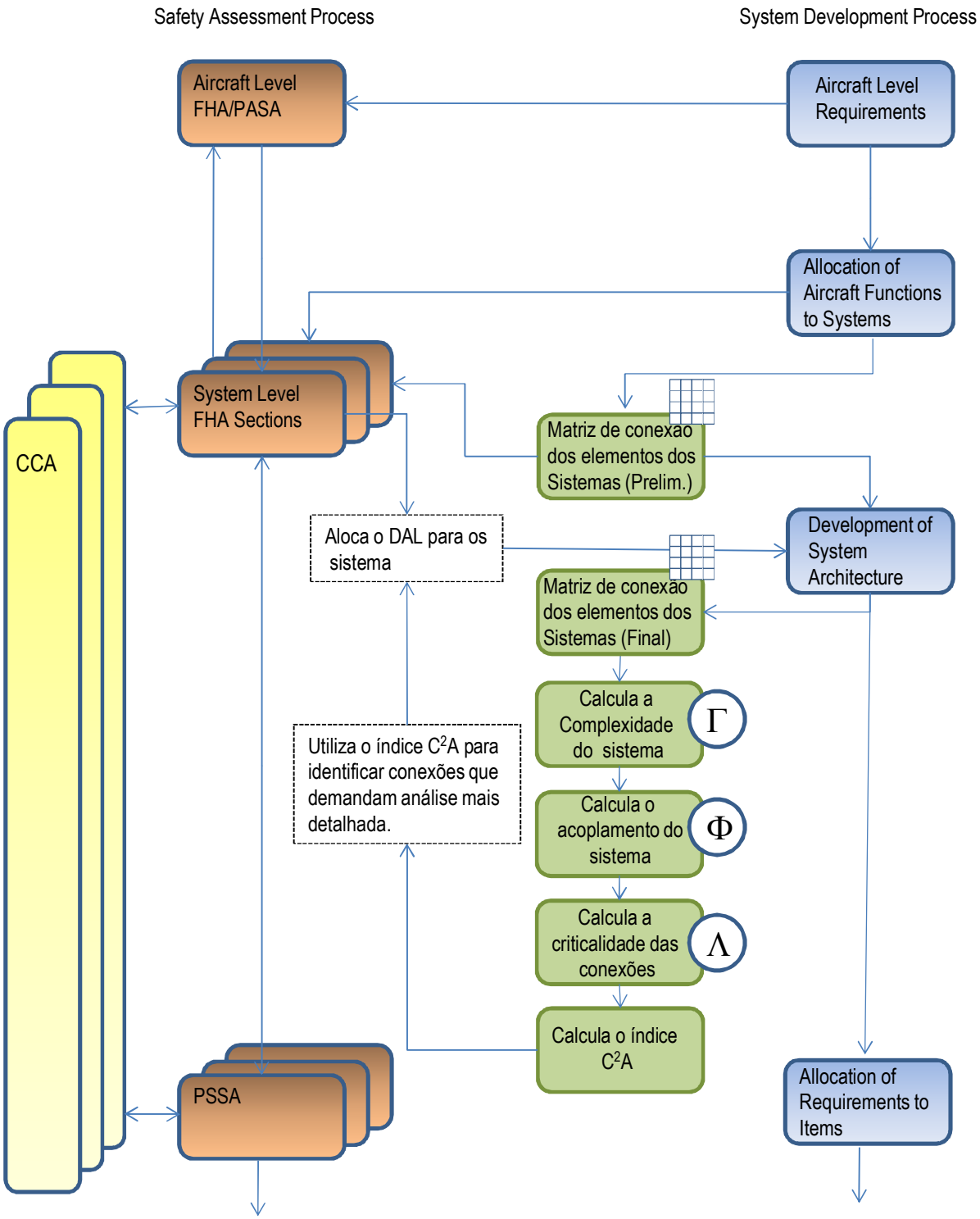


Figura 7.34 – Processo de desenvolvimento proposto pela ARP4754 modificado

O primeiro passo no processo de desenvolvimento de sistemas proposto pela ARP4754 consiste na identificação dos requisitos que a aeronave deve realizar

(*Aircraft Level Requirements*). Tais requisitos definem um conjunto mínimo de funções que incluem aspectos de mercado, operação, desempenho e segurança.
Uma vez definidos os requisitos da aeronave é conduzida a *Functional Hazard Assessment* – FHA (*Aircraft Level FHA/PASA*). O objetivo é identificar e classificar as condições de falha associadas aos requisitos da aeronave e combinações entre elas. O resultado desta atividade estabelece os objetivos de segurança que devem ser atendidos pelos sistemas que irão implementar os requisitos da aeronave.

Os sistemas são definidos tendo em vista o atendimento dos requisitos da aeronave. Neste ponto é possível criar a matriz de conexões entre os sistemas. Como se trata de uma atividade realizada no início do processo de desenvolvimento as informações da matriz de conexões podem ser preliminares. Somente com o detalhamento da arquitetura do sistema é que se terá um conjunto de informações mais consistente em termos dos sistemas e suas conexões.

Cada sistema é submetido a um processo de FHA. O FHA visa determinar as condições de falha dos sistemas e suas contribuições para as condições de falha identificadas para a aeronave. Ao final deste processo todas as condições de falhas já devem ter sido classificadas e o DAL atribuído aos sistemas.

O projeto da arquitetura do sistema introduz novos elementos tais como mecanismos de monitoramento, particionamento, redundância e dissimilaridade. Neste caso a matriz de conexões deve ser atualizada para refletir os novos elementos do sistema.

De posse da matriz de conexões, e da classificação das condições de falha é necessário identificar as características de acoplamento relevantes para o sistema. A partir disso é possível então realizar:

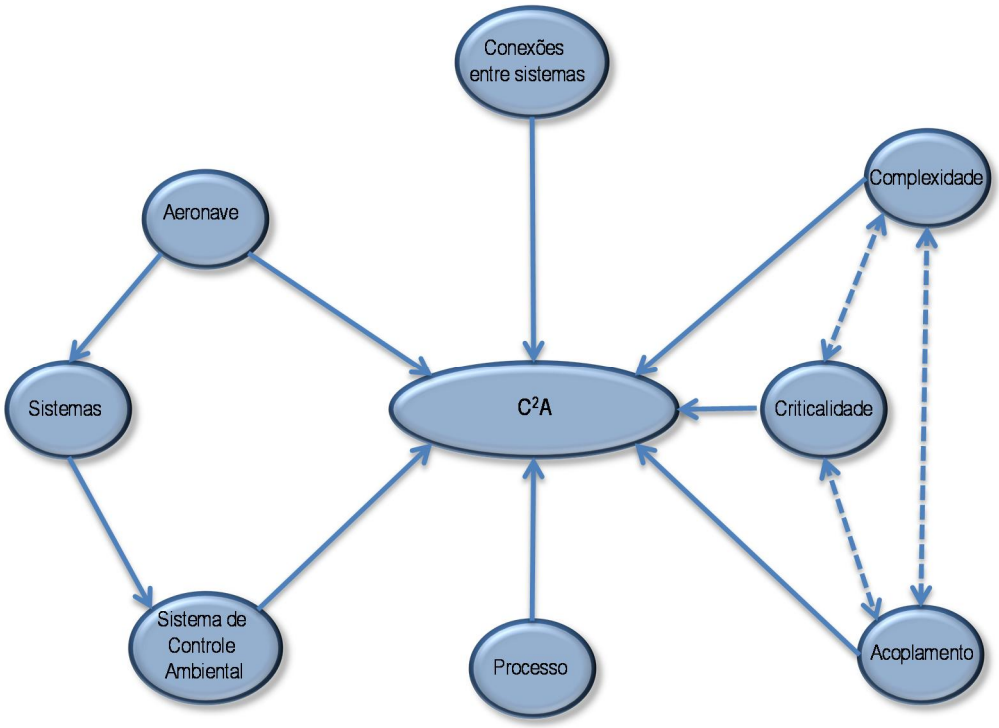
a) O cálculo da complexidade
b) A determinação dos fatores de acoplamento
c) O cálculo do acoplamento
d) A determinação dos fatores de criticalidade das conexões do sistema
e) O cálculo da criticalidade
f) O cálculo do índice C^2A

O índice C^2A é um indicador de risco utilizado para identificar elementos do sistema que podem necessitar de análises mais detalhadas ou acompanhamento próximo do seu desenvolvimento.

8 APLICAÇÃO DO ÍNDICE C^2A

O objetivo deste capítulo é apresentar a aplicação do índice C^2A em sistemas reais e avaliar os resultados obtidos. A condução deste tipo de experimento tem em si uma dificuldade intrínseca que é o acesso a dados reais. Os dados necessários para se aplicar o índice C^2A e as métricas associadas estão relacionados à arquitetura dos sistemas, os quais são de propriedade dos fabricantes de aeronaves e, de maneira geral, não são de acesso público. Para não infringir direitos de propriedade dos fabricantes de aeronaves os dados relativos aos sistemas avaliados neste capítulo foram obtidos, em sua maior parte, da literatura disponível e a partir de contatos com engenheiros que trabalham no setor aeronáutico. Alguns detalhes foram incluídos tendo como fundamentação a experiência do autor e validados por profissionais da área. Quando tal situação ocorre ao longo do capítulo os créditos da validação são incluídos no texto.

A aplicação do índice C^2A é feita sobre o sistema de controle ambiental. Tal sistema é representativo das principais características estruturais que surgem nos sistemas de uma aeronave. A Figura 8.1 apresenta a estrutura de tópicos do capítulo.



.

Figura 8.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 8

8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dois aspectos importantes precisam ser definidos antes de aplicar o índice C^2A. O primeiro refere-se às características da aeronave em questão e o segundo ao processo de desenvolvimento utilizado. As próximas seções apresentam tais definições.

8.1.1 Características da Aeronave

A aplicação da técnica C^2A conforme apresentada neste capítulo, utilizou como referência uma aeronave genérica utilizada no transporte de passageiros com capacidade para até 100 pessoas e 5 tripulantes. Tal aeronave possui duas turbinas e autonomia de voo para 3000 milhas náuticas a uma velocidade de cruzeiro de mach 0,8, sendo seu tempo de voo médio de 3 horas. Tais características são típicas de aeronaves de transporte regional dentre as quais estão incluídas aquelas produzidas pelas empresas Embraer e Bombardier.

Adotou-se como requisitos de aeronave aqueles apresentados na norma ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011) em seu apêndice E. Trata-se de um conjunto de requisitos simplificados que, contudo servem de arcabouço para a compreensão do processo de desenvolvimento proposto pela norma e suficientes para a aplicação do índice C^2A. Os requisitos da aeronave são apresentados na Tabela 8.1[35].

Tabela 8.1 – Requisitos de aeronave

1. Provide structural integrity		
2. Provide control in the air	2.1 Provide stability & control	2.1.1 Control pitch
		2.1.2 Control roll
		2.1.3 Control yaw
		2.1.4 Flight control augmentation
		2.1.5 Automatic Flight Control & Guidance
	2.2 Provide control and energy	2.2.1 Control thrust
		2.2.2 Control lift & drag

[35] Optou-se por manter os nomes em Inglês por coerência com a terminologia adotada na norma ARP4754A.

Tabela 8.1 – Requisitos de aeronave (*cont*.)

2. Provide control in the air	2.3 Provide operational awareness		2.3.1 Primary flight data display, communication & navigation
			2.3.2 Awareness of emergency
			2.3.3 Configuration
			2.3.4 Vision
	2.4 Provide a controlled environment		2.4.1 Control temperature
			2.4.2 Provide breathable environment
			2.4.3 Pressurization
			2.4.4 Emergency prevention & management
3. Provide 188TTP188 generation & distribution			
4. Provide loading, maintenance, ground handling & occupant accommodation			
5. Provide control on the ground	5.1 Control speed	5.1.1 Decelerate aircraft on the ground	5.1.1.1 Provide primary stopping force
			5.1.1.2 Provide secondary stopping force
			5.1.1.3 Reduce touchdown speed (create drag)
			5.1.1.4 Remove forward thrust
			5.1.1.5 Transfer stopping forces to structural integrity components
	5.2 Control Direction		
	5.3 Landing Gear Extention & Retration		

Os sistemas que implementam os requisitos da aeronave são definidos de acordo com a ATA 2200 (AIR TRANSPORT ASSOCIATION, 2011). Nem todos os sistemas previstos na ATA foram considerados. Entretanto, os 12 sistemas apresentados na Tabela 8.2 são representativos das principais funcionalidades presentes em qualquer aeronave de transporte de passageiros.

Tabela 8.2 – Sistemas da aeronave

1. Environmental control system
2. Communication system
3. Electrical system
4. Flight control system, primary and secondary
5. Fuel system
6. Landing gear
7. Navigation and guidance system
8. Hydraulic system
9. Auxiliary 188TTP188 unit
10. Thrust reverser
11. Indicating / Recording systems
12. Propellers / Propulsors

Para efeito de detalhamento dos requisitos e aplicação do índice C^2A foi selecionado o sistema de controle ambiental (*1. Environmental control system*). Em geral, os sistemas ambientais demandam esforço considerável dos especialistas para seu projeto e implementação. Em geral, o volume de requisitos relacionados a esse tipo de sistema só é menor que aqueles associados ao sistema aviônico, contudo possui funções com criticalidades equivalentes. Nesse sentido, entende-se que a escolha de tal sistema para a aplicação do índice C^2A é representativa da sua utilização em qualquer outro sistema da aeronave.

O sistema de controle ambiental utilizado como base para aplicação do índice C^2A foi construído a partir de especificações obtidas de diferentes aeronaves. Apesar de cada aeronave ter suas características próprias, as arquiteturas dos sistemas ambientais seguem, em geral, uma abordagem tradicional. Dessa maneira, é possível obter informações sobre subsistemas tais como pressurização, ar condicionado, etc. vindas de diferentes fontes e ainda integrá-los de maneira que possam funcionar de maneira consistente. A descrição do sistema de controle ambiental é apresentada na próxima seção.

8.1.2 Sistema de Controle Ambiental

O sistema de controle ambiental (*Environmental control system*) é responsável pelo controle de temperatura e pressurização da cabine de passageiros e *cockpit* extraindo ar das turbinas. Realiza também a proteção contra a formação de gelo nos bordos de ataque das asas, estabilizador vertical e horizontal e parabrisas. O sistema de oxigênio mantém a cabine respirável em caso de emergência. Além disso, existe uma válvula de emergência que é acionada para a posição “aberta” em caso de pressurização excessiva. A Tabela 8.3 apresenta a lista dos subsistemas que compõem o sistema de controle ambiental.

Tabela 8.3 – Detalhamento dos sistemas *environmental control system*

1. Environmental control system	1.1 Air conditioning
	1.2 Bleed
	1.3 Emergency valve
	1.4 Icing detector
	1.5 Oxygen
	1.6 Control panel
	1.7 Pressurization
	1.8 Wind shield heating

O sistema de ar condicionado (*Air conditioning*) é responsável por controlar a temperatura da cabine de passageiros e *cockpit*. O ar utilizado pelo sistema é fornecido pelo sistema de *Bleed*. O acionamento do sistema é sistema é feito por meio do painel de controle (THE 737 TECHNICAL SITE, 2011; AVIATION DATABASE, 2011).

O sistema de *Bleed* é responsável por drenar ar das turbinas e unidade de potência auxiliar (*Auxiliary Power Unit* – APU) fornecendo-o aos sistemas de ar condicionado, pressurização e proteção contra gelo a uma temperatura e pressão controladas. Em geral o ar é drenado da APU quando a aeronave encontra-se em solo e das turbinas quando em voo (DASSAULT AVIATION, 2011).

Em caso de falha do sistema de *Bleed* o fornecimento de ar para a cabine de passageiros e *cockpit* é feito por meio do acionamento no painel de controle da válvula de emergência (*Emergence Valve*). Esta válvula drena o ar da atmosfera e o direciona para os sistemas de ar condicionado e pressurização. Seu acionamento é limitado à altitude de 8.000 pés. Contudo, é importante observar que, enquanto o sistema de *Bleed* fornece o ar já pré-aquecido, a válvula de emergência controla somente a pressão. Dessa maneira os sistemas de ar condicionado e pressurização precisam operar em regime compatível.

O sistema de proteção contra a formação de gelo (*Icing detector*) é formado por um conjunto de sensores que detectam a ocorrência de gelo nos bordos de ataque das asas, estabilizador vertical e horizontal e também nos parabrisas. O sistema é acionado no painel de controle e passa a operar em modo automático de detecção e

atuação. O processo de remoção do gelo nas asas e estabilizadores é pneumático utilizando ar fornecido pelo sistema de *Bleed*. O ar é direcionado em dutos instalados nas superfícies protegidas os quais inflam quebrando e eliminando o gelo (KROES; WATKINS; DELP; 1993; CHALLENGER GLOBAL 300, 2010).

O sistema de aquecimento dos parabrisas (*Wind shield heating*) tem por objetivo manter a visibilidade dos pilotos com relação ao meio externo. Em determinadas condições climáticas pode ocorrer a formação de gelo sobre os parabrisas obstruindo a visão dos pilotos. Uma vez acionado pelos pilotos o sistema de aquecimento utiliza ar quente fornecido pelo sistema de *Bleed* que é injetado na superfície dos parabrisas desfazendo a formação de gelo (KROES; WATKINS; DELP; 1993; CHALLENGER GLOBAL 300, 2010).

Caso a pressão da cabine de passageiros / *cockpit* atinja o equivalente a 14.000 pés ou ocorra a sua descompressão o sistema de oxigênio é acionado. O volume de oxigênio disponível é suficiente para que os pilotos tenham tempo de levar a aeronave a uma altitude que possibilite o uso da válvula de emergência (*Emergence valve*) (THE 737 TECHNICAL SITE, 2011; AVIATION DATABASE, 2011).

O sistema de pressurização é um sistema eletro pneumático acionado por meio do painel de controle. O ar necessário para a pressurização de cabine é fornecido pelo sistema de *Bleed* em condições normais de operação e pela válvula de emergência em condição de emergência. O sistema deve manter a pressão de cabine em 8.000 pés (KROES; WATKINS; DELP; 1993; AIR SAFETY FOUNDATION, 2011).

O painel de controle é a interface dos pilotos com os sistemas. Por meio do painel é possível fazer o acionamento, desligamento e obter informação sobre o funcionamento dos demais sistemas que compõem o sistema de controle ambiental. Está localizado no painel de teto do *cockpit*, contudo algumas funções, como o controle de temperatura, também encontram-se disponível aos comissários. Toda ação dos comissários é indicada no painel de controle do *cockpit* para efeito de conhecimento dos pilotos. Os pilotos podem, a qualquer momento, desabilitar os comandos de acesso dos comissários. A Figura 8.2 mostra um diagrama ilustrativo

da instalação do sistema de controle ambiental e seus subsistemas (elementos) na aeronave.

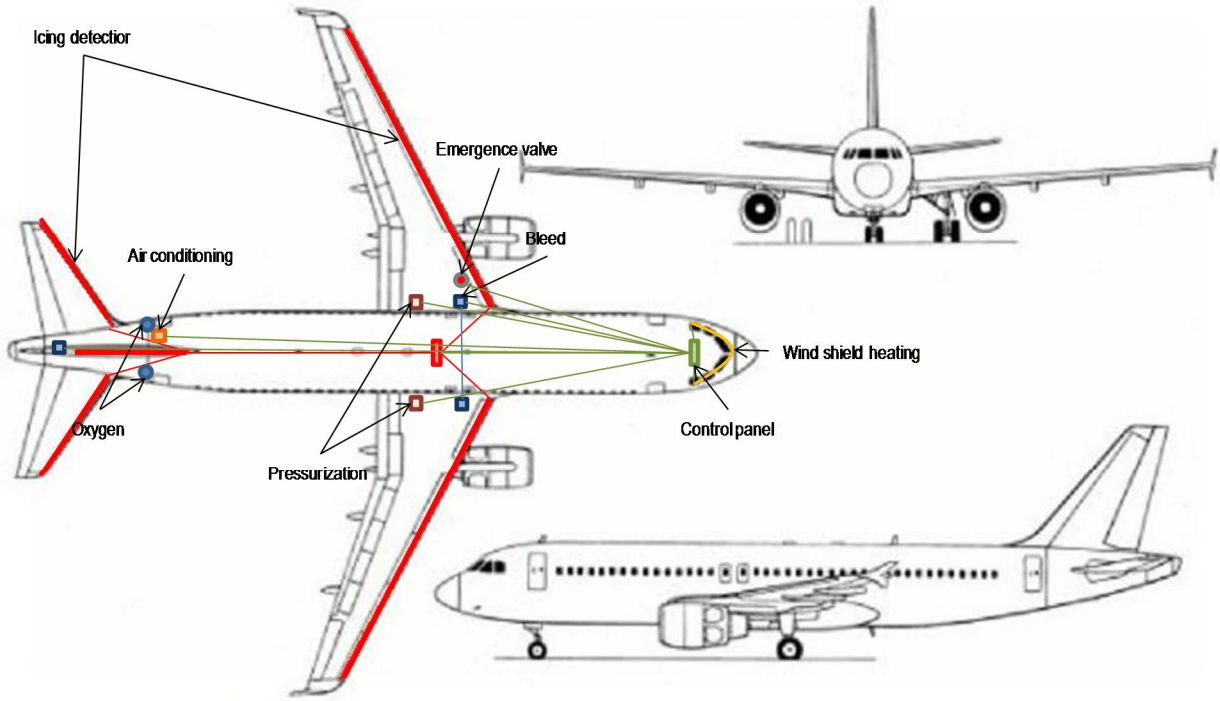


Figura 8.2 – Diagrama representativo da instalação do *environmental control system*

8.1.3 Processo

A aplicação do índice C^2A, no contexto desta Tese segue o processo apresentado na Figura 7.33, o qual é baseado na norma ARP4754 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996) e reeditado na ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011). O uso da norma ARP4754 é bastante difundido na indústria aeronáutica como um guia para o desenvolvimento de sistemas embarcados. A primeira etapa do processo consiste na identificação dos requisitos que a aeronave deve cumprir e, em seguida, trata-los do ponto de vista de segurança. O resultado desta etapa é, em essência, uma lista dos requisitos de aeronave com suas condições de falha identificadas.

Os requisitos de aeronave estabelecem um conjunto mínimo de funções que a aeronave deve desempenhar no sentido de assegurar sua operação correta e

segura em todas as fases do voo. Tais requisitos incluem também características de desempenho e conforto.

O processo modificado conforme aparece na Figura 7.33, propõe que a alocação dos requisitos de aeronave para os sistemas seja feita com o suporte de matrizes. Nas colunas encontram-se os requisitos de aeronave enquanto que nas linhas são colocados os sistemas. A alocação ocorre colocando-se o número 1 na célula do sistema que implementa o requisito. Podem ocorrer situações onde um requisito é alocado para mais de um sistema e também casos onde um sistema aloca mais de um requisito. A matriz de alocação de requisitos de aeronave para sistemas é exemplificada na Figura 7.10.

Uma vez finalizada a alocação de requisitos de aeronave para sistemas, é possível construir a matriz de conexões entre os elementos do sistema. Esta matriz é considerada preliminar, pois após a definição da arquitetura dos sistemas as conexões precisam ser revistas, pois pode ter sofrido modificações. Tal revisão pode implicar em uma nova matriz de conexões.

A análise de segurança envolve a combinação de diferentes técnicas tais como FMEA, FMECA, FTA entre outras. O objetivo principal desta atividade é conhecer a aeronave em termos de seus modos de falha. Uma vez identificados os modos de falha estes são classificados de acordo com os efeitos correspondentes. A AC 25.1309 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002) propõe que as falhas sejam classificadas como Catastróficas, *Hazardous*, Maior, Menor e Sem Efeito em Segurança[36]. Em decorrência dessa classificação é definido o nível de rigor com que devem ser tratados os requisitos de aeronave relacionados.

O processo conforme sugerido pela ARP4754A estabelece que os requisitos de aeronave (funções) devem ser alocados para os sistemas que os implementarão. Na Figura 7.33, que descreve o processo da ARP4754 adaptado para o contexto desta Tese, tal atividade ocorre em *Allocation of aircraft functions to systems*. Essa alocação é representada na matriz da Figura 8.3.

[36] Ver o Capítulo 6 para mais detalhes.

Sistemas \ Funções de Aeronave (Funções)		1. Provide structural integrity	2. Provide control in the air							3. Provide power generation & distribution	4. Provide loading, maintenance, ground handling & occupant accommodation	5. Provide control on the ground		
			2.1 Provide stability & control	2.2 Provide control and energy	2.3 Provide operational awareness	2.4 Provide a controlled environment						5.1 Control Speed	5.2 Control Direction	5.3 Landing Gear Extention & Retration
						2.4.1 Control temperature	2.4.2 Provide breathable environment	2.4.3 Pressurization	2.4.4 Emergency prevention & management					
1. Environmental control system	1.1 Air conditioning					1	1							
	1.2 Bleed					1	1							
	1.3 Emergence valve													
	1.4 Icing detector													
	1.5 Oxygen						1							
	1.6 Control panel					1	1	1	1					
	1.7 Pressurization						1	1						
	1.8 Wind shield heating				1									
2. Communication system					1									
3. Electrical system				1						1				
4. Flight control system, primary and secondary			1	1										
5. Fuel system				1						1				
6. Landing Gear												1	1	1
7. Navigation and guidance system			1	1										
8. Hydraulic system			1	1								1		1
9. Auxiliary power unit				1						1				
10. Thrust reverser			1	1								1		
11. Indicating / Recording systems			1	1	1	1	1	1	1					
13. Propellers / Propulsors			1	1						1		1	1	

Figura 8.3 – Alocação de requisitos de aeronave para o *environmental control system*

Nas colunas da matriz encontram-se os requisitos de aeronave conforme definidos na Tabela 8.1 e nas linhas estão os sistemas conforme definidos nas Tabelas 8.2 e 8.3. A matriz correlaciona os sistemas e requisitos de aeronave. Por exemplo, o requisito de aeronave *Control the temperature* está associado aos sistemas *Air conditioning*, *Bleed* e *Control panel*. Da mesma forma, o requisito de aeronave *Pressurization* é realizado pelos sistemas *Control panel* e *Pressurization*.

A determinação da complexidade, acoplamento e criticalidade das conexões, bem como o cálculo do índice C^2A são detalhados nas próximas seções.

8.2 CONEXÕES ENTRE SISTEMAS

Uma vez realizada a alocação dos requisitos de aeronave para sistemas é possível criar outra matriz representando as conexões entre sistemas. Em geral nessa etapa do projeto não se tem ainda todas as informações necessárias para se ter a matriz de conexões entre sistemas consolidada. Algumas definições surgem somente após a arquitetura do sistema ter sido definida. A arquitetura traz, em geral, definições da forma com que os sistemas se comunicam entre si acrescentando ou removendo conexões do projeto inicial. Dessa maneira, a matriz de conexões precisa ser atualizada tão logo a arquitetura do sistema tenha sido finalizada. A matriz de conexões apresentada na Figura 8.4 corresponde aquela gerada como parte da atividade “Matriz de conexão dos elementos dos sistemas (Final)”, conforme processo proposto na Figura 7.33.

Foram introduzidos dois elementos à estrutura da matriz correspondendo ao ambiente e seres humanos. Tais conexões são representadas para efeito de modelagem, entretanto, não são detalhadas.

As conexões representam de canais de comunicação físicos que podem ser basicamente[37] discretos e barramento de dados. Contudo, para efeito do cálculo do

[37] Apesar de ter sido possível acessar, nesse caso, dados reais de aeronaves de transporte regional não foi autorizado o uso dos mesmos. Dessa maneira, os dados utilizados refletem o que há

índice C^2A tal informação não é relevante, uma vez que o índice não considera o tipo do meio pelo qual se dá a conexão.

Sistemas		Sere Humanos	Ambiente	1. Environmental control system								2. Communication system	3. Electrical system	4. Flight control system, primary and secondary	5. Fuel system	6. Landing gear	7. Navigation and guidance system	8. Hydraulic system	9. Auxiliary power unit	10. Thrust reverser	11. Indicating / Recording systems	12. Standard Practices and Structures - General	13. Propellers / Propulsors
				1.1 Air conditioning	1.2 Bleed	1.3 Emergence valve	1.4 Icing detector	1.6 Oxygen	1.7 Control panel	1.8 Pressurization	1.9 Wind shield heating												
Seres Humanos									1			1									1		
Ambiente																							
1. Environmental control system	1.1 Air conditioning			0	3				3														
	1.2 Bleed			7	93	1	1		28				1					2			2		
	1.3 Emergence valve				1	0																	
	1.4 Icing detector				2		0																
	1.5 Oxygen							0	1														
	1.6 Control panel	1			15				0														
	1.7 Pressurization		1						2	0								2			3		
	1.8 Wind shield heating		1						4		8												
2. Communication system		1																			4		
3. Electrical system		1			1				2		4				6		1	20			28		
4. Flight control system, primary and secondary		1	1		4											4	12	6			16		8
5. Fuel system		1											1								2		4
6. Landing gear		1												40				4			2		4
7. Navigation and guidance system		1	1						4					12	2						4		
9. Hydraulic system														10		2					3		4
9. Auxiliary power unit		1																					
10. Thrust reverser		1																					
11. Indicating / Recording systems				2	2			10	5	3	12		4	12	10	10		10					56
12. Standard Practices and Structures - General																							
13. Propellers / Propulsors		1	1													2					24		

Figura 8.4 – Conexões entre sistemas (*environmental control system*)

disponível na internet em sítios especializados e conversas com engenheiros especialistas em sistemas de sistemas ambientais.

Os valores apresentados nas células da matriz correspondem aos canais de comunicação existentes entre dois sistemas. A diagonal principal da matriz que representa o sistema de controle ambiental foi utilizada para indicar o número de conexões internas ao subsistema correspondente. No caso, o sistema de *Bleed* possui 93 conexões internas e o sistema de *Wind shield heating* possui 8 conexões. Os demais sistemas só possuem conexões externas.

8.2.1 Complexidade Efetiva

A complexidade do *Environmental control system* é obtida pela soma das complexidades de seus subsistemas. Os subsistemas de *Bleed* e *Wind shield heating* possuem conexões internas e por isso precisam ser expandidas para que a complexidade possa ser calculada. Os demais subsistemas possuem somente conexões externas, o que implica que sua complexidade interna é zero.

Os elementos que compõem os subsistemas de *Bleed* e *Wind shield heating* tiveram seus nomes modificados para preservar a informação original obtida a partir da documentação de interface de um sistema de controle ambiental de um projeto real desenvolvido pela Embraer. Para tanto adotou-se a seguinte convenção para os nomes:

Elemento <nome do subsistema> <número sequencial>

As matrizes apresentadas nas Figuras 8.5 e 8.6 representam os elementos que efetivamente possuem alguma conexão. Os demais elementos foram removidos por uma questão de espaço e por não influenciarem no cálculo da complexidade.

As seções abaixo apresentam o cálculo da complexidade para cada um dos subsistemas do *Environmental control system*.

8.2.1.1 Air Conditioning

Complexidade interna

$$\Gamma_i^E = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^E = -\left[\left(\frac{7}{9}\log_2\frac{7}{9}\right) + \left(\frac{2}{9}\log_2\frac{2}{9}\right)\right] = 0{,}76$$

Complexidade

$$\Gamma^E = \Gamma_i^E + \Gamma_e^E = 0{,}76\ bits$$

8.2.1.2 Bleed

Complexidade interna

$$\Gamma_i^E = -\left[47\left(\frac{1}{93}\log_2\frac{1}{93}\right) + 23\left(\frac{2}{93}\log_2\frac{2}{93}\right)\right] = 6{,}04$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^E = -\left[2\left(\frac{1}{28}\log_2\frac{1}{28}\right) + 2\left(\frac{2}{28}\log_2\frac{2}{28}\right) + \left(\frac{3}{28}\log_2\frac{3}{28}\right) + \left(\frac{4}{28}\log_2\frac{4}{28}\right) + \left(\frac{15}{28}\log_2\frac{15}{28}\right)\right] = 2{,}11$$

Complexidade

$$\Gamma^E = \Gamma_i^E + \Gamma_e^E = 8{,}15\ bits$$

8.2.1.3 Emergence Valve

Complexidade interna

$$\Gamma_i^E = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^E = -\left[\left(\frac{1}{1}\log_2\frac{1}{1}\right)\right] = 0$$

Complexidade

$$\Gamma^E = \Gamma_i^E + \Gamma_e^E = 0\ bits$$

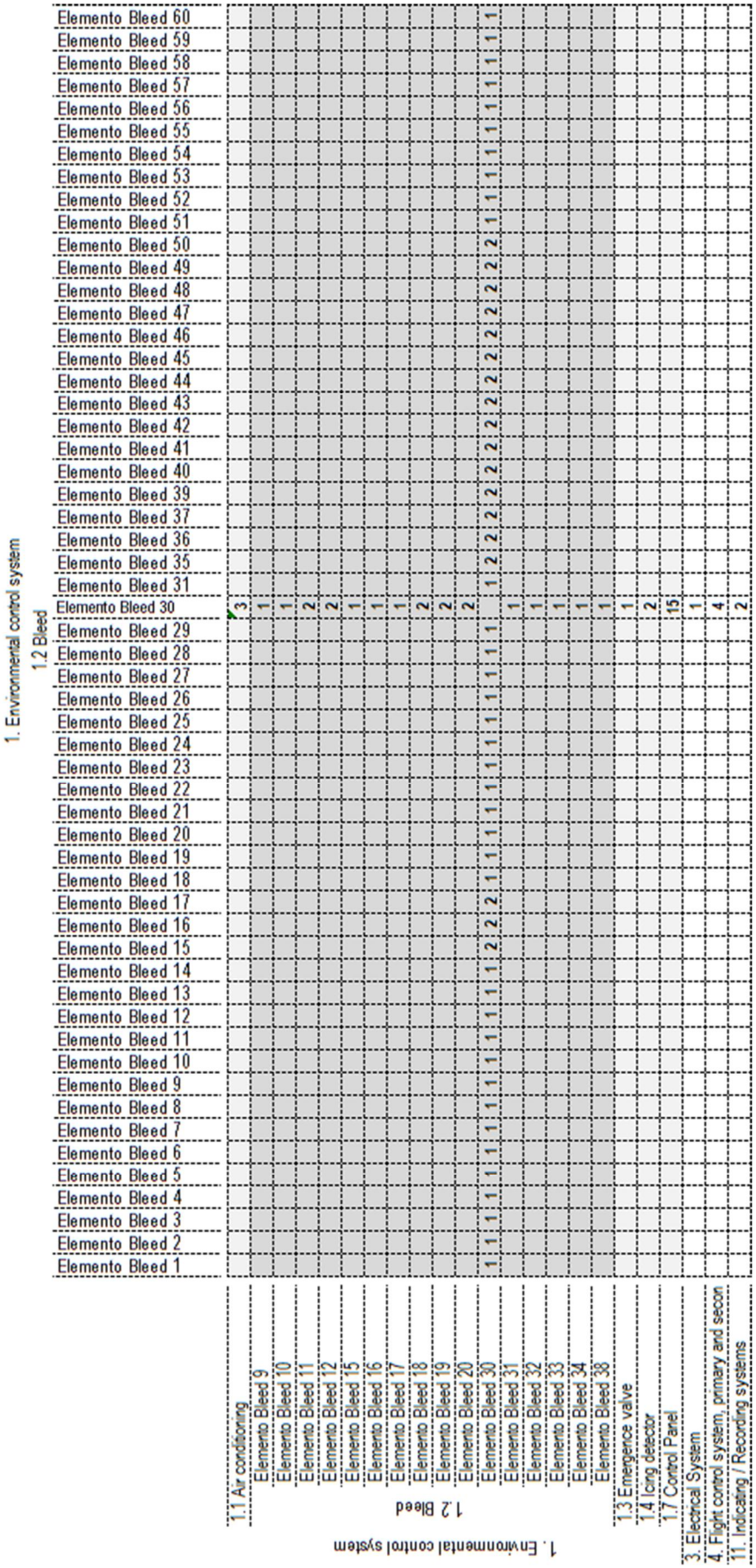


Figura 8.5 – Conexões do sistema de *bleed*

8.2.1.4 Icing Detector

Complexidade interna

$$\Gamma_i^E = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^E = -\left[\left(\frac{1}{1}\log_2\frac{1}{1}\right)\right] = 0$$

Complexidade

$$\Gamma^E = \Gamma_i^E + \Gamma_e^E = 0\ bits$$

8.2.1.5 Oxygen

Complexidade interna

$$\Gamma_i^E = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^E = -\left[\left(\frac{16}{16}\log_2\frac{16}{16}\right)\right] = 0$$

Complexidade

$$\Gamma^E = \Gamma_i^E + \Gamma_e^E = 0\ bits$$

8.2.1.6 Control Panel

Complexidade interna

$$\Gamma_i^E = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^E = -\left[2\left(\frac{1}{50}\log_2\frac{1}{50}\right) + 2\left(\frac{2}{50}\log_2\frac{2}{50}\right) + \left(\frac{3}{50}\log_2\frac{3}{50}\right) + 2\left(\frac{4}{50}\log_2\frac{4}{50}\right) + \left(\frac{5}{50}\log_2\frac{5}{50}\right) + \left(\frac{28}{50}\log_2\frac{28}{50}\right)\right] = 2{,}22$$

Complexidade

$$\Gamma^E = \Gamma_i^E + \Gamma_e^E = 2{,}22\ bits$$

8.2.1.7 Pressurization

Complexidade interna

$$\Gamma_i^E = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^E = -\left[\left(\frac{3}{3}\log_2\frac{3}{3}\right)\right] = 0$$

Complexidade

$$\Gamma^E = \Gamma_i^E + \Gamma_e^E = 0\ bits$$

8.2.1.8 Wind Shield Heating

Complexidade interna

$$\Gamma_i^E = -\left[8\left(\frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8}\right)\right] = 3$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^E = -\left[2\left(\frac{2}{16}\log_2\frac{2}{16}\right) + 2\left(\frac{6}{16}\log_2\frac{6}{16}\right)\right] = 1{,}81$$

Complexidade

$$\Gamma^E = \Gamma_i^E + \Gamma_e^E = 4{,}81\ bits$$

		Elemento Wind shield heating 1	Elemento Wind shield heating 2
1. Environmental control system / 8. Wind shield heating	Elemento Wind shield heating 3	1	
	Elemento Wind shield heating 4	1	
	Elemento Wind shield heating 5	1	
	Elemento Wind shield heating 6	1	
	Elemento Wind shield heating 7		1
	Elemento Wind shield heating 8		1
	Elemento Wind shield heating 9		1
	Elemento Wind shield heating 10		1
3. Electrical System		2	2
11. Indicating / Recording systems		6	6

Figura 8.6 – Conexões do sistema de *wind shield heating*

8.2.1.9 Environmental Control System

Complexidade

$$\Gamma^E = 0{,}76 + 8{,}15 + 0 + 0 + 0 + 2{,}22 + 0 + 4{,}28 = 15{,}93\ bits$$

8.2.2 Complexidade Máxima

A complexidade máxima ocorreria se todas as conexões aparecessem com a mesma frequência em cada um dos elementos da matriz. As seções abaixo apresentam as complexidades máximas dos elementos do *Environmental control system*.

8.2.2.1 Air Conditioning

Complexidade interna

$$\Gamma_i^M = 0$$

Complexidade externa

Possui 9 conexões externas distribuídas entre 2 elementos.

$$\Gamma_e^M = -\left[2 * \left(\frac{9/2}{9}\log_2\frac{9/2}{9}\right)\right] = -\log_2\frac{9/2}{9} = -\log_2\frac{1}{2} = 1$$

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = \Gamma_i^M + \Gamma_e^M = 1\ bit$$

8.2.2.2 Bleed

Complexidade interna

Possui 93 conexões internas distribuídas entre 70 elementos.

$$\Gamma_i^M = -\log_2\frac{1}{70} = 6{,}12$$

Complexidade externa

Possui 28 conexões externas distribuídas entre 7 elementos.

$$\Gamma_e^M = -\log_2\frac{1}{7} = 2{,}80$$

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = \Gamma_i^M + \Gamma_e^M = 8{,}92\ bits$$

8.2.2.3 Emergence Valve

Complexidade interna

$$\Gamma_i^M = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^M = -\log_2 \frac{1}{1} = 0$$

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = \Gamma_i^M + \Gamma_e^M = 0\ bits$$

8.2.2.4 Icing Detector

Complexidade interna

$$\Gamma_i^M = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^M = -\log_2 \frac{1}{1} = 0$$

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = \Gamma_i^M + \Gamma_e^M = 0\ bits$$

8.2.2.5 Oxygen

Complexidade interna

$$\Gamma_i^M = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^M = -\log_2 \frac{1}{1} = 0$$

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = \Gamma_i^M + \Gamma_e^M = 0\ bits$$

8.2.2.6 Control Panel

Complexidade interna

$$\Gamma_i^M = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^M = -\log_2 \frac{1}{8} = 3$$

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = \Gamma_i^M + \Gamma_e^M = 3\ bits$$

8.2.2.7 Pressurization

Complexidade interna

$$\Gamma_i^M = 0$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^M = -\log_2 \frac{1}{1} = 0$$

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = \Gamma_i^M + \Gamma_e^M = 0\ bits$$

8.2.2.8 Wind Shield Heating

Complexidade interna

$$\Gamma_i^M = -\log_2 \frac{1}{8} = 3$$

Complexidade externa

$$\Gamma_e^M = -\log_2 \frac{1}{4} = 2$$

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = \Gamma_i^M + \Gamma_e^M = 5\ bits$$

8.2.2.9 Environmental Control System

Complexidade máxima

$$\Gamma^M = 1 + 8{,}92 + 0 + 0 + 0 + 3 + 0 + 5 = 17{,}92\ bits$$

A Figura 8.7 representa a complexidade efetiva em relação à complexidade máxima do sistema.

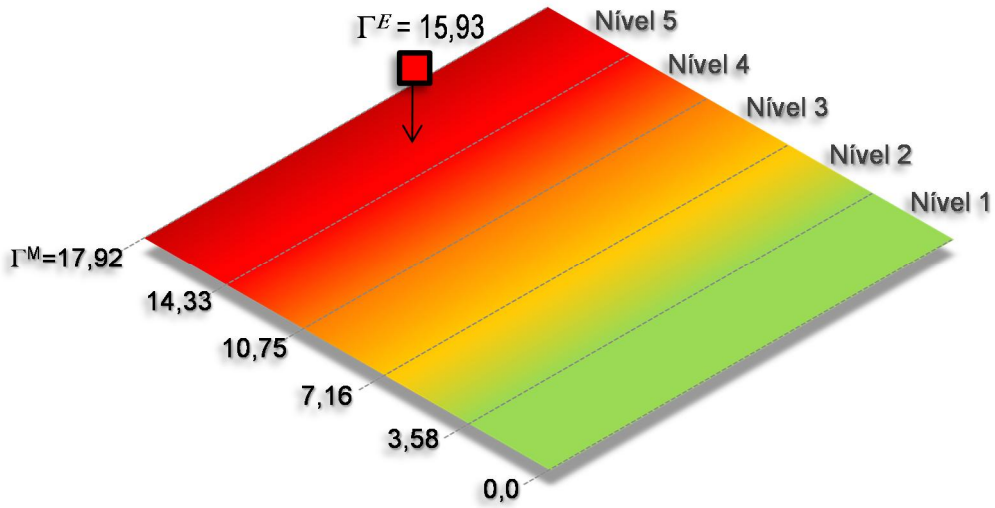


Figura 8.7 – Complexidade efetiva em relação à complexidade máxima do *Environmental control system*

8.2.3 Acoplamento

A escolha das características de acoplamento foi feita com base na análise de cada uma das conexões existentes entre os elementos do sistema. Tal análise foi realizada com o suporte de um engenheiro especialista no assunto. Dessa análise três grupos de conexões foram identificados:

- Digitais
- Analógicas
- Discretos

Foi apresentada ao engenheiro a possibilidade de classificar as conexões da seguinte maneira:

- Com relação ao tempo:
    - Conexão assíncrona
    - Conexão síncrona
- Com relação a passagem de informações
    - Passagem de dados (somente)
    - Passagem de controle (somente)
    - Passagem de dados e controle (a informação pode atuar nos dois sentidos)

Da análise das conexões verificou-se que, com relação ao *Environmental control system*, as conexões que ocorrem por meio digital são utilizadas para o transporte de dados, sendo que as conexões analógicas na sua maioria são utilizadas tanto para passagem de dados quanto controle. Foram identificadas, contudo duas exceções. A primeira com relação ao Elemento Bleed 49 e Elemento Bleed 50 que geram somente dados, no caso, dados de temperatura. A segunda exceção refere-se a um tipo particular de conexão do Elemento Bleed 30 que é utilizada para comando enviado ao *Control panel*. As conexões referentes aos discretos foram todas consideradas como sendo para controle.

No sistema de *Wind shield heating* foram identificados dois tipos de conexão. As conexões internas ao sistema são analógicas e utilizadas para a passagem de dados. As conexões externas são sinais discretos. Neste caso a conexão com o *3. Electrical system* se destina a passagem de comandos enquanto que a conexão com *11. Indicating / Record systems* visa a passagem de dados.

Com relação ao aspecto temporal, apesar de existirem restrições para a disponibilização e aquisição dos dados não há um sincronismo entre os subsistemas. Dessa maneira todas as conexões para ambos os sistemas foram tratadas como assíncronas.

A Tabela 8.4 apresenta um sumário da classificação das conexões internas e externas identificadas para o *Environmental control system* e *Wind shield heating*.

Tabela 8.4 – Sumário das características de acoplamento identificadas para o sistema de *Bleed* e *Wind shield heating*

Tipo da conexão	Característica de acoplamento	Elementos do sistema
Bleed		
Digital	Dados	Todos os elementos
Analógica	Dado	Elemento Bleed 49 e Elemento Bleed 50
	Controle	Elemento Bleed 30 na conexão com o subsistema 1.7 Control panel
	Dado & Controle	Demais elementos
Discretos	Controle	Todos os elementos
Wind shield heating		
Analógica	Dados	Todos os elementos
Discretos	Dados	11. Indicatin / Recording systems
	Controle	3. Electrical system

Tendo como base as características de acoplamento identificadas os fatores de acoplamento para o *Environmental control system* assumem os seguintes valores:

$$C(Assíncrona) \Rightarrow \phi_{NA} = \{1\}$$

$$C(Dado, Controle, Dado\&Controle) \Rightarrow \phi_A = \{0{,}5; 0{,}33; 0{,}17\}$$

Os fatores de acoplamento para o sistema de *Wind shield heating* são os seguintes:

$$C(Assíncrona) \Rightarrow \phi_{NA} = \{1\}$$

$$C(Dado, Controle) \Rightarrow \phi_A = \{0{,}66; 0{,}33\}$$

Para os demais sistemas foi assumido que as conexões ocorrem de maneira assíncrona e pela passagem de dado e controle. Dessa maneira os fatores de acoplamento assumem os seguintes valores:

$$C(Assíncrona) \Rightarrow \phi_{NA} = \{1\}$$

$$C(Dado, Controle) \Rightarrow \phi_A = \{1\}$$

As seções abaixo apresentam o cálculo do acoplamento para cada um dos subsistemas do *Environmental control system*.

8.2.3.1 Air Conditioning

Acoplamento interno

$$\Phi_i^E = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^E = -\left[\left(\frac{7}{9}\log_2\frac{7}{9}\right) * 2 + \left(\frac{2}{9}\log_2\frac{2}{9}\right) * 2\right] = 1{,}52$$

Acoplamento

$$\Phi^E = \Phi_i^E + \Phi_e^E = 1{,}52\ bits$$

8.2.3.2 Bleed

Acoplamento interno

$$\Phi_i^E = -\left[26 * \left(\frac{1}{93}\log_2\frac{1}{93}\right) * (1 + 0{,}5) + 21 * \left(\frac{1}{93}\log_2\frac{1}{93}\right) * (1 + 0{,}33) + 6 * \left(\frac{2}{93}\log_2\frac{2}{93}\right) * (1 + 0{,}33 + 0{,}5) + 10 * \left(\frac{2}{93}\log_2\frac{2}{93}\right) * (1 + 0{,}5) + 2 * \left(\frac{2}{93}\log_2\frac{2}{93}\right) * (1 + 0{,}17) + 5 * \left(\frac{2}{93}\log_2\frac{2}{93}\right) * (1 + 0{,}33)\right] = 8{,}87$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^E = -\left[1 * \left(\frac{2}{28}\log_2\frac{2}{28}\right) * (1 + 0{,}33) + 2 * \left(\frac{1}{28}\log_2\frac{1}{28}\right) * (1 + 0{,}5) + 1 * \left(\frac{2}{28}\log_2\frac{2}{28}\right) * (1 + 0{,}5) + 1 * \left(\frac{10}{28}\log_2\frac{10}{28}\right) * (1 + 0{,}33) + 2 * \left(\frac{2}{28}\log_2\frac{2}{28}\right) * (1 + 0{,}17) + 1 * \left(\frac{3}{28}\log_2\frac{3}{28}\right) * (1 + 0{,}5) + 1 * \left(\frac{1}{28}\log_2\frac{1}{28}\right) * (1 + 0{,}17) + 1 * \left(\frac{4}{28}\log_2\frac{4}{28}\right) * (1 + 0{,}17)\right] = 3{,}81$$

Acoplamento

$$\Phi^E = \Phi_i^E + \Phi_e^E = 12{,}68\ bits$$

A Tabela 8.5 apresenta as conexões internas do sistema de *Bleed*, enquanto que a Tabela 8.6 apresenta as conexões externas. A coluna referente a característica de acoplamento possui, em alguns casos, um valor indicado entre parênteses. Tal valor refere-se ao número de conexões identificadas com aquela característica de acoplamento. O valor *default* 1 não é representado.

Tabela 8.5 – Características de acoplamento das conexões internas do sistema de *bleed*

Elemento produtor	Elemento consumidor	Característica de acoplamento
Elemento Bleed 1	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 2	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 3	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 4	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 5	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 6	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 7	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 8	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 9	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 10	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 11	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 12	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 13	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 14	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 15	Elemento Bleed 30	Controle, Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 16	Elemento Bleed 30	Controle, Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 17	Elemento Bleed 30	Controle, Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 18	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 19	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 20	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 21	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 22	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 23	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 24	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 25	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 26	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 27	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 28	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 29	Elemento Bleed 30	Dado e Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 9	Dado e Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 10	Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 11	Controle (2)
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 12	Controle (2)
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 15	Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 16	Dado e Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 17	Dado e Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 18	Controle (2)
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 19	Controle (2)
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 20	Controle (2)
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 31	Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 32	Dado e Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 33	Dado e Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 34	Dado e Controle
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 38	Dado e Controle
Elemento Bleed 31	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 35	Elemento Bleed 30	Controle, Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 36	Elemento Bleed 30	Controle, Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 37	Elemento Bleed 30	Controle, Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 39	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 40	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)

Tabela 8.5 – Características de acoplamento das conexões internas do sistema de *bleed (cont.)*

Elemento produtor	Elemento consumidor	Característica de acoplamento
Elemento Bleed 41	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 42	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 43	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 44	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 45	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 46	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 47	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 48	Elemento Bleed 30	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 49	Elemento Bleed 30	Dados (2)
Elemento Bleed 50	Elemento Bleed 30	Dados (2)
Elemento Bleed 51	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 52	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 53	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 54	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 55	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 56	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 57	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 58	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 59	Elemento Bleed 30	Controle
Elemento Bleed 60	Elemento Bleed 30	Controle

Tabela 8.6 – Características de acoplamento das conexões externas do sistema de *bleed*

Elemento produtor	Elemento consumidor	Característica de acoplamento
Elemento Bleed 30	1.1 Air conditioning	Controle (2), Dado e Controle
Elemento Bleed 30	1.3 Emergence valve	Dado e Controle
Elemento Bleed 30	1.4 Icing detector	Dado e Controle (2)
Elemento Bleed 30	1.7 Control Panel	Controle (10), Dados (2), Dado e Controle (3)
Elemento Bleed 30	3. Electrical System	Dados
Elemento Bleed 30	4. Flight control system, primary and secondary	Dados (4)
Elemento Bleed 30	11. Indicating / Recording systems	Dados (2)

8.2.3.3 Emergence Valve

Acoplamento interno

$$\Phi_i^E = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^E = -\left[\left(\frac{1}{1}\log_2\frac{1}{1}\right) * 2\right] = 0$$

Acoplamento

$$\Phi^E = \Phi_i^E + \Phi_e^E = 0\ bits$$

8.2.3.4 Icing Detector

Acoplamento interno

$$\Phi_i^E = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^E = -\left[\left(\frac{1}{1}\log_2\frac{1}{1}\right) * 2\right] = 0$$

Acoplamento

$$\Phi^E = \Phi_i^E + \Phi_e^E = 0\ bits$$

8.2.3.5 Oxygen

Acoplamento interno

$$\Phi_i^E = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^E = -\left[\left(\frac{16}{16}\log_2\frac{16}{16}\right) * 2\right] = 0$$

Acoplamento

$$\Phi^E = \Phi_i^E + \Phi_e^E = 0\ bits$$

8.2.3.6 Control Panel

Acoplamento interno

$$\Phi_i^E = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^E = -\left[2 * \left(\frac{1}{50}\log_2\frac{1}{50}\right) * 2 + 2 * \left(\frac{2}{50}\log_2\frac{2}{50}\right) * 2 + \left(\frac{3}{50}\log_2\frac{3}{50}\right) * 2 + 2 * \left(\frac{4}{50}\log_2\frac{4}{50}\right) * 2 + \left(\frac{5}{50}\log_2\frac{5}{50}\right) * 2 + \left(\frac{28}{50}\log_2\frac{28}{50}\right) * 2\right] = 4{,}44$$

Acoplamento

$$\Phi^E = \Phi_i^E + \Phi_e^E = 4{,}44\ bits$$

8.2.3.7 Pressurization

Acoplamento interno

$$\Phi_i^E = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^E = -\left[\left(\frac{3}{3}\log_2\frac{3}{3}\right) * 2\right] = 0$$

Acoplamento

$$\Phi^E = \Phi_i^E + \Phi_e^E = 0 bits$$

8.2.3.8 Wind Shield Heating

Acoplamento interno

$$\Phi_i^E = -\left[8\left(\frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8}\right) * (1 + 0{,}17)\right] = 3{,}51$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^E = -\left[2\left(\frac{2}{16}\log_2\frac{2}{16}\right) * (1 + 0{,}33) + 2\left(\frac{6}{16}\log_2\frac{6}{16}\right) * (1 + 0{,}17)\right] = 2{,}23$$

Acoplamento

$$\Phi^E = \Phi_i^E + \Phi_e^E = 5{,}74\ bits$$

A Tabela 8.7 apresenta as conexões internas do sistema de *Wind shield heating*, enquanto que a Tabela 8.8 apresenta as conexões externas.

Tabela 8.7 – Características de acoplamento das conexões internas do sistema de *wind shield heating*

Elemento produtor	Elemento consumidor	Característica de acoplamento
Elemento Wind shield heating 1	Elemento Wind shield heating 3	Dados
Elemento Wind shield heating 1	Elemento Wind shield heating 4	Dados
Elemento Wind shield heating 1	Elemento Wind shield heating 5	Dados
Elemento Wind shield heating 1	Elemento Wind shield heating 6	Dados
Elemento Wind shield heating 2	Elemento Wind shield heating 7	Dados
Elemento Wind shield heating 2	Elemento Wind shield heating 8	Dados
Elemento Wind shield heating 2	Elemento Wind shield heating 9	Dados
Elemento Wind shield heating 2	Elemento Wind shield heating 10	Dados

Tabela 8.8 – Características de acoplamento das conexões externas do sistema de *wind shield heating*

Elemento produtor	Elemento consumidor	Característica de acoplamento
Elemento Wind shield heating 1	3. Electrical system	Controle (2)
Elemento Wind shield heating 1	11. Indicating / Recording systems	Dados (6)
Elemento Wind shield heating 2	3. Electrical system	Controle (2)
Elemento Wind shield heating 2	11. Indicating / Recording systems	Dados (6)

8.2.3.9 Environmental Control System

Acoplamento

$$\Phi^E = 1{,}52 + 12{,}68 + 0 + 0 + 0 + 4{,}44 + 0 + 5{,}74 = 24{,}38\ bits$$

8.2.4 Acoplamento Máximo

O acoplamento máximo ocorreria se quando a complexidade fosse máxima e os fatores de acoplamento assumissem seus valores máximos. No caso do sistema analisado isso implica dizer que $\phi = 2$ todas as conexões do sistema. As seções

abaixo apresentam o acoplamento máximo dos elementos do *Environmental control system*.

8.2.4.1 Air Conditioning

Acoplamento interno

$$\Phi_i^M = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^M = -\left[2 * \left(\frac{9/2}{9}\log_2\frac{9/2}{9}\right) * 2\right] = -\log_2\frac{9/2}{9} * 2 = -\log_2\frac{1}{2} * 2 = 2$$

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 2\ bits$$

8.2.4.2 Bleed

Acoplamento interno

$$\Phi_i^M = -\log_2\frac{1}{70} * 2 = 12{,}24$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^M = -\log_2\frac{1}{7} = 5{,}60$$

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 17{,}84\ bits$$

8.2.4.3 Emergence Valve

Acoplamento interno

$$\Phi_i^M = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^M = -\log_2\frac{1}{1} * 2 = 0$$

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 0\ bits$$

8.2.4.4 Icing Detector

Acoplamento interno

$$\Phi_i^M = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^M = -\log_2 \frac{1}{1} * 2 = 0$$

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 0\ bits$$

8.2.4.5 Oxygen

Acoplamento interno

$$\Phi_i^M = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^M = -\log_2 \frac{1}{1} * 2 = 0$$

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 0\ bits$$

8.2.4.6 Control Panel

Acoplamento interno

$$\Phi_i^M = 0$$

Acoplamento externo

$$\Gamma_e^M = -\log_2 \frac{1}{8} * 2 = 6$$

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 6\ bits$$

8.2.4.7 Pressurization

Acoplamento interno

$$\Phi_i^M = 0$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^M = -\log_2 \frac{1}{1} * 2 = 0$$

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 0\ bits$$

8.2.4.8 Wind Shield Heating

Acoplamento interno

$$\Phi_i^M = -\log_2 \frac{1}{8} * 2 = 6$$

Acoplamento externo

$$\Phi_e^M = -\log_2 \frac{1}{4} * 2 = 4$$

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = \Phi_i^M + \Phi_e^M = 10\ bits$$

8.2.4.9 Environmental Control System

Acoplamento máximo

$$\Phi^M = 2 + 17{,}84 + 0 + 0 + 0 + 6 + 0 + 10 = 35{,}84\ bits$$

A Figura 8.8 representa a acoplamento do *Environmental control system* em relação ao seu acoplamento máximo.

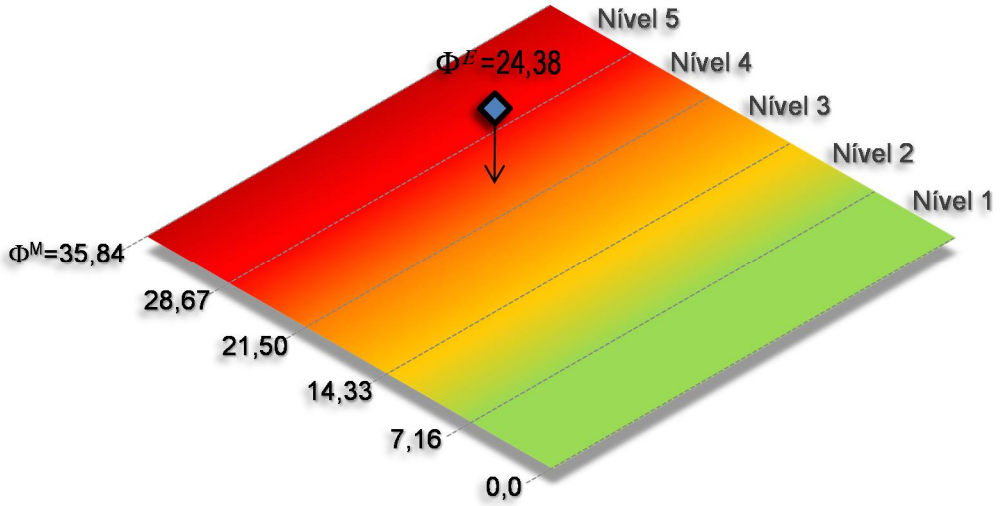


Figura 8.8 – Acoplamento em relação ao acoplamento máximo do *Environmental control system*

8.2.5 Criticalidade

A criticalidade de um sistema é determinada pela pior condição de falha a ele associada. A determinação da criticalidade faz parte do processo de análise de segurança dos sistemas. Trata-se de uma atividade chave em sistemas críticos quanto a segurança, sendo que o resultado obtido estabelece o rigor com que cada um dos sistemas deve ser desenvolvido.

O número de condições de falha e suas correspondentes classificações variam bastante dependendo das características do sistema em questão e da maneira com que é utilizado no projeto da aeronave. Em uma determinada arquitetura, a falha de um sistema pode ter efeito catastrófico enquanto que em outra o efeito pode ser de ordem maior. No caso desta Tese, foi assumida uma arquitetura de sistema típica de aeronaves de transporte regional. As condições de falha e respectivas classificações foram validadas junto a um engenheiro especialista em sistemas de controle ambiental de aeronaves.

A classificação das condições de falha segue a proposta da AC 25.1309 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2002), de maneira que:

K = {*Catastrófico*, *Hazardous, Maior, Menor, Sem efeito em segurança*}

A Tabela 8.9 apresenta a classificação dada para a pior condição de falha identificada para cada um dos subsistemas do *Environmental control system*.

Tabela 8.9 – Sumário das condições de falha do *environmental control system*

Sistema	Condição de falha	Classificação da falha
1.1 Air conditioning	Vazamento de ar quente na região do compartimento de ar condicionado sem detecção. Se todas as proteções falharem (Probabilidade<10^{-9}) haverá aquecimento das estruturas primárias do avião degradando propriedade dos materiais (alumínio) e podendo não suportar as cargas previstas em voo. O cenário considerado é conservativo. Todas as fases de voo	Catastrófica
1.2 Bleed	Vazamento de ar quente na região onde passa os dutos de *bleed* sem detecção. Mesma justificativa apresentada para o sistema de *Air conditioning*. Todas as fases de voo	Catastrófica
1.3 Emergency valve	Mal funcionamento da *Emergence valve* A válvula de emergência não abre quando acionada. Fase de voo de cruzeiro (Cruise)	Hazardous
1.4 Icing detector	Perda de 2 detectores de gelo sem indicação. Quando o sistema é projetado para confiar no sistema (Probabilidade 10^{-9}), o piloto não vai mais prestar atenção na formação de gelo nos bordos de ataque podendo degradar as performances aerodinâmicas do avião e estolar inadvertidamente. Se tiver em aproximação para pouso, não há tempo para recuperar o avião. Todas as fases de voo em condição de gelo	Catastrófica

Tabela 8.9 – Sumário das condições de falha do *environmental control system (cont.)*

Sistema	Condição de falha	Classificação da falha
1.5 Oxygen	Perda de O2 sem indicação da falha. O sistema de O2 é back-up do sistema de pressurização. Portanto a sua perda não afeta segurança, mas associado a descompressão súbita leva a perda de consciência do piloto. Portanto o sistema é projetado para (10^{-9}) associado a probabilidade de descompressão súbita da ordem de 10^{-6}). Voo acima de 10000 ft (Cruise)	Maior
1.6 Control panel	Perda de indicação no *Control panel* A falta de indicação em algumas situações é classificada como catastrófica. Todas as fases de voo	Catastrófica
1.7 Pressurization	Perda de pressão de cabine sem indicação. Perda de consciência dos pilotos e não tem indícios físicos de que há perda de pressurização quando a taxa de descompressão for baixa. Voo acima de 10000 ft (Cruise)	Catastrófica
1.8 Wind shield heating	Perda de aquecimento sem indicação. Há formação de gelo e fog no parabrisa. O procedimento é desviar da condição de gelo (nuvens). Ao reduzir a altitude de voo para pouso, a temperatura do parabrisa vai aquecer e minimizar o problema. Todas as fases de voo em que ocorrer temperatura abaixo de 0 C ou altitudes acima de 8000 ft	Major

Quanto aos sistemas que possuem conexões com o *Environmental control system* as respectivas piores condições de falha e classificações são apresentadas na Tabela 8.10.

Tabela 8.10 – Sumário das condições de falha dos sistemas que possuem conexão com o *environmental control system*

Sistema	Condição de falha	Classificação da falha
3. Electrical system	Perda completa do sistema de geração e distribuição elétrica.	Catastrófico
4. Flight control system, primary and secondary	Perda do sistema de comandos de voo primário e secundário	Catastrófico
7. Navigation and guidance system	Perda do sistema de navegação	Hazardous
11. Indicating / Recording systems	Indicação errada (fase de "Landing")	Catastrófico

Tendo como base as possíveis classificações os fatores de criticalidade são:

$$\lambda = \{0{,}33;\ 0{,}26;\ 0{,}20;\ 0{,}13;\ 0{,}07\}$$

Caso os subsistemas do *Environmental control system* possuíssem partições, então cada uma delas poderia ter criticalidade específica. Contudo, como isso não ocorre, todas as conexões internas de seus elementos possuem criticalidade igual a 1, ou seja:

$$\Lambda_{\mathrm{i,j}} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i} = 1$$

No caso das conexões externas, os valores de criticalidade correspondentes são apresentados na Tabela 8.11.

Tabela 8.11 – Criticalidade das conexões externas do *environmental control system*

Conexão		Criticalidade da conexão (Λ) $\Lambda_{i,j} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i}$
1.1 Air conditioning	1.2 Bleed	1,00
	11. Indicating / Recording systems	0,79
1.2 Bleed	1.1 Air conditioning	1,00
	1.3 Emergence valve	0,79
	1.4 Icing detector	1,00
	1.6 Control panel	1,00
	3. Electrical system	1,00
	4. Flight control system, primary and secondary	1,00
	11. Indicating / Recording systems	0,79
1.3 Emergence valve	1.2 Bleed	1,27
1.4 Icing detector	1.2 Bleed	1,00
1.5 Oxygen	11. Indicating / Recording systems	1,30
1.6 Control panel	Seres Humanos	1,00
	1.1 Air conditioning	1,00
	1.2 Bleed	1,00
	1.5 Oxygen	0,61
	1.7 Pressurization	0,79
	1.8 Wind shield heating	0,79
	3. Electrical system	1,00
	7. Navigation and guidance system	1,00
	11. Indicating / Recording systems	0,79
1.7 Pressurization	11. Indicating / Recording systems	0,79
1.8 Wind shield heating	3. Electrical system	1,65
	11. Indicating / Recording systems	1,30

A Figura 8.9 apresenta os valores das criticalidade das conexões do *Environmental control system* em relação ao valor máximo. O valor da criticalidade máxima é obtido quando há uma conexão entre um elemento cuja classificação da pior condição de falha não possui impacto em segurança (λ=0,07) e outro em que a pior condição de falha é classificada como catastrófica (λ=0,33). Neste caso o valor de Λ^M=4,71.

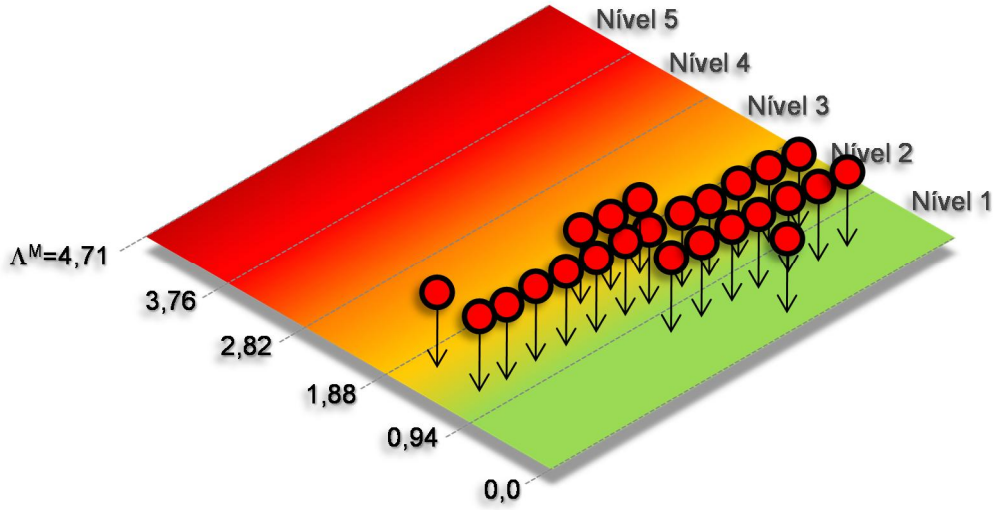


Figura 8.9 – Criticalidade das conexões dos elementos do *environmental control system* em relação a respectiva criticalidade máxima

8.2.6 Índice C^2A

O índice C^2A de cada conexão do sistema, internas e externas, é obtido por meio da equação (7.23). A Tabela 8.12 sumariza o cálculo do índice C^2A referente às conexões internas do *Enviromental control system*, enquanto que a Tabela 8.13 refere-se às conexões externas.

Tabela 8.12 – Índice C^2A relativo às conexões internas do *enviromental control system*

Produtor	Consumidor	Γ^E	Φ^E	Λ^E	C^2A
Elemento Bleed 1	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 2	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 3	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 4	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 5	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 6	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 7	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 8	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 9	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 10	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 11	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 12	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 13	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 14	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 15	Elemento Bleed 30	0,119	0,218	1,000	0,337

Tabela 8.13 – Índice C^2A relativo às conexões internas do *enviromental control system (cont.)*

Produtor	Consumidor	Γ^E	Φ^E	Λ^E	C^2A
Elemento Bleed 16	Elemento Bleed 30	0,119	0,218	1,000	0,337
Elemento Bleed 17	Elemento Bleed 30	0,119	0,218	1,000	0,337
Elemento Bleed 18	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 19	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 20	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 21	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 22	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 23	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 24	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 25	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 26	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 27	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 28	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 29	Elemento Bleed 30	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 30	Elemento Bleed 9	0,070	0,105	1,000	0,176
	Elemento Bleed 10	0,070	0,094	1,000	0,164
	Elemento Bleed 11	0,119	0,158	1,000	0,278
	Elemento Bleed 12	0,119	0,158	1,000	0,278
	Elemento Bleed 15	0,070	0,094	1,000	0,164
	Elemento Bleed 16	0,070	0,105	1,000	0,176
	Elemento Bleed 17	0,070	0,105	1,000	0,176
	Elemento Bleed 18	0,119	0,158	1,000	0,278
	Elemento Bleed 19	0,119	0,158	1,000	0,278
	Elemento Bleed 20	0,119	0,158	1,000	0,278
	Elemento Bleed 31	0,070	0,094	1,000	0,164
	Elemento Bleed 32	0,070	0,105	1,000	0,176
	Elemento Bleed 33	0,070	0,105	1,000	0,176
	Elemento Bleed 34	0,070	0,105	1,000	0,176
	Elemento Bleed 38	0,070	0,105	1,000	0,176
Elemento Bleed 31	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 35	Elemento Bleed 30	0,119	0,218	1,000	0,337
Elemento Bleed 36	Elemento Bleed 30	0,119	0,218	1,000	0,337
Elemento Bleed 37	Elemento Bleed 30	0,119	0,218	1,000	0,337
Elemento Bleed 39	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 40	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 41	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 42	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 43	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 44	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 45	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 46	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 47	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 48	Elemento Bleed 30	0,119	0,179	1,000	0,298
Elemento Bleed 49	Elemento Bleed 30	0,119	0,139	1,000	0,258
Elemento Bleed 50	Elemento Bleed 30	0,119	0,139	1,000	0,258
Elemento Bleed 51	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164

Tabela 8.14 – Índice C^2A relativo às conexões internas do *enviromental control system (cont.)*

Produtor	Consumidor	Γ^E	Φ^E	Λ^E	C^2A
Elemento Bleed 52	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 53	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 54	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 55	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 56	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 57	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 58	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 59	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Bleed 60	Elemento Bleed 30	0,070	0,094	1,000	0,164
Elemento Wind shield heating 1	Elemento Wind shield heating 3	0,375	0,439	1,000	0,814
	Elemento Wind shield heating 4	0,375	0,439	1,000	0,814
	Elemento Wind shield heating 5	0,375	0,439	1,000	0,814
	Elemento Wind shield heating 6	0,375	0,439	1,000	0,814
Elemento Wind shield heating 2	Elemento Wind shield heating 7	0,375	0,439	1,000	0,814
	Elemento Wind shield heating 8	0,375	0,439	1,000	0,814
	Elemento Wind shield heating 9	0,375	0,439	1,000	0,814
	Elemento Wind shield heating 10	0,375	0,439	1,000	0,814

21,426

Tabela 8.15 – Índice C^2A relativo às conexões externas do e*nviromental control system*

Produtor	Consumidor	Γ^E	Φ^E	Λ^E	C^2A
1.1 Air conditioning	1.2 Bleed	0,282	0,564	1,000	0,846
	11. Indicating / Recording systems	0,482	0,964	0,788	1,140
1.2 Bleed	1.1 Air conditioning	0,345	0,619	1,000	0,964
	1.3 Emergence valve	0,172	0,258	0,788	0,338
	1.4 Icing detector	0,272	0,408	1,000	0,680
	1.6 Control panel	0,482	1,542	1,000	2,024
	3. Electrical system	0,172	0,201	1,000	0,373
	4. Flight control system, primary and secondary	0,401	0,469	1,000	0,870
	11. Indicating / Recording systems	0,272	0,318	0,788	0,465
1.3 Emergence valve	1.2 Bleed	0,000	0,000	1,269	0,000
1.4 Icing detector	1.2 Bleed	0,000	0,000	1,000	0,000
1.5 Oxygen	11. Indicating / Recording systems	0,000	0,000	1,300	0,000

Tabela 8.16 – Índice C^2A relativo às conexões externas do e*nviromental control system (cont.)*

Produtor	Consumidor	Γ^E	Φ^E	Λ^E	C^2A
1.6 Control panel	Seres Humanos	0,113	0,226	1,000	0,339
	1.1 Air conditioning	0,244	0,487	1,000	0,731
	1.2 Bleed	0,468	0,937	1,000	1,405
	1.5 Oxygen	0,113	0,226	0,606	0,205
	1.7 Pressurization	0,186	0,372	1,000	0,557
	1.8 Wind shield heating	0,292	0,583	0,606	0,530
	3. Electrical system	0,186	0,372	1,000	0,557
	7. Navigation and guidance system	0,292	0,583	1,000	0,875
	11. Indicating / Recording systems	0,332	0,664	0,788	0,785
1.7 Pressurization	11. Indicating / Recording systems	0,000	0,000	0,788	0,000
1.8 Wind shield heating	3. Electrical system	0,750	0,998	1,650	2,883
	11. Indicating / Recording systems	1,061	1,242	1,300	2,994
					19,561

Dessa maneira, a partir da eq. 7.24, tem-se que:

$$C^2A^E = (21{,}426 + 19{,}561) = 40{,}987\ bits$$

8.2.6.1 Índice C^2A Máximo

O índice C^2A é máximo quando complexidade, acoplamento e criticalidade também são máximos. Tais valores são sumarizados na Tabela 8.14.

Tabela 8.17 – Valores máximos para complexidade, acoplamento e criticalidade

Γ_i^M	Γ_e^M	Γ^M	Φ_i^M	Φ_e^M	Φ^M	Λ^M
10,12	7,80	17,92	18,24	17,60	35,84	4,71

Assim o valor de C^2A é:

$$C^2A^M = (17{,}92 + 35{,}84) * 4{,}71 = 253{,}21\ bits$$

A relação entre o índice C^2A efetivo e o correspondente valor máximo é apresentada na Figura 8.10.

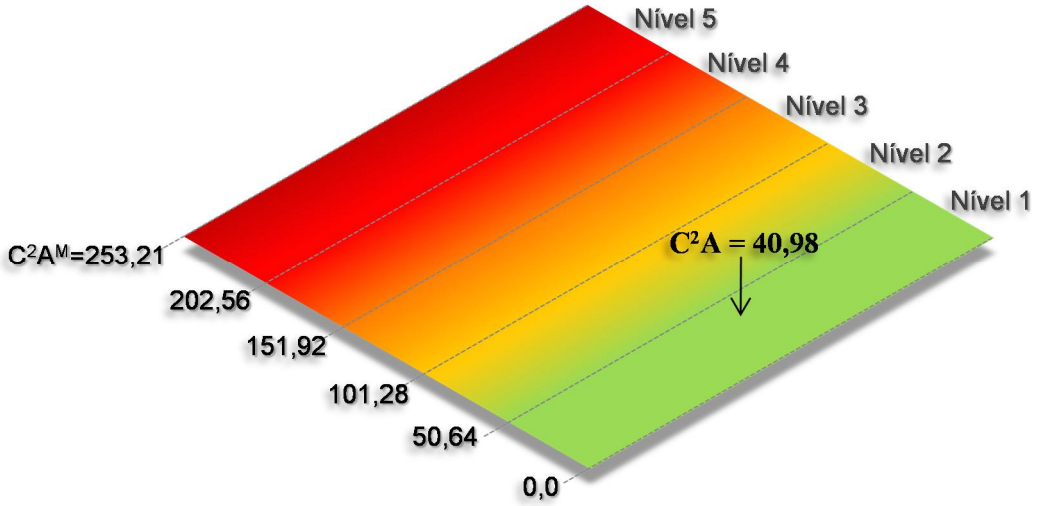


Figura 8.10 – Relação entre o valor do índice C^2A efetivo e correspondente valor máximo

8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da técnica C^2A apresentada neste capítulo utilizou como referência um sistema de controle ambiental com elementos encontrados em aeronaves de transporte regional.

É necessário ressaltar que obter informações completas sobre projetos de aeronaves e que, principalmente, possam ser publicadas não é tarefa simples. A questão do sigilo industrial impede que informações de projetos de aeronaves sejam divulgadas. Na impossibilidade de se utilizar tal informação foram analisadas arquiteturas usadas em sistemas de controle ambiental em diferentes aeronaves e que se encontram disponíveis na internet ou na literatura especializada. A partir dessas informações contruiu-se uma arquitetura fictícia, porém coerente contendo elementos representativos daqueles que seriam encontrados no projeto de uma aeronave real. Os dados referentes às conexões entre os elementos dos sistemas são reais. Os nomes foram modificados assim como o número de conexões de alguns elementos. Essa modificação foi condição necessária para se utilizar tais dados.

O sistema de controle ambiental foi analisado no sentido da sua representatividade para os objetivos da Tese. Tanto em número de conexões quanto à criticalidade de seus elementos o sistema de controle ambiental foi considerado entre os três maiores sistemas de uma aeronave de transporte regional. À frente dele encontra-se somente o sistema aviônico e, em algumas situações, o sistema de comandos de voo. No caso deste último as lógicas envolvidas são mais elaboradas, contudo em termos estruturais o sistema de controle ambiental possui, em geral, mais conexões. Dessa maneira, a escolha do sistema de controle ambiental mostra-se como representativa dos demais sistemas da aeronave.

Os dados obtidos são difíceis de comparar em termos absolutos uma vez que as arquiteturas e correspondentes conexões variam bastante. Por outro lado o fato de ser possível determinar seus valores máximos permite que se divida o intervalo de dados que vai do zero até o valor máximo em um número qualquer de subintervalos. Adotou-se na Tese o padrão de 5 níveis. Esse recurso permite relativizar os valores obtidos para a complexidade, acoplamento, criticalidade de cada um dos sistemas. Permite também que os valores do índice C^2A possam ser comparados.

Na Figura 8.11 encontram-se os representados os 8 subsistemas do *Environmental control system* em termos de suas complexidades externas efetivas.

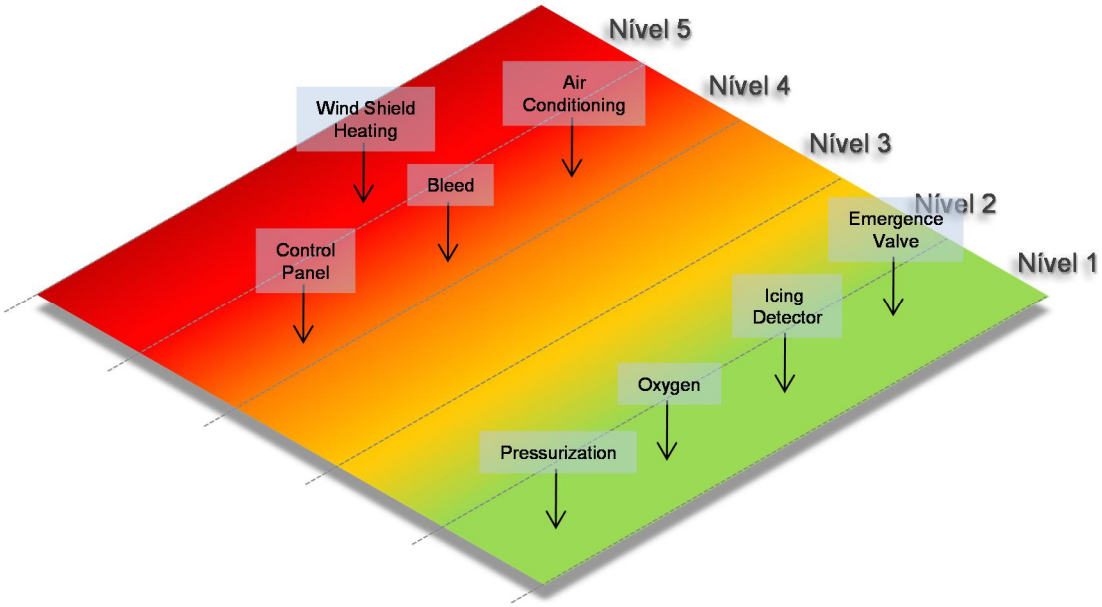


Figura 8.11 – Comparação relativa das complexidades externas efetivas

A Figura 8.12 apresenta os subsistemas do *Environmental control system* em termos de suas complexidades internas efetivas.

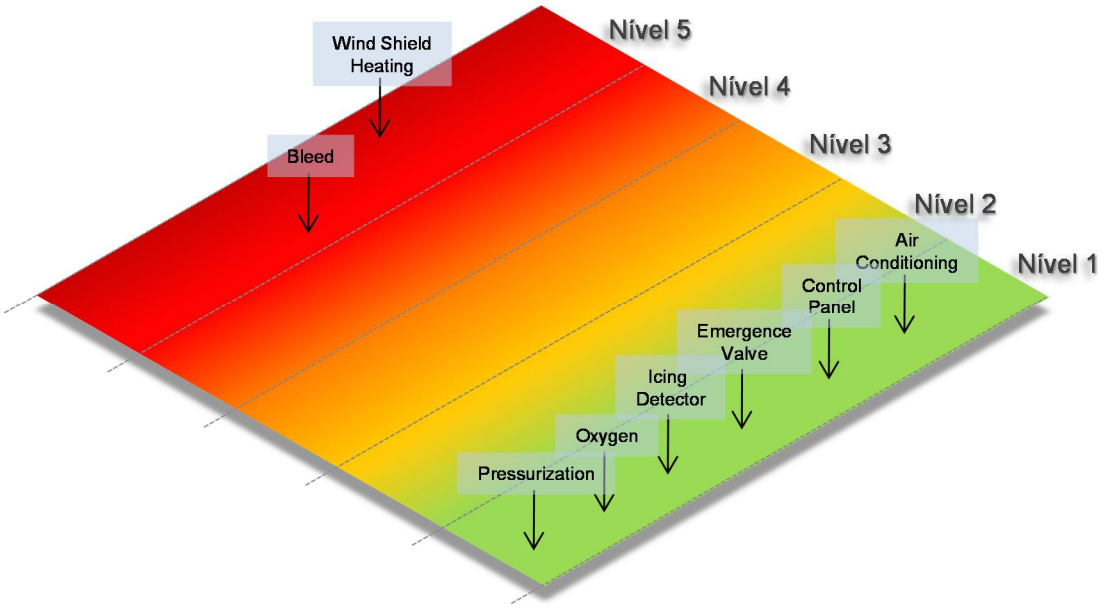


Figura 8.12 – Comparação relativa das complexidades internas efetivas

A Figura 8.13 apresenta os subsistemas do *Environmental control system* em termos dos respectivos acoplamentos externos efetivos.

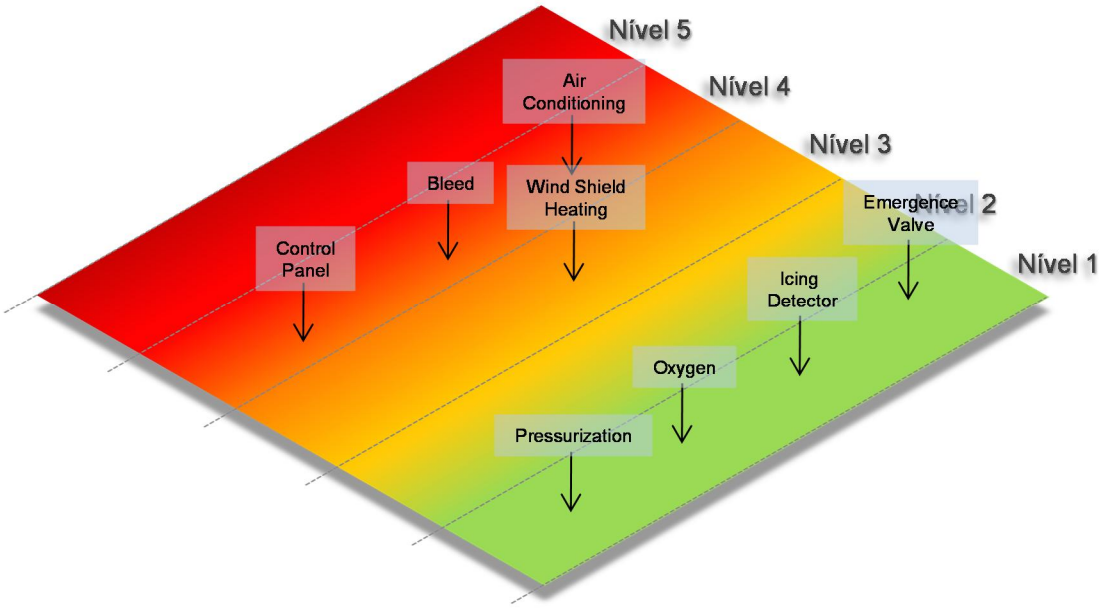


Figura 8.13– Comparação relativa dos acoplamentos externos efetivos

A Figura 8.14 apresenta os subsistemas do *Environmental control system* em termos dos respectivos acoplamentos internos efetivos.

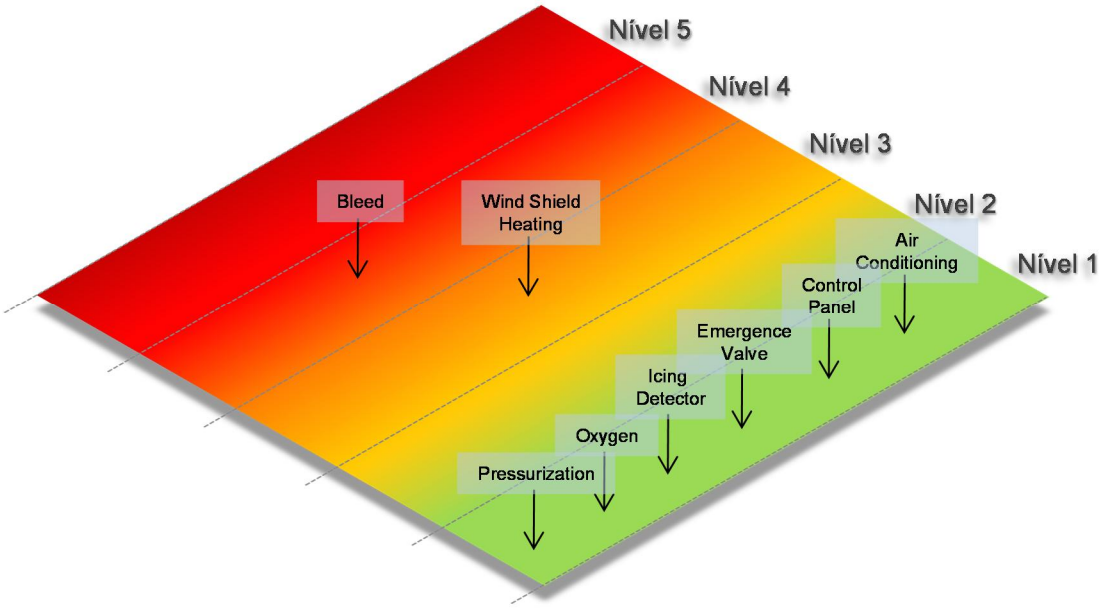


Figura 8.14 – Comparação relativa dos acoplamentos internos efetivos

O sistema de *Bleed* é destacado o subsistema com maior complexidade e também maior acoplamento. O valor medido indica que o sistema de *Bleed* está fortemente conectado aos demais elementos do sistema. Sendo que tal informação é coerente com as características físicas do sistema que é um provedor de ar para os sistemas de *Air conditioning*, *Pressurization*, e *Icing detector*, além de conexão com o *Control panel*.

Já o sistema de *Wind shield heating* possui alta complexidade interna uma vez que suas conexões encontram-se distribuídas de maneira equitativa entre os elementos internos. Quando a frequência de distribuição das conexões é a mesma para todos os elementos conectados do sistema então a complexidade é máxima. Contudo, em decorrência das suas características de acoplamento, o valor do acoplamento medido encontra-se na faixa intermediária da escala.

O sistema de *Air Conditioning* apresenta alta complexidade e acoplamento externos enquanto que sua complexidade e acoplamento internos é zero. O mesmo ocorre

com o *Control panel*. Os demais elementos possuem complexidade e acoplamento iguais a zero.

Com relação a criticalidade é possível observar na Figura 8.15 que o sistema de *Bleed* encontra-se destacado. Entre as conexões do *Environment control system* e demais sistemas o *Control panel* é o que possui maior proeminência. Com relação às conexões externas, o *Electrical system* aparece como item de maior destaque. Os valores das demais conexões, fora do escopo da análise, foram suprimidos de maneira proposital.

Sistemas		Sere Humanos	Ambiente	1. Environmental control system								2. Communication system	3. Electrical system	4. Flight control system, primary and secondary	5. Fuel system	6. Landing gear	7. Navigation and guidance system	8. Hydraulic system	9. Auxiliary power unit	10. Thrust reverser	11. Indicating / Recording systems	12. Standard Practices and Structures - General	13. Propellers / Propulsors
				1.1 Air conditioning	1.2 Bleed	1.3 Emergence valve	1.4 Icing detector	1.5 Oxygen	1.6 Control panel	1.7 Pressurization	1.8 Wind shield heating												
Seres Humanos									1														
Ambiente																							
1. Environmental control system	1.1 Air conditioning				1				1														
	1.2 Bleed			1		1,27	1		1														
	1.3 Emergence valve				0,79																		
	1.4 Icing detector				1																		
	1.5 Oxygen								0,61														
	1.6 Control panel				1																		
	1.7 Pressurization								0,79														
	1.8 Wind shield heating								0,79														
2. Communication system																							
3. Electrical system					1				1		1,65												
4. Flight control system, primary and secondary					1																		
5. Fuel system																							
6. Landing gear																							
7. Navigation and guidance system									1														
9. Hydraulic system																							
9. Auxiliary power unit																							
10. Thrust reverser																							
11. Indicating / Recording systems				0,79	0,79			1,3	0,79	0,79	1,3												
12. Standard Practices and Structures - General																							
13. Propellers / Propulsors																							

Figura 8.15 – Criticalidade das conexões do *environment control system*

O índice C^2A é um indicador de risco que tem como base a composição de complexidade, acoplamento e criticalidade. Quando o índice é calculado novos elementos de risco surgem na matriz. É o caso do *Control panel* e do sistema de indicação no cockpit (*Indicating / Recording system*). O código de cores adotado na Figura 8.15 e 8.16 fornece um Paretto onde os itens com maior índice C^2A, ou seja, de maior risco aparecem em cores quentes e os de menor risco em cores frias.

Sistemas		Sere Humanos	Ambiente	1. Environmental control system								2. Communication system	3. Electrical system	4. Flight control system, primary and secondary	5. Fuel system	6. Landing gear	7. Navigation and guidance system	8. Hydraulic system	9. Auxiliary power unit	10. Thrust reverser	11. Indicating / Recording systems	12. Standard Practices and Structures - General	13. Propellers / Propulsors
				1.1 Air conditioning	1.2 Bleed	1.3 Emergence valve	1.4 Icing detector	1.5 Oxygen	1.6 Control panel	1.7 Pressurization	1.8 Wind shield heating												
Seres Humanos									0,339														
Ambiente																							
1. Environmental control system	1.1 Air conditioning				0,964				0,731														
	1.2 Bleed			0,846		0	0		1,405														
	1.3 Emergence valve				0,338																		
	1.4 Icing detector				0,68																		
	1.5 Oxygen								0,205														
	1.6 Control panel				2,024																		
	1.7 Pressurization								0,557														
	1.8 Wind shield heating								0,53														
2. Communication system																							
3. Electrical system					0,373				0,557		2,883												
4. Flight control system, primary and secondary					0,87																		
5. Fuel system																							
6. Landing gear																							
7. Navigation and guidance system									0,875														
9. Hydraulic system																							
9. Auxiliary power unit																							
10. Thrust reverser																							
11. Indicating / Recording systems				1,14	0,465			0	0,785	0	2,994												
12. Standard Practices and Structures - General																							
13. Propellers / Propulsors																							

Figura 8.16 – C^2A das conexões externas do *environment control system*

O índice C^2A não pretende ser um substituto para os atuais indicadores de criticalidade utilizados nas análises de segurança de sistemas. Reconhece-se que existe que ainda há muito que se fazer no sentido de amadurecer os conceitos discutidos nesta Tese. Apesar da sua generalidade, antes de se propor sua adoção pura e simples, é importante verificar seu comportamento em outros tipos de sistemas e, também, ampliar o número de sistemas analisados. Contudo, tendo como base os resultados obtidos é possível afirmar que o índice C^2A pode ser usado em conjunto com as tradicionais técnicas de análise de segurança. Nesse sentido, o índice C^2A pode auxiliar na identificação da influência da complexidade, acoplamento e criticalidade das conexões entre elementos de um sistema, agindo em uma área na qual as atuais técnicas de análise de segurança não possuem recursos para atuar.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões sobre o trabalho realizado destacando as principais contribuições da técnica proposta. São apresentadas algumas considerações de ordem prática e também identificadas oportunidades de continuidade da pesquisa. A relação entre os tópicos abordados são ilustrados na Figura 9.1

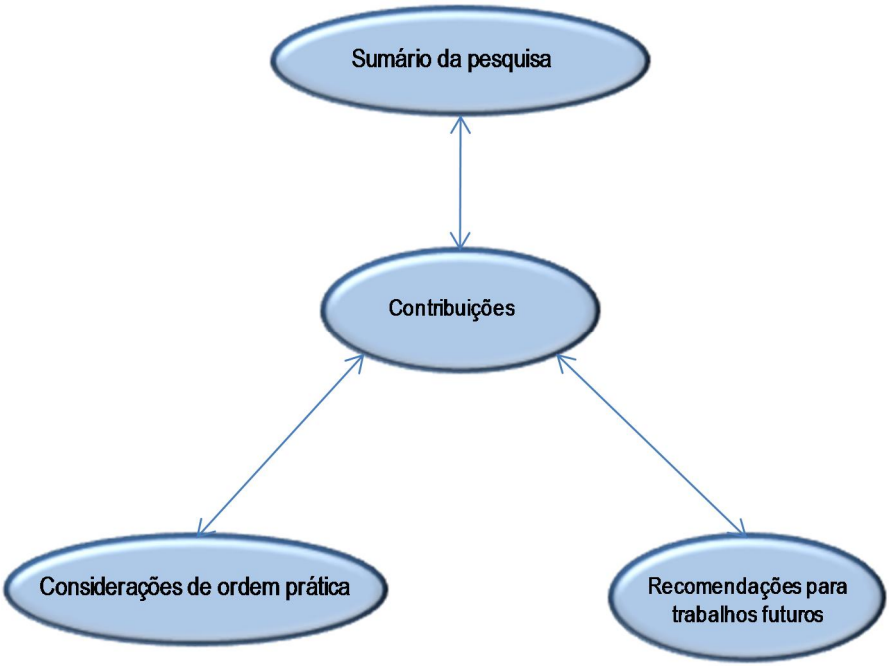


Figura 9.1 – Estrutura de tópicos do capítulo 9

9.1 SUMÁRIO DA TESE

Na medida em que a engenharia progride em termos dos desafios que surgem a cada dia, novas ferramentas se tornam necessárias. Conhecer mais sobre o objeto em desenvolvimento é questão fundamental para que um projeto obtenha êxito. Para tanto a adoção de indicadores que possam direcionar a atenção dos engenheiros para aspectos relevantes de um projeto torna-se cada vez mais relevante. Nesse sentido o índice C^2A mostra-se consistente em sua proposta de apresentar de maneira clara os riscos relativos à segurança determinados a partir da análise das conexões internas de um sistema e externas, no caso, entre sistemas.

Para se chegar ao índice C^2A foi necessário estabelecer uma base de onde as informações sobre as conexões entre elementos de um sistema ou entre sistemas pudessem ser coletadas. A opção pelo uso de matrizes foi apoiada por se tratar de uma estrutura de fácil manipulação e que pode ser utilizada para operações matemáticas e também como referência para representações gráficas como, por exemplo, grafos.

O conceito de complexidade utilizado coloca-a como uma propriedade sistêmica que emerge em função da existência de conexões entre sistemas. Dentre as várias abordagens possíveis para medi-la foi adotada como referência a Teoria da Informação. O princípio adotado assume que quanto maior a quantidade de informação necessária para representar as conexões de um sistema tanto maior é a sua complexidade.

O acoplamento foi tratado como sendo uma medida da força da conexão entre sistemas. A base da medida é a quantidade de informação existente na conexão entre dois elementos ponderada por um fator de acoplamento. O fator de acoplamento por sua vez é quantificado em função de um conjunto de características de acoplamento identificadas relevantes para o projeto.

O conceito de fator de acoplamento foi sugerido nesta Tese como uma maneira de permitir que projetos com diferentes características de acoplamento pudessem ser medidos da mesma maneira. A alternativa descartada seria estabelecer a priori um

conjunto único de características de acoplamento. Caso isso tivesse sido feito a técnica se tornaria muito restrito. Além disso, dependendo do projeto algumas das características de acoplamento predefinidas poderiam não lhe ser aplicável.

Complexidade e acoplamento constituem-se na base da *Normal Accident Theory* proposta por Charles Perrow (1999). De acordo com Perrow sistemas complexos e que possuem alto acoplamento são mais susceptíveis a acidentes. A NAT sintetiza as preocupações de diversos especialistas com relação às implicações do aumento da complexidade dos sistemas e seus efeitos em segurança. A ligação estabelecida entre complexidade, acoplamento e segurança foi uma das principais motivações para utilizar a NAT como pano de fundo para o desenvolvimento desta Tese.

Ainda que a NAT seja objeto de diversos trabalhos de pesquisa muito pouco foi encontrado em termos de indicadores quantitativos que possam apoiar a teoria. Foram encontrados dois trabalhos de pesquisa sobre a NAT que propõem métricas para a quantificação de complexidade e acoplamento. O primeiro está relacionado a um estudo de caso na indústria petrolífera (WOLF, 2001) e o segundo é uma aplicação para sistemas computacionais (SAMMARCO, 2005). No primeiro caso as métricas desenvolvidas são específicas para o domínio de refinarias de petróleo, enquanto que no segundo o autor propôs essencialmente o uso de métricas já tradicionais no contexto da engenharia de software como, por exemplo, o índice ciclomático de McCabe.

A abordagem apresentada nesta Tese para a medida da complexidade e acoplamento tem caráter geral. Entende-se que tal generalidade permite que as formas de medição propostas possam ser aplicadas a diferentes domínios. A representação da estrutura de conexões de um sistema por meio de matrizes e o uso da Teoria da Informação não estabelecem restrições quanto ao tipo de sistema que pode ser modelado.

Outro aspecto importante que viabiliza utilizar de maneira integrada complexidade e acoplamento é a adoção da Teoria da Informação como base de referência. Tal questão surgiu logo nas primeiras discussões com membros do Grupo de Análise de Segurança de Sistemas (GAS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,

onde foi colocada a pergunta sobre como seriam comparadas propriedades com formas e unidades de medida diferentes.

A NAT considera somente a complexidade e acoplamento quando associa tais propriedades sistêmicas à ocorrência de acidentes. Contudo, em termos práticos mesmo sendo complexo e com alto acoplamento um sistema pode ter baixa criticalidade dentro do projeto que se insere. Computadores de manutenção embarcados em aeronaves são integrados a muitos dos demais sistemas, entretanto são coletores passivos de informações de voo. A leitura e processamento dos dados armazenados em voo ocorrem em solo e por dispositivos externos à aeronave. Baseado em situações como esta propôs-se a inclusão de um novo fator de ponderação relacionado à criticalidade da conexão.

Aqui também foi criado um mecanismo genérico para a definição dos fatores de criticalidade, a fim de adequar o uso da técnica a características específicas de cada projeto. Dessa forma, é possível adequar o uso do índice C^2A também a diferentes domínios.

Índices como o *Development Assurance Level* e *Safety Integrity Level* propostos nas normas ARP4754A (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2011) e IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998) respectivamente, são utilizados para determinar o nível de rigor necessário ao desenvolvimento de um sistema em função dos efeitos das condições de falha correspondentes. Tais indicadores são utilizados pelos desenvolvedores de sistemas críticos, contudo não levam em consideração nem a complexidade nem o acoplamento. O índice C^2A supre essa lacuna baseando-se na composição de três propriedades sistêmicas relevantes para a segurança de sistemas: complexidade, acoplamento e criticalidade.

A possibilidade de comparação dos valores medidos com respectivos máximos é um recurso importante. Em geral valores obtidos de medições são tratados em termos absolutos. Exemplo disso é a tradicional medida de complexidade estrutural de software pelo método de McCabe. Sabe-se a partir da literatura que itens de software com complexidade ciclomática acima de determinados valores

(dependendo da estrutura de controle do programa) tornam-se mais propensos a erros. A obtenção desses valores tem fundamentação empírica e são obtidos ao longo de diversos projetos.

O uso da Teoria da Informação permite que para uma determinada estrutura de conexões seja determinado o valor da quantidade máxima de informação do sistema. Tal recurso é muito interessante, pois permite que o engenheiro compare os valores medidos com a quantidade máxima que aquela estrutura poderia ter, fornecendo-lhe uma referência sobre o quão complexo é o sistema que está desenvolvendo.

Cada estrutura de conexões apresenta um valor máximo diferente. Isso dificulta a comparação entre sistemas. Para viabilizar a comparação dos dados medidos foi criado um critério em que a faixa de valores que vai do zero até o valor máximo medido é dividido em 5 intervalos. Dessa maneira é possível obter uma referência relativa e comparável dos valores medidos entre diferentes sistemas. A opção por 5 intervalos foi arbitrária. Tal valor pode ser ajustado em função de necessidades de representação específicas.

A forma de se obter o índice C^2A está muito mais fundamentada em conceitos do que em formas de medida propriamente ditas. Trabalhou-se com o conceito de que complexidade e acoplamento devem ser medidos e correlacionados. A partir disso é que foram buscadas formas que pudessem quantifica-los. Dessa maneira é possível conceber o cálculo do índice C^2A utilizando-se outras formas de medida que não a Teoria da Informação. Contudo, três princípios fundamentais devem ser seguidos:

- Deve ser possível correlacionar as medidas de complexidade e acoplamento
- Deve ser possível a determinação de máximos
- A criticalidade deve ser usada como fator de ponderação dos valores de complexidade e acoplamento

9.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA TÉCNICA

Entende-se que a principal contribuição da técnica proposta subjaz na integração de propriedades sistêmicas tradicionalmente tratadas de maneira isolada. Complexidade, acoplamento e criticalidade, quando vistas sob a ótica do índice C^2A, permitem a identificação de riscos que não evidentes quando tais propriedades são consideradas separadas umas das outras.

A integração das medidas de complexidade e acoplamento, tendo como base a Teoria da Informação, constitui-se em um meio para a implementação dos conceitos propostos na NAT. A inclusão do fator de criticalidade agrega um parâmetro que pondera o valor obtido para complexidade e acoplamento em termos da real contribuição de uma determinada conexão para a segurança do sistema.

O desenvolvimento do conceito de fator de acoplamento e de fator de criticalidade confere um caráter geral ao cálculo do acoplamento e criticalidade respectivamente. Tais fatores permitem a adequação da técnica a demandas específicas de cada projeto.

A representação dos valores em relação aos máximos é de grande ajuda ao engenheiro na atribuição de significado ao valor medido. A posterior representação destes valores em uma escala qualitativa possibilita a comparação entre dados obtidos de diferentes sistemas.

Destaca-se por fim a possibilidade de utilização da técnica em processos de desenvolvimento de sistemas já consolidados. Este aspecto foi exercitado com a modificação do processo de desenvolvimento de sistemas conforme proposto pela ARP4754 (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 1996) para incluir o cômputo do índice C^2A como parte integrante das atividades previstas na norma. Visualiza-se que tal modificação possa ser feita também na IEC 61.508 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION, 1998).

9.3 CONSIDERAÇÕES DE ORDEM PRÁTICA

O índice C^2A foi aplicado em um sistema de controle ambiental típico de aeronaves de transporte regional. Por sua vez o sistema de controle ambiental é constituído por 8 subsistemas. Tal arquitetura foi considerada representativa de uma classe de sistemas embarcados de uso aeronáutico.

Os dados utilizados foram em sua maioria obtidos de fontes disponíveis na literatura especializada da área aeronáutica, em contatos com especialistas em sistemas ambientais de aeronaves ou em documentação técnica de projetos da empresa Embraer. Quando isso ocorreu, os dados foram renomeados e alguns valores modificados de maneira a preservar a confidencialidade das informações.

Apesar de terem sido usado um conjunto reduzido de dados entendem-se que estes foram suficientes para avaliar o conceito no qual se baseia o cálculo do índice C^2A. Em momento algum houve a pretensão de conduzir uma validação envolvendo um projeto completo de uma aeronave.

A utilização do índice C^2A em um projeto real implica em uma adequação de processos. Um esboço dessa adequação tendo como referência os processos da ARP4754A foi apresentado no Capítulo 8. Contudo, é necessário uma avaliação mais detalhada sobre o esforço necessário para implementar o conjunto de medidas proposto nessa Tese.

9.4 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Ao longo da pesquisa realizada nesta Tese foram identificadas algumas oportunidades para sua continuidade ou mesmo para a realização de novas pesquisas. As próximas seções apresentam os assuntos identificados.

9.4.1 Suporte de um Ambiente Computacional

O processo de modelagem por meio de matrizes e posterior cálculo da complexidade, acoplamento, criticalidade e índice C^2A foi realizado de maneira manual nesta Tese. Trata-se de um trabalho extenso e sujeito a erros devido ao nível de detalhes envolvido. Além disso, o índice C^2A foi calculado para um sistema com 8 subsistemas. A modelagem de uma aeronave completa representa um esforço muitas vezes maior. É necessário considerar não só o esforço necessário para criar as matrizes e realizar os cálculos, mas também para manter as matrizes consistentes em função de mudanças de projeto e refazer os cálculos sempre que surjam essas atualizações.

Dessa maneira, o suporte de um ambiente computacional para dar apoio à criação das matrizes, cálculo do índice C^2A e gerar as visualizações é desejável, a fim de viabilizar a técnica em um ambiente real de projeto. A possibilidade de interface com outras ferramentas pode facilitar a aquisição de dados. Muitas das informações referentes às conexões entre sistemas encontram-se armazenadas em bases de dados como por exemplo, o DOORS. A possibilidade de importar dados desses bancos de dados facilita a geração das matrizes.

9.4.2 Tipos de Acoplamento

Durante o trabalho foram adotadas algumas características de acoplamento sem, contudo, a intenção de se aprofundar no tema. O objetivo foi de mostrar a forma de utilizar as características de acoplamento de maneira independente de quais ou quantas fossem identificadas para o projeto. Contudo, na pesquisa bibliográfica realizada notou-se que o assunto acoplamento apesar de bastante debatido no contexto de software, tem poucas referências quando se trata de sistemas. Vários termos são utilizados designando o mesmo conceito, porém pouco é discutido em termos de característica de acoplamento e suas propriedades. Nesse sentido visualiza-se uma oportunidade de pesquisa sobre o tema acoplamento em sistemas.

9.4.3 Sistemas de Sistemas

O cálculo do índice C^2A foi aplicado tendo-se como referência um sistema de controle ambiental formado por 8 subsistemas. Tal configuração é representativa dos sistemas constituintes de uma aeronave. Entende-se que de maneira análoga o mesmo conceito poderia ser aplicado outros tipos de sistemas, como por exemplo, aqueles instalados em um trem de metrô. Por outro lado, uma possibilidade não experimentada é a aplicação do C^2A em sistemas de sistemas. Entende-se que a modelagem por matrizes permite dar a um sistema de sistemas um tratamento semelhante àquele adotado para os subsistemas do sistema de controle ambiental, porém é necessário um estudo mais detalhado para se obter uma conclusão sobre a viabilidade do uso do índice C^2A neste contexto.

9.4.4 Modelagem da Interação com Seres Humanos

A interface com seres humanos não foi ignorada, contudo não foi detalhada. Assumiu-se uma condição conservativa na sua interação com os sistemas que, para os objetivos da Tese, se mostrou suficiente. Contudo, entende-se que a introdução de modelos de confiabilidade humana poderia trazer um refinamento importante para o entendimento das conexões existentes entre seres humanos e sistema.

9.4.5 Modelagem do Ambiente

O ambiente é uma fonte importante de estímulos para os sistemas. Do ponto de vista estrutural a indicação da existência ou não de interação entre sistemas e ambiente foi modelada. Contudo, o ambiente pode gerar estímulos para os sistemas mudando sua forma de atuação. Essa modelagem traria à técnica um recurso de avaliar a complexidade do sistema como um estado que decorre de seus estímulos externos. Tal recurso poderia também ser avaliado do ponto de vista da interação com seres humanos.

9.4.6 Outros Tipos de Sistemas

A base do desenvolvimento do C^2A utilizou sistemas eletrônicos e as conexões consideradas foram as que de alguma forma passam informação entre sistemas. Entretanto, uma vez que a base do cálculo do índice C^2A usa uma matriz de conexões poder-se-ia explorar a possibilidade de conexões de natureza mecânica, hidráulica, ou outro tipo. Nesse estudo pode-se pensar em um índice geral que congrega informações de diferentes domínios ou mesmo trata-las separadamente.

9.4.7 Complexidade Funcional

O desenvolvimento do índice C^2A tomou como base elementos estruturais de um sistema. Contudo, é possível conceber sua aplicação sob o ponto de vista funcional do sistema. As funções de um sistema são, em geral, especificadas na forma de requisitos textuais. Tais requisitos são na realidade mensagem cuja quantidade de informação pode ser medida. Nesse sentido a quantidade de informação de um conjunto de requisitos funcionais é um indicador da sua complexidade funcional. O acoplamento pode ser medido em decorrência das conexões existentes entre requisitos. Aqui caberia avaliar a possibilidade de um fator de acoplamento baseado no número de conexões e outro baseado em tipos de conexão. A criticalidade pode seguir o mesmo conceito já explorado nesta Tese. Existem requisitos relacionados à funções críticas e outro à funções não críticas. A relação entre eles pode ser quantificada gerando um índice de criticalidade.

Os requisitos podem estar representados em modelos como, por exemplo, na notação do MatLab. Pode-se extrair desses modelos as matrizes de conexões e a partir dessas matrizes desenvolver o processo do cálculo do índice C^2A conforme apresentado nessa Tese. Na realidade tal abordagem foi explorada de maneira superficial durante a pesquisa realizada nesta Tese. Foi desenvolvida uma macro que lê modelos MatLab e gera a matrizes de conexões correspondentes. Não houve tempo para explorar essa vertente.

9.4.8 Medidas de Proximidade como Indicador de Acoplamento

Durante o estudo sobre acoplamento observou-se que o uso de métricas de proximidade tem sido bastante explorado em redes sociais na avaliação de influências. Pessoas que possuem muitas conexões, ou pessoas que possuem poucas conexões, mas que estão ligadas à pessoas influentes são exemplos de análises realizadas em redes sociais. A analogia com o contexto de sistemas é imediata. Existem sistemas que atuam como hubs na comunicação entre sistemas. Existem também sistemas que à primeira vista não tem grande relevância, mas que podem ser propagadores de falhas para sistemas importantes. Dessa maneira, a avaliação do uso de medidas de proximidade utilizadas em redes sociais no contexto de sistemas de engenharia pode trazer resultados interessantes principalmente no que se refere a propagação de falhas.

9.4.9 Bases de Dados de Problemas/Acidentes

Ao longo da pesquisa visualizou-se a possibilidade de se cruzar informações de acidentes aeronáuticos com os índices obtidos para complexidade e C^2A obtidos na Tese. Tal abordagem foi descartada em função da dificuldade de se encontrar dados de acidentes aeronáuticos. As poucas fontes com esse tipo de informação não possuem, contudo, informações organizadas ou em detalhes suficientes que permitam ligar o acidente a algum sistema em particular[38]. Em geral o que se encontra é que a causa raiz do acidente teve origem em sistemas, mas não se detalha tal informação. Um trabalho que poderia auxiliar a validação de resultados de pesquisas na área de segurança de sistema é a proposição de uma taxonomia para a classificação de acidentes e uma estrutura de base de dados. Tem-se ciência, contudo, que mesmo desenvolvendo tal trabalho a sua implementação é difícil, pois depende de uma adesão voluntária dos detentores da informação de acidentes ou da sua adoção por algum órgão governamental.

---

[38] http://www.1001crash.com/index-page-crash_year-lg-2.html
http://www.ntsb.gov/aviationquery/index.aspx
http://www.aopa.org/asf/ntsb/
http://www.faa.gov/data_research/accident_incident/

REFERÊNCIAS

ACCREDITATION BOARD FOR ENGINEERING AND TECHNOLOGY. **Accreditation yearbook**. Baltimore, MD, USA: ABET, 2005.

AIR SAFETY FOUNDATION. **Aircraft deicing and anti-icing equipment**. Safety Advisor – Weather No. 2. Disponível em: <http://www.aopa.org/asf/publications/as22.pdf>. Acesso em: 2 mai. 2011.

AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **ATA 100**: Specification for Manufacturers' Technical Data, Rev. 37, 1999.

_____. **ATA 2200**: Information standards for aviation maintenance, Rev. 2011.1, 2011.

AKAO, Y. QFD: past, present and future. In: International Symposium on QFD '97, Linköping, Sweden,1997. **Proceedings**. Linköping, Sweden,1997

ALDENDERFER, M.S.; BLASHFIELD, R.K. **Cluster analysis**. Newbury Park, CA, USA: SAGE Publications, 1984.

ALGHAMDI, J.S. Measuring software coupling. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 33, n. 1B, p. 119-129, 2008.

ALLEN, E.B.; KHOSHGOFTAAR, T.M. Measuring coupling and cohesion – an information-theory approach. In: International Symposium on Software Metrics, Los Alamitos, CA, USA, 1999. **Proceedings**. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1999, 244p. 119.

AMARAL, L.A.N.; OTTINO, J.M. Complex systems and networks – challenges and opportunities for chemical and biological engineers. **Chemical Engineering Science**, v. 59, p. 1653-1666, 2004.

AMERICAN HERITAGE DICTIONARIES (Ed.). **The American heritage dictionary of the English language**. 4th Ed., 2006.

ASHBY, W.R. **Introdução à cibernética**. SãoPaulo: Editora Perspectiva, 1970.

ASLAKSEN, E. W. **Designing complex systems**: foundations of design in the functional domain. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

AVIATION DATABASE. Disponível em: < http://www.aviation-database.com >. Acesso em: 2 mai. 2011.

BABYLON DICTIONARY. Disponível em: <http://www.babylon.com/define/105/Greek-Dictionary.html>, Acesso em: 14 fev. 2011.

BALDWIN, C.Y.; CLARK, K.B. Modularity in the design of complex engineering systems. In: BRAHA, D.; MINAI, A.A.; BAR-YAM, Y. **Complex Engineered Systems**. Berlin, Germany: Springer, 2006, p. 175-205.

BARABÁSI, A.-L. **Linked**. New York, N.Y., USA: Plume, 2003.

BARRON, A.R.; COVER, T.M. Minimun complexity density estimation. **IEEE Transaction on Information Theory**, v. 37, n. 4, pp.1034-1054, Jul. 1991.

BARTOLOMEI, J.E. **Qualitative knowledge construction for engineering systems**: extending the design structure matrix methodology in scope and procedure. 2007. 191 p. Tese (Doutorado) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2007.

BAR-YAM, Y. **Dynamics of complex systems**. New York, NY, USA: Addison-Wesley, 1997.

_____. Engineering complex systems: multiscale analysis and evolutionary engineering. In: **Understanding Complex Systems**, Springer, p.22-39, 2006.

_____. When systems engineering fails – toward complex systems engineering. In: International Conference on Systems, Man and Cybernetics, p. 2021-2028, Washington, DC, USA, 5-8 Oct. 2003. **Proceedings**. IEEE, Washington, DC, USA, 5-8 Oct. 2003.

BEDAU, M.A. Downward causation and the autonomy of weak emergence. **Principia**, v. 6, p. 5-50, 2002.

BERLINGER, E. An information theory based complexity measure. In: National computer conference – AFIPS '80, New York, NY, USA, May 19-22, 1980. **Proceedings**. ACM, 1980.

BERRY, A.; SIGAYRET, A. Representing a concept lattice by a graph. **Discrete Applied Mathematics**, v. 144, p. 27-42, 2004.

BERTALANFFY, von L. **General system theory** – foundations, development, applications. NY: George Braziller, 1969.

BIGGIERO, L. Sources of complexity in human systems. **Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences**, v. 5, n. 1, p. 3-9, 2001.

BINDÉ, J. Complexidade e crise da representação. In: MENDES, C. (Org.). **Representação e complexidade**. Editora Garamond, 2003.

BLACK, T.A.; FINE, C.H.; SACHS, E.M. **A method for systems design using precedence relationships**: an application to automotive brake systems. Cambridge, MA: MIT Sloan School of Management, Sep. 1990. (Report n. WP #3208-90-MS).

BOARDMAN, J.; SAUSER, B. System of systems – the meaning of. In: IEEE Conference on System of Systems, Abr. 2006, p. 118–123. **Proceedings**. [S.I.]: IEEE, 2006.

BONGULIELMI, L., HENSELER, P.; PULS, C.; MEIER, M. The K- & V-matrix method – an approach in analysis and description of variant products. In: International Conference on Engineering Design, Aug. 21-23, 2001, Glasgow, UK. **Proceedings**. Professional Engineering Publishing Limited, Bury St Edmunds and London, UK, 2001.

BOZZANO, M.; VILLAFIORITA, A. **Design and safety assessment of critical systems**. Taylor & Francis, 2010

BRADY, T.K. **Utilization of dependency structure matrix analysis to assess implementation of NASA's complex technical projects**. 2002. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2002.

BRAHA, D. Partitioning tasks to product development teams. In: ASME International Design Engineering Technical Conferences (Design Theory & Methodology Conference), Montreal, Sep./Oct. 2002. **Proceedings**. MAGLEBY, S. P., ASME, New York, 2002.

BRAHA, D.; MINAI, A.A.; BAR-YAM, Y. (Org.). **Complex engineered systems**. Berlin, Germany: Springer, 2006.

BRITISH STANDARDS. **BS EN 50.126**: Railway applications – the specification and demonstration of reliability, availability, maintainability, and safety (RAMS). BSI, 1999.

BROWNING, T. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. **IEEE Transactions on Engineering management**, v. 48, n. 3, Aug. 2001.

BUCHLI, J.; SANTINI, C.C. **Complexity engineering – harnessing emergent phenomena as opportunities for engineering**. In: Reports of the Santa Fe Institute's Complex Systems Summer School 2005. Santa Fe Institute, 2005.

CAMARGO JR, J.B. **Metodologia de análise de risco em sistemas computacionais de aplicação crítica**. 2002. 145p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CAPRA, F. **A teia da vida**. São Paulo: Editora Cultrix, 1996.

CARLONI, L.; BENEDETTO, M.D.D.; PASSERONE, R.; Pinto, A.; SANGIOVANNI-VINCENTELLI, A. **Modeling techniques, programming languages and design toolsets for hybrid systems**. Columbus University, 2004. (Project IST-2001-38314 COLUMBUS, Report DHS4-5-6), Disponível em: <http://www.columbus.gr/documents/public/WPHS/Columbus_DHS4_0.2.pdf>, Acesso em: 11 dez. 2010.

CASTI, J. L. **Complexification** – Explaining a paradoxical world through the science of surprise. New York, NY: Harper Collins Publishers. 1995.

_____. **The Simply Complex**. Complexity, v. 4, n. 4, 2002.

CHAITIN, G. **Meta math**. New York: Vintage books, 2005.

CHALLENGER GLOBAL 300 – **ice & rain protection**. Disponível em: <http://www.smartcockpit.com/data/pdfs/plane/bombardier/CHALLENGER-300/systems/Bombardier_Challenger_Global_300-Ice_and_Rain_Protection.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2010.

CHALMERS, D.J. **Varieties of emergence**. Disponível em: <http://consc.net/papers/granada.html>, Acesso em: 14 jul. 2007.

CHEN, P.; CLOTHIER, J. Advancing systems engineering for systems-of-systems challenges. **Systems Engineering**, v. 6, n. 3, p. 170-183, 2003.

CHEN, C.H.; HÄRDLE, W. UNWIN, A. (Eds) **Handbook of computational statistics:** data visualization. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

CHIDAMBER, S.R.; KEMERER, C.F. A metric suit for object oriented design. **IEEE Transaction on Software Engineering**, v. 20, n. 6, p. 476-493, 1994.

CHO, S-.H.; EPPINGER, S.D. A simulation-based process model for managing complex design projects. **IEEE Transaction on Engineering Management**, v. 52, n. 3, p. 316-328, Aug. 2005.

CHURCHMAN, C.W. **Introdução à teoria dos sistemas**. 2ª Ed. Petrópolis, R.J.: Editora Vozes, 1972.

CILLIERS, P. **Complexity and postmodernism** – understanding complex systems. London, UK: Routledge, 1998.

_____. **What can we learn from a theory of complexity?** Emergence, v. 2, n. 1, p. 23-33, 2000.

CIVIL AVIATION AUTHORITY. **Safety Health of Aviation Maintenance Engineering** – Project Description. CAA PAPER 2003/10, Safety Regulation Group, 2003. Disponível em: <http://www.caa.co.uk/docs/33/CAPAP2003_10.PDF>, Acesso em: 23 fev. 2011.

CLARKE, B.; FOKOUÉ, E.; ZHANG, H.H. **Principles and theory for data mining and machine learning**. New York, NY: Springer, 2009.

COHEN, R.; HAVLIN, S. **Complex networks** – structure, robustness and function. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.

COOK, R. How complex systems fail. Acesso em: 2 Jul. 2010. Disponível em: <http://ctlab.org/documents/How%20Complex%20Systems%20Fail.pdf>.

COVER, T.M.; THOMAS, J.A. **Elements of information theory**. 2nd Ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

CSERMELY, P. **Weak links**. Berlin, Germany: Springer, 2006.

DANILOVIC, M.; BÖRJESSON, H. Managing the multiproject environment. In: 3rd Dependence Structure Matrix (DSM) International Workshop, Oct. 29-30, 2001, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, EUA. **Proceedings**. Cambridge, 2001a.

_____. Participatory dependence structure matrix approach. In: 3rd Dependence Structure Matrix (DSM) International Workshop, Oct. 29-30, 2001, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, EUA. **Proceedings**. Cambridge, 2001b.

DASSAULT AVIATION. **Ata 36 – Bleed**. Disponível em: <http://www.smartcockpit.com/data/pdfs/plane/dassault/FALCON-7X/systems/Falcon_7X-Bleed.pdf>. Acesso em: 2 mai. 2011.

DEPARTMENT OF DEFENSE. **DOD-STD-2167A**: Defense system software development. 1988.

_____. Report of the defense science board task force on mission impact of foreign influence on DoD software. 2007.

DESCARTES, R. **Discurso sobre o método**. Edipro, 2006.

DHAMA, H. Quantitative models of cohesion and coupling in software. **Journal of System and Software**, n. 29, p. 65-74, 1995.

DICKERSON, C.E.; MAVRIS, D.N. **Architecture and principles of system engineer**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.

DÖRNER, D. **The logic of failure**. Cambridge, MA, USA: Perseus Books, 1996.

DULAC, N.; LEVESON, N. An Approach to Design for Safety in Complex Systems. In: Int. Conference on System Engineering (INCOSE '04), Toulouse, FR, Jun. 2004. **Proceedings**. INCOSE, Toulouse, FR, Jun. 2004.

EDWARDS, E. **Introdução à teoria da informação**. 2ª Ed. Editora Cultrix, 1964.

ELDÉN, L. **Matrix methods in data mining and pattern recognition**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.

ENGLISH, K.; BLOEBAUM, C.L.; MILLER, E. Development of multiple cycle coupling suspension in the optimization of complex systems. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 22, n. 4, p. 268-283, 2001.

EPPINGER, S.D.; WHITNEY, D.E.; SMITH, R.P.; GEBALA, D.A. **A model-based method for organizing tasks in product development**. Research in Engineering Design, v. 6, p. 1-13, 1994.

EPPINGER, S.D. A planning method for integration of large-scale engineering systems. In: International Conference on Engineering Design of Large-Scale Systems. Aug. 19-21, 1997, Tampere, Finland. p. 199-204. **Proceedings**. Tampere, Finland, 1997.

_____. Model-based approaches for managing concurrent engineering. **Journal of Engineering Design**, v. 2, n. 4, p. 283-290, 1991.

EPPINGER, S.D.; SALMINEN, V. Patterns of product development interactions. In: International Conference on Engineering Design. Aug. 21-23, 2001, Glasgow, UK. **Proceedings**. Glasgow, UK, 2001.

ERDI, P. **Complexity explained**. Berlin, Germany: Springer, 2008.

ERICSON II, C. A. **Hazard analysis techniques for system safety**. John Wiley & Sons. 2005.

ERIXON, G. **Modular function deployment (MFD)**: a method for product modularization. 1998. Tese (Doutorado) – The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1998.

EVERDIJ, M.H.C; BLOM, H.A.P. **Safety methods database**. 2010. Disponível em: <www.nlr.nl/documents/flyers/SATdb.pdf>, Acesso em: 30 dez. 2010.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Order 8040.4**: Safety Risk Management. Jun. 1998.

_____. **AC 25.1309**: System Design and Analysis. USA, 2002.

_____. **CAST-26**: Reliance on development assurance level alone when performing a complex-full time critical function. Position Paper, USA, 2006.

FENTON, N.; MELTON, A. Deriving structurally based software measures. **Journal of System and Software**, n. 12, p. 177-187, 1990.

FERREIRA, A.B. de H. **Dicionário Aurélio da língua portuguesa**. 5ª Ed. Curitiba: Editora Positivo, 2010.

FREI, R.; SERUGENDO, D.M. Concepts in complexity engineering. **International Journal of Bio-inspired Computation**, v. 1, n. 1, p.11–22, 2011.

GANDHI, O. P.; AGRAWAL, V. P. FMEA – a diagraph and matrix approach. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 35, n. 2, p. 147-158, 1992.

GELL-MANN, M. What is complexity? **Complexity**, v.1, n.1, 1995.

_____. **O quark e o jaguar** – as aventuras no simples e no complexo. Rio de Janeiro: Rocco, 1996.

GIESE, H.; HENKLER, S. A survey of approaches for the visual model-driven development of next generation software-intensive systems. **Journal of Visual Languages and Computing**, v. 17, pp. 528-550, 2006.

GLEICK, J. **Caos** – a criação de uma nova ciência. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1990.

GRIESSER, M.; SCHREINER, F.; STOLZL, S. Applying functional safety management and SPICE for automotive functions. **Society of Automotive Engineers**, n. 2173, p. 17-26, 2008.

GROSE, D. L. Reengineering the aircraft design process. In: 5th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Panama City Beach, FL, 1994. **Proceedings**. Panama City Beach, FL, 1994.

GRUNSKE, L.; KAISER, B.; PAPADOPOULOS, Y. Model-driven safety evaluation with state-event-based component failure annotations. In: Component-based software engineering: 8th international symposium, CBSE 2005, St. Louis, MO, USA, May 14 - 15, 2005. **Proceedings**. HEINEMAN, G. T. (Ed.), Lecture Notes in Computer Science, v. 3489, p. 33–48, 2005.

HABLI, I.; KELLY, T. PAIGE, R. Functional hazard assessment in product-lines – a model-based approach. In: 1st International Workshop on Model-Driven Product Line Engineering, in conjunction with European Conference on Model-Driven Architecture (ECMDA), Twente, Netherland, June 24th, 2009. **Proceedings**. Twente, Netherland, 2009.

HANGOS, K.M.; CAMERON, I.T. **Process modeling and model analysis**. San Diego, California: Academic Press, 2001.

HAYENGA, C. Complex and complicated systems engineering. **INCOSE INSIGHT**, v. 11, n.1, p. 17-19, jan. 2008.

HEGENBERG, L. **Explicações científicas** – introdução à filosofia da ciência. 2ª 250d. São Paulo: EDUSP, 1974.

HELMER, R.; YASSINE, A; MEIER, C. Module and interface identification and definition – a comprehensive approach using DSM. In: 9th International DSM Conference, Munich, Oct. 16-18, 2007. **Proceedings**. Shaker, Aachen, Munich, 2007.

_____. Systematic module and interface definition using component DSM. **Journal of Engineering Design**, v. 21, n. 6, p. 647-675, Dec. 2010.

HERRLICH, H.; HUSEK, M. Galois connections categorically. **Journal of Pure and Applied Algebra**, v. 68, p. 165-180, 1990.

HERZIG, A.; VARZINCZAK, I. Cohesion, coupling and the meta-theory of actions. In: 19th international joint conference on Artificial intelligence, San Francisco, CA, USA, 2005. **Proceedings**. Morgan Kaufmann, 2005, p. 442-447.

HESNICK, J.; HALLIDAY, D. **Física**. 4ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1983.

HEYLIGHEN, F. Building a science of complexity. In: Annual Conference of the Cybernetics Society, London, 1988. **Proceedings**. Disponível em: <http://pespmc1.vub.ac.be/POSBOOK.html>, Acesso em: 20 set. 2004.

HEYLIGHEN, F; CILIERS, P.; GERSHENSON, C. **Complexity and philosophy**. In: Science, and Society. Cambridge, MA, USA: Radcliffe, 2006.

HITCHINS, D.K. **Systems engineering** – a 21st century systems methodology. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2007.

HONOUR, E. Systems engineering and complexity. In: Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles, CA, USA, 2006. **Proceedings**. INCOSE, Los Angeles, CA, USA, 2006.

HOUSER, J.R.; CLAUSING, D. The house of quality. **Harvard Business Review**, p. 3-13, May-Jun. 1988.

HYBERTSON, D.W.; SHEARD, S. Integrating and unifying old and new systems engineering elements. **INCOSE INSIGHT**, v. 11, n.1, p. 13-16, Jan. 2008.

HYBERTSON, D.W. **Model-oriented systems engineering science**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. ICAO: Disponível em: <http://www.icao.int/>, Acesso em: 3 fev. 2010.

_____. ICAO: **Phase of flight – definitions and usage notes**. 4 may 2011.

INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING. **What is systems engineering?** INCOSE. Disponível em: <http://www.incose.org/practice/whatissystemseng.aspx>, Acesso em: 28 mar. 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61.508**: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Geneva, Switzerland. 1998.

JAIN, A.K.; MURTY, M.N.; FLYNN, P.J. Data clustering: a review. **ACM Computing Surveys**, v. 31, n. 3, p. 264–323, 1999.

JAMSHIDI, M. **Introduction to systems of systems in Systems of systems engineering** – principles and applications. 1a ed. CRC Press, pp. 1-39, 2009.

JOHNSON, B.W. **Design and analysis of fault-tolerant systems**. New York, USA: Addison-Wesley, 1959.

JOHNSON, N. **Simply complexity** – a clear guide to complexity theory. Oxford, England: Oneworld, 2007

JOHNSON, S. **Emergência** – a dinâmica de rede em formigas, cérebros, cidades e softwares. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2003.

KATZ, L. A new status index derived from sociometric analysis. **Psychometrika**, v. 18, p. 39-43, 1953.

KAUFFMAN, S.A. **The origins of order** – self-organization and selection in evolution. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1993.

KEMENY, J.G. Two measures of complexity. **The Journal of Philosophy**, v. 52, n. 24, p. 722-733, 1955.

KLEEMANN, E.; DEY, D. RECKSIEK, M. The development of a civilian fly by wire flight control system. In: 22nd International Congress of Aeronautical Science, Aug. 27 – Sept 1, Harrogate, UK, 2000. **Proceedings**. Bonn, Germany: International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2000, p. 643.1-643.7.

KLEIN, J.T. Interdisciplinarity and complexity: an evolving relationship. **E:CO**, v. 6, n. 1-2, p. 2-10, 2004.

KLUGER, J. **Simplexity**. New York, NY, USA: Hyperion Books, 2008.

KOHL, H. **The age of complexity**. New York, NY, USA: Mentor Books, 1965.

KOLMOGOROV, A. Logical basis for information theory and probability theory. **IEEE Transactions on Information Theory**, n. 14, v.5, PP. 662–664, 1968

KOREN, I.; KRISHNA, C.M. **Fault-tolerant systems**. San Francisco, USA: Morgan Kauffman, 2007.

KORES, M.J.; WATKINS, W.A.; DELP, F. **Aircraft maintenance and repair**. 6th Ed. McGraw-Hill, 1993.

KUHNE, T. What is a model? In: Dagstuhl Seminar, 04101, 2005. **Proceedings**. Internationales Begegnungs - und Forschungszentrum fuer Informatik (IBFI), Schloss Dagstuhl. Wadern: Germany, 2005.

KULAKOWSKI, B.T.; GARDNER, J.F.; SHEARER, J.F. **Dynamic modeling and control of engineering systems**. 3rd Ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2007.

KURTZ, C.F.; SNOWDEN, D.J. The new dynamics of strategy: sense-making in a complex and complicated world. **IBM Systems Journal**, v. 42, n. 3, p. 462-483, 2003.

KUSIAK, A. Interface structure matrix for analysis of products and processes. In: 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2008, 2008, University of New South Wales, Sydney, Australia. **Proceedings**. Sydney, March 2008, p. 444-448.

LARDER, B.; SUMMERHAYES, N. **Application of Smiths data mining algorithms to British Airways 777 and 747 FDM data**. Dec. 2004. Disponível em: <www.flightsafety.org/files/FDM_data_mining_report.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2010.

LELAND, W.; FRIENDLY, M. The history of the cluster heat map. **The American Statistician**. V. 63, n. 2, p. 179-184, 2009.

LEMES, M.J.R.; CAMARGO Jr., J.B. The SAE ARP4754 development process supported by DSM and DMM. In: 14th Air Transport Research Society World Conference, July 6-9, 2010, Porto, Portugal. **Proceedings**. Porto, 2010.

_____. The use of DSM and DMM to support SAE ARP-4754 development activities. In: 12th International Design Structure Matrix Conference. 22-23 July, 2010, Cambridge, UK. **Proceedings**. Cambridge, 2010.

LEONHARDT, G.F. **Engenharia como profissão**. Disponível em: <http://www.institutodeengenharia.org.br/site/noticia.php?id_sessao=5&id_noticia=2980>, Acesso em: 10 mar. 2011.

LERBET, G. Transdisciplinaridade e educação. In: MORIN, E. **A religação dos saberes**. 4ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

LEVESON, N. G. **Safeware** – system safety and computers. Addison-Wesley, 1995.

_____. A new accident model for engineering safer systems. **Safety Science**, v.42, n.4, Apr. 2004a.

_____. A systems-theoretic approach to safety in software-intensive systems. **IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing**, v. 1, n. 1, jan./mar. 2004b.

_____. A new foundation for system safety. In: International Conference of the System Safety Society, Denver, USA, 2002. **Proceedings**. System Safety Society, 2002.

_____. A new approach to system safety. In: National Software and Airborne Electronic Hardware, St. Louis, MO, USA, Sept. 13-15, 2011. **Proceedings**. Federal Aviation Administration, 2011.

LEWIN, R. **Complexidade** – a vida no limite do caos. Rio de Janeiro: Rocco, 1993.

LEWIS, T.G. **Network science** – theory and practice. Hoboken, N.J., USA: John Wiley & Sons, 2009.

LI, B. Managing dependencies in component-based systems based on matrix model. In: Net. Object Days 2003, Sep. 22-25, 2003, Erfurt, Germany. **Proceedings**, Erfurt, 2003.

LINDEMANN, U.; MAURER, M.; BRAUN, T. **Structural complexity management** – an approach for the field of product design. Berlin, Germany: Springer, 2009.

LIPSON, H. Principles of modularity, regularity, and hierarchy for scalable systems. **Journal of Biological Physics and Chemistry**, n. 7, p. 125-128, 2007.

LISAGOR, O.; PRETZER, M. SEGUIM, C.; PUMFREY, D.J.; IWU, F.; PEIKENKAMP, T. Towards safety analysis of highly integrated technologically heterogeneous systems – a domain-based approach for 253TTP253sh253 system failure logic. In: 24th International System Safety Conference (ISSC). Albuquerque, NM, 2006. **Proceedings**. System Safety Society, 2006.

LLOYD, E.; TYE, W. **Systematic safety** – safety assessment of aircraft systems. CAA, London, 1982.

LLOYD, S. Measures of complexity: a non exhaustive list. **IEEE Control Systems**, v. 21 n. 4, p. 7-8, Aug 2001.

LONGMAN (Ed.). Dictionary of contemporary 254TTP254sh. Writing assistant edition. Pearson Education Limited, 2005. CD-ROM.

LOWRANCE, W. **Of acceptable risk** – science and the determination of safety. Los Altos, CA, USA: William Kaufman, 1976.

MACKAY, D.J.C. **Information theory, inference, and learning algorithms**. Cambridge, MA, USA: Cambridge University Press, 2003

MAEDA, J. **As leis da simplicidade**. São Paulo: Novo Conceito Editora, 2007.

MAIER, M.W. Architecting principles for systems-of-systems. **Systems Engineering**, v. 1, n. 4, p. 267-284, 1999.

MAIER, M.W.; RECHTIN, E. **The art of systems architecting**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.

MALMQVIST, J. A classification of matrix-based methods for product modeling. In: 7th International Design Conference – DESIGN 2002, May 14 – 17, 2002, Cavtat-Dubrovnik, Croatia. **Proceedings**. Marjanovic D. (ed.), Croatia, 2002.

MARIOTTI, H. **As paixões do ego** – complexidade, política e solidariedade. São Paulo: Editora Palas Athena, 2002.

MARTIN, J.N. Systems are imaginary – systems are not real: some thoughts on the nature of systems thinking. In: 17th Annual International Symposium, 2007. **INCOSE 2007**: System Engineering: Key to Intelligence Enterprises.

MARTIN, M.V.; ISHII, K. Design for variety: a methodology for developing product platform architectures. ASME Engineering Technical Conferences, Sep. 10-13, 2000, Baltimore, EUA. **Proceedings**, Baltimore, 2000.

MASALONIS, A.J.; CALLAHAM, M.B.; WANKE, C.R. Dynamic density and complexity metrics for real time traffic flow management. In: USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 5., Budapest, Hungary, June 23 – 27, 2003. **Proceedings**. Disponível em: <http://www.atmseminar.org/papers.cfm?seminar_ID=5>, Acesso em: 23 fev. 2011.

MAURER, M.; LINDEMANN, U. **Facing multi-domain complexity in product development**. Cidad Working Paper Series 3, v. 1, p. 1-12, 2007.

McCABE, T. A complexity measure. **IEEE Transaction on Software Engineering**, SE-2, n. 4, p. 308-320, 1976.

MERTS, J.P. **Where did QFD get its terrible name?** Jan. 2008. Disponível em: <http://www.qfdonline.com>, Acesso em: 14 dez. 2010.

MILLER, J.H.; PAGE, S.E. **Complex adaptive systems**. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2007.

MINAI, A.; BRAHA, D.; BAR-YAM, Y. Complex engineered systems: a new paradigm, in complex engineered systems. In: BRAHA, D. Braha; MINAI, A.; BAR-YAM, Y. (Eds.) **Complex engineered systems**. Berlin: Springer, 2006.

MINISTERY OF DEFENSE. **Def Stan 00-56**: Safety management requirements for defence systems. Jun. 2007.

MINSKY, M. **The society of mind**. New York, NY: Simon & Schuster Paperbacks, 1988.

MITCHELL, M. **Complexity** – a guided tour. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2009.

MITRE. Perspectives on complex-system engineering. **Collaborations**, v. 3, n. 2, 2005. Disponível em: <http://mitre.org/work/sepo>, Acesso em: 23 fev. 2011.

MOHANTY, S. Entropy metrics for software design evaluation. **Journal of Systems and Software**, v. 2, n. 1, p. 39-46, 1981.

MOIR, I.; SEABRIDGE, A. **Aircraft systems** – mechanical, electrical, and avionics subsystems integration. 3rd Ed. Chichester, UK : John Wiley & Sons, 2008.

MOLES, A. **Teoria da informação e percepção estética**. Brasilia: Editora Universidade de Brasilia, 1978

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. 4ª Ed. Instituto Piaget, 1990.

_____. A **religação dos saberes**. 4ª Edd. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 2004.

_____. **Educação e complexidade**. 3ª Ed. São Paulo, SP: Cortez, 2005.

MYATT, G.J.; JOHNSON, W.P. **Making sense of data II** – a practical guide to data visualization, advanced data mining methods, and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NPR 7123.1A**: Systems engineering processes and requirements. 2007.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Advancing aeronautical safety**: a review of NASA's aviation safety-related research programs. National Academic Press, 2010.

NAZERI, Z. **Application of aviation safety data mining workbench at American Airlines**. Nov. 2003. (Report n. MP 03W0000238). Disponível em: <www.flightsafety.org/files/safety_mining_workbench.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2010.

NETTO, P.O.B. **Teoria e modelos de grafos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1979.

NEWMAN, M.E.J. **Networks** – an introduction. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2010.

NICOLESCU, B. **O manifesto da transdisciplinaridade**. 3ª Ed. São Paulo, SP: Triom, 1999.

NORMAN, D.O.; KURAS, M.L. Engineering complex systems. In: BRAHA, D.; MINAI, A.A.; BAR-YAM, Y. (Org.). **Complex engineered systems**. Berlin, Germany: Springer, 2006.

NORRIS, G. Boeing's seventh wonder. **IEEE Spectrum**. October, p. 20-23, 1995.

NUSSENZVEIG, H.M. (Org.). **Complexidade & caos**. 3ª Ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora UFRJ/COPEA, 2008.

O'DONOVAN, B.D. The input/output matrix method. In: 4th International Design Structure Matrix workshop, Oct. 7-8, 2002, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, EUA. **Proceedings**, Cambridge, 2002.

OBJECT MANAGEMENT GROUP. **Systems modeling language (SysML)**. v. 1.2, 2010. Disponível em: <http://www.sysml.org>. Acesso em: 11 dez. 2010.

OLIVER, D. W.; KELLIHER, T.P.; KEEGAN, J.G. **Engineering complex systems with models and objects**. New York, NY: McGraw-Hill, 1997.

ONLINE ETYMOLOGY DICTIONARY. Disponível em: <http://www.etymonline.com/>. Acesso em: 06 dez. 2010.

ORIGEM DAS PALAVRAS – site de etimologia. Disponível em: <http://origemdapalavra.com.br/>. Acesso em: 06 dez. 2010.

PAGELS, H.R. **Os sonhos da razão** – o computador e a emergência das ciências da complexidade. Lisboa, Portugal: Gradiva, 1988.

PAWLAK, W.S.; BRINTON, C.R.; CROUCH, K.; LANCASTER, K.M. A framework for the evaluation of air traffic control complexity. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 1996, San Diego, CA, USA. **Proceeding**. San Diego, CA, USA: AIAA,1996.

PEKTAS, S.T. PULTAR, M. Modelling detailed information flows in building design with the parameter-based design structure matrix. **Design Studies**, v. 27, n. 1, p. 99-122, Jan. 2006.

PÉLADEAU, N.; STOVALL, C. **Application of Provalis research corp.'s statistical content analysis text mining to airline safety reports**. Feb. 2005. Disponível em: <www.flightsafety.org/files/Provalis_text_mining_report.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2010.

PERROW, C. **Normal accident theory** – living with high-risk technologies. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1999.

PIQUEIRA, J.R.C. Structural and functional complexity: an informational approach. In: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Antonio TX, USA, Oct. 1994. **Proceedings**. IEEE, 1994.

PIMMLER, T.U.; EPPINGER, S.D. Integration analysis of product decompositions. In: Sixth International Conference on Design Theory and Methodology, Minneapolis, MN, Sept., 1994. **Proceedings**. ASME, 1994

PRESSMAN, R. **Engenharia de software** – a practitioner's approach. 5a Ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.

PRICE, I. Complexity, complicatedness and complexity – a new science behind organizational intervention? **E:CO**, v. 6, n. 1-2, p. 40-48, 2004.

PRIGOGINE, I. **O fim das certezas**. São Paulo: Editora UNESP, 1996.

_____, I. **As leis do caos**. São Paulo: Editora UNESP, 2002.

PRISS, U. Formal concept analysis in information science. **Annual Review of Information Science and Technology**, v. 40, p. 521-543, 1996.

_____. **Introductions to formal concept analysis**. Formal Concept Analysis Homepage. 2007. Disponível em: <http://www.fcahome.org.uk/fca.html>, Acesso em: 17 dez. 2010.

PROCACCIA, I. Complex or just complicated. **Nature**, v. 333, n. 6173, p. 498-499, 1988.

QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT INSTITUTE. **Frequently asked questions about QFD**. Disponível em: <http://www.qfdi.org>, Acesso em: 14 dez. 2010.

RADIO TECHNICAL COMISSION FOR AERONAUTICS. **DO-254**: design assurance guidance for airborne electronic hardware. Washington, DC, 2000.

RECHTIN, E., MAIER, M. **The art of systems architecting**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997.

REDMILL, F.; CHUDLEIGH, M.; CATMUR, J. **System safety** – HAZOP and software HAZOP. John Wiley & Sons, 1999.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Física**. 4ª Ed. Livros Técnicos e Científicos, 1983.

RIYAVONG, S. **Experiments on sparse matrix partitioning**. CERFACS Working Note WN/PA/03/32, 2003. Disponível em: <http://www.cerfacs.fr/>. Acesso em: 27 dez. 2010.

RODITI, I. **Física**. Editora Objetiva, 2005.

ROSEN, R. On information and complexity. In: CAST, J.L.; KARLQVIST, A. (Ed.) **Complexity, language, and life**: mathematical approaches. Springer, p. 174-196, 1986.

ROUSE, W.B. Engineering complex systems – implications for research in systems engineering. **IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics** – Part C: Applications and Reviews, v. 33, n. 2, p. 154-156, may 2003.

RUSHBY, J. **Partitioning in avionics architectures** – requirements, mechanisms, and assurance. Menlo Park, CA, USA: Computer Science Laboratory, SRI International, Mar 2000. (Final Report DOT/FAA/AR-99/58 – NASA/CR-1999-209347).

_____. A safety-case approach for certifying adaptive systems. In: AIAA infotech – Aerospace conference. April, 2009, Seattle, WA, USA. **Proceedings**. AIAA, 2009.

SAGAN, S.D. **The limits of safety** – organizations, accidents and nuclear weapons. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1993.

SAMMARCO, J.J. **A normal accident theory-based complexity assessment methodology for safety-related embedded computer systems**. 2003. 233 p. Tese (Doutorado) – College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, 2003.

_____. Operationalizing normal accident theory for safety-related computer systems. **Safety Science**, v. 43, n. 9, p. 697-714, Nov. 2005.

SANTOS JUNIOR, J.C. dos. **Análise de estabilidade da estrutura de relacionamentos de classes de um software a partir de conceitos de sistemas dinâmicos complexos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Mestrado Profissionalizante) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Universidade de São Paulo, 2008.

SCAPIN, C.A. **Análise sistêmica de falhas**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

SCHWANINGER, M. Complex versus complicated – the how of coping with complexity. **Kybernetes**, v. 38, n. 1-2, p. 83-92, 2009.

SENGE, P. **A quinta disciplina**. 21ª 258d. Rio de Janeiro: Best Seller, 2006.

SHA, L. Using simplicity to control complexity. **IEEE Software**, p. 20-28. Jul./Aug. 2001.

SHANNON, C.E.; WEAVER, W. **The mathematical theory of communication**. Chicago, IL, USA: University of Illinois Press, 1963.

SHAPIRO, M. Once upon a stacked time series – the importance of storytelling in information visualization. In: STEELE, J.; LLIINSKY, N. (Ed.) **Beautiful visualization**. O'Reilly, 2010. Chapter 2.

SHARON, A.; DORI, D.; de WECK, O. Model-based design structure matrix: deriving a DSM from an object-process model. In: Second International Symposium on Engineering Systems, June 15-17, 2009, Cambridge, Massachusetts. **Proceedings**. Cambridge, 2009.

SHEN, Z.; MA, K.-L. Matrix visualization. In: Eurographics/ IEEE-VGTC Symposium on Visualization, May 23-25, Norrköping, Sweden, 2007. **Proceedings**. MUSETH, K.; MÖLLER, T.; YNNERMAN, A. (Ed.), Norrköping, Sweden, 2007.

SHERESHEVSKY, M.; AMMARI, H.; GRADESTSKY, N.; MILI, A.; AMMAR, H.H. Information theoretic metrics for software architectures. In: 25th Annual International Computer Software and Applications Conference, 2005, Chicago, IL, USA. **Proceedings**. IEEE Computer Society, 2005.

SHLINDWEIN, S.L.; ISON, R. Human knowing and perceived complexity – implications for systems practice. **Emergence: Complexity and Organization**, v. 6, n. 3, p. 27–32, 2004.

SIMON, H.A. How complex are complex systems? In: Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, v. 2, p. 507-522, 1976. **Proceedings**. PSA, 1976.

SIMON, H.A. The organization of complex systems. In: PATEE, H.H. (Ed.), **Hierarchy theory** – the challenge of complex systems. New York, NY: George Braziller, 1973.

SIMON, H.A. **The sciences of the artificial**. Cambridge, MA, USA: The MIT Press, 1996.

SNOWDEN, D. A nova forma de ser simples. **HSM Management**, São Paulo, v. 4, n. 39, jul-ago, 2003.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **ARP4754**: Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems. Warrendale, PA, 1996.

_____. **ARP4761**: Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment. Warrendale, PA, 1996

_____. **ARP4754A**: Development of civil aircraft and systems. Warrendale, PA, 2011.

SOSA, M.E.; EPPINGER, S.D.; ROWLES, C.M. Identify modular and integrative systems and their impact on design team interactions. **Transaction of the ASME**, v. 125, p. 240-252, Jun. 2003.

_____. The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development. **Management Science**, v. 50, n.12, p. 1674-1689, Dec. 2004.

STACEY, R.D. **Strategic management and organizational dynamics**. London: Pitman Publishing, 1993.

STEPHANS, R. A. **System safety for the 21st century**. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2004.

STEPHENSON, K. A.; ZELEN, M. Rethinking centrality – methods and examples. **Social Networks**, v. 11, p. 1–37, 1989.

STERMAN, J.D. **Business dynamics** – systems thinking and modeling for a complex world. Boston, MA, USA: McGraw-Hill, 2000.

STEVENS, W.P.; MYERS, G.J.; CONSTANTINE, L.L. Structured design. **IBM Systems Journal**, v. 13, n. 2, p. 115–139, 1974.

STEWARD, D.V. **Systems analysis and management**: structure, strategy, and design. New York, NY: Petrocelli Books, 1981a.

_____. The design structure system: a method for managing the design of complex systems. **IEEE Transaction on Engineering Management**, v. 3, n. 28, p. 71-74, 1981b.

STOREY, N. **Safety-critical computer systems**. Harlow, U.K. : Pearson Education, 1996.

STRUNK, E. A.; AIELLO, A.; KNIGHT, J.C. (Ed.) **A survey of tools for model checking and model-based development**. University of Virginia: Department of Computer Science. 2006. (Technical Report CS-2006-17). Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu>. Acesso em: 11 dez. 2010.

SUH, N.P. **Complexity** – theory and applications. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2005.

SUSSMAN, J.M. **Colected views on complexity in systems**. 2002. Disponível em: <http://www.hhh.umn.edu/img/assets/11512/_Sussman-Complexity-ESDSympos.PDF>, Acesso em: 23 fev. 2011.

SUSSMAN, J.M. **Ideas on complexity in systems**. 2000. Disponível em: <http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/20ViewsComplexity.PDF>, Acesso em: 23 fev. 2011.

_____. **Introduction to transportation systems**. Norwood, MA, USA: Artech House, 2000.

THE 737 TECHNICAL SITE. **Aircraft systems**. Disponível em: < http://www.b737.org.uk/aircraftsystems.htm >. Acesso em: 2 mai. 2011.

TILSTRA, A.H. CAMPBELL, M.I.; WOOD, K.L.; SEEPERSAD, C.C.. Comparing matrix-based and graph-based representations for product design. In: 12th International Dependency and Structure Modelling Conference, Jul. 22-23, Cambridge, UK, 2010. **Proceedings**. Cambridge, UK, 2010.

U.S. AIRFORCE. **NM 87117-5670**: Air force system safety handbook. Kirtland AFB, NM, 2000.

ULIERU, M.; DOURSAT, R. Emergent engineering - a radical paradigm shift. **International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems**, v. 4, n. 1, p. 39-60, 2011.

UNIVERSITY OF NOTRE DAME. **Latin dictionary and grammar aid**. Disponível em: <http://archives.nd.edu/latgramm.htm>, Acesso em: 14 fev. 2011.

US NAVY. **Curso completo de eletrônica**. Editora Hemus, 2004. Publicação sob licença especial do Bereau of Naval Personnel, Training Publication Division.

VASCONCELOS, M.J.E. de. **Pensamento sistêmico** – o novo paradigma da ciência. 3ª Ed. Campinas: Papirus Editora, 2003.

VICOLI, J. W. **A basic guide to system safety**. 2nd Ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2006.

WALDROP, M. M. **Complexity** – the emerging science at the edge of order and chaos. New York, NY: Simon & Schuster Paperbacks, 1992.

WARE, C. **Information visualization** – perception for design. San Francisco, CA: Elsevier, 2004.

WARFIELD, J.N. Unified program planning. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 5, n. 2, p. 610-621, Nov. 1972.

_____. Binary matrices in system modeling. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 3, n. 5, p. 441-449, Sept. 1973a.

_____. Intent Structures, **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 3, n. 2, p. 133–140, 1973b.

WARFIELD, J.N.; CÁRDENAS, A.R. **A handbook of interactive management**. Palm Harbor, FL: Ajar Publishing Company, 2002.

WEAVER, W. Science and complexity. **American Scientist**, v. 36, p. 536-544, 1948.

WEGENER, I. **Complexity theory**. Berlin, Germany: Springer, 2005.

WEICK, K.E. Educational organizations as loosely coupled systems. **Administrative Science Quarterly**, v. 21, n. 1, p. 1-19, 1976. Disponível em <http://www.jstor.org/stable/2391875>, Acesso em 8 jul. 2008.

WEICK, K.E.; SUTCLIFFE, K.M. **Managing the unexpected** - assuring high performance in an age of complexity. San Francisco, CA, USA: Jossey Bass, 2001.

WEINBERG, G.M. **An introduction to general systems thinking**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 1975.

WILDE, G. J. S. **O limite aceitável de risco**. São Paulo: Editora Casa do Psicólogo, 2005.

WOLF, F.G. Operationalizing and testing normal accident theory in petrochemical plants and refineries. **Production and Operations Management**, v. 10, n.3, p. 292-305, sep./2001.

_____. Normal accident theory validated: interactive complexity and resource availability as predictors of reliability. In: Annual Reliability and Maintenability Symposium. Seattle, WA , USA, 28 Jan 2002-31 Jan 2002. **Proceedings**. IEEE, 2002, p. 98 – 103.

WOODS, D.D. Essential characteristics of resilience. In: HOLLNAGEL, E.; WOODS, D.D.; LEVESON, N. (Ed.) **Resilience engineering**. Burlington, USA: Ashgate, 2006.

WOODS, D.D.; HOLLNAGEL, E. Resilience engineering concepts. In: HOLLNAGEL, E.; WOODS, D.D.; LEVESON, N. (Ed.) **Resilience engineering**. Burlington, USA: Ashgate, 2006.

WU, H.-M.; TZENG, S.L.; CHEN, C.-H. Matrix visualization. In: CHEN, C.-H.; HÄRDLE, W.; UNWIN, A. (Ed.) **Handbook of Data Visualization**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. Chapter III.15.

WU, J. Hierarchy and scaling – extrapolating information along a scaling ladder. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 4, p. 367-380, 1999.

XIA, F. On the concept of coupling, its modeling and measurement. **The Journal of Systems and Softwar**e, n. 50, p. 75-84, 2000.

XIONG, J. **New software engineering paradigm based on complexity science** - an introduction to NSE. Berlin, Germany: Springer, 2011.

XU, R.; WUNSCH, D. Survey of clustering algorithms. **IEEE Transactions on Neural Networks In Neural Networks**, v. 16, n. 3, p. 645-678, May 2005.

YANG, H.Y.; TEMPERO, E.; BERRIGAN, R. Detecting indirect coupling. In: Australian Software Engineering Conference (ASWEC'05), Mar 29 – Apr 1, 2005, Brisbane, Australia. **Proceedings**. Brisbane, 2005.

YASSINE, A. **An introduction to modeling and analyzing complex product development processes using the design structure matrix (DSM) method**. 2004. Disponível em <http://www.iese.illinois.edu/pdlab/Papers/DSM-Tutorial.pdf>, Acesso em 03 jul. 2010.

YASSINE, A.; WHITNEY, D.; DALEIDEN, S.; LAVINE, J. Connectivity maps: modeling and analysing relationships in product development processes. **Journal of Engineering Design**, v. 14, n. 3, p. 377-394, Sep. 2003.

YOURDON, E.; CONSTANTINE, L. L. **Projeto estruturado de sistemas**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1990.

ZAPF, M.; WEISE, T. **Applicability of emergence engineering to distributed systems scenarios**. In: European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS'08), 6, University of Bath: Bath, UK, 2008. Proceedings. Julia Padget: Bath, UK, 2008. Disponível em: <http://www.it-weise.de/documents/files/ZW2008AOEETDSS.pdf>, Acesso em: 28 mar. 2011.

APÊNDICE A – Fases de voo de uma aeronave

De acordo *International Civil Aviation Organization* (ICAO, 2011) o voo de uma aeronave pode ser dividido em 6 fases principais conforme ilustrado na Figura A.1.

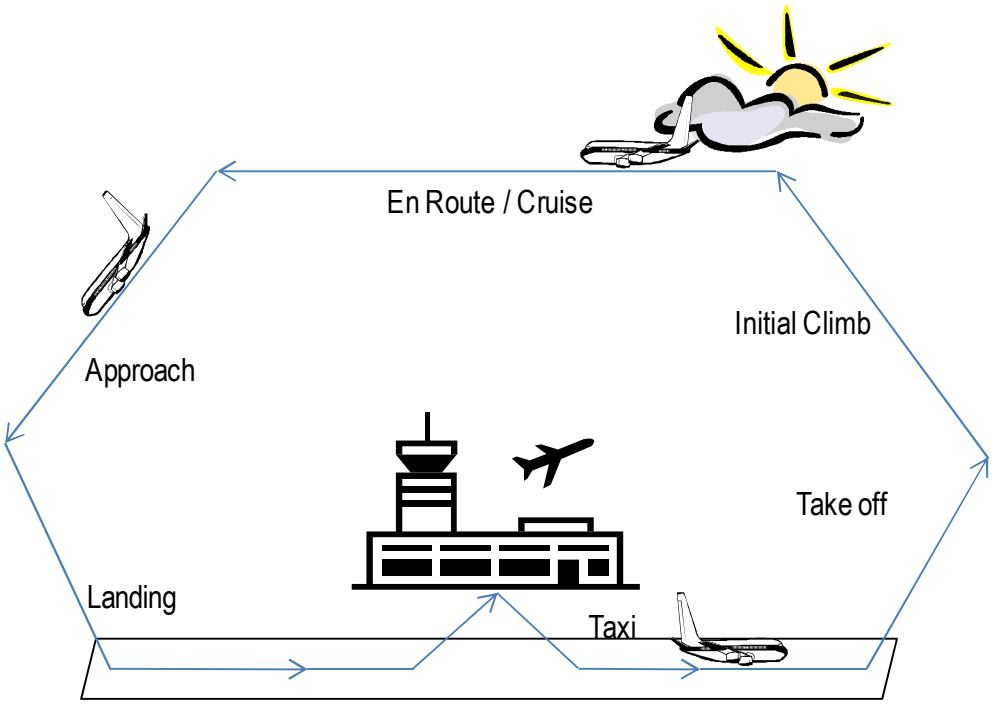


Figura A.1 – Fases de voo de uma aeronave

Taxi (*Taxi*)

A aeronave encontra-se em movimento autônomo (sem reboque) antes da decolagem.

Decolagem (*Take off*)

A partir da aplicação de potência de decolagem, rotação e até uma altitude de 35 pés de elevação sobre a pista.

Ascensão inicial (*Initial climb*)

A partir do final da fase de decolagem até a primeira redução de potência, ou até atingir 1000 pés de elevação acima da pista ou altitude de VFR[39], o que ocorrer primeiro.

Em rota (*En route / Cruise*)

Instrument Flight Rules (IFR): A partir do final da fase de ascensão inicial até a altitude de cruzeiro e desde a fase de descenso até a fase de aproximação inicial.

Visual Flight Rules (VFR): A partir do final da fase de ascensão inicial até a altitude de cruzeiro e desde a fase de descenso até altitude de VFR ou 1000 pés de elevação acima da pista. O que ocorrer primeiro.

Aproximação (*Approach*)

Instrumented Flight Rules (IFR): A partir da aproximação inicial até o início da aterrissagem.

Visual Flight Rules (VRF): A partir do ponto de entrada na VFR, ou 1000 pés de elevação acima da pista, até o início da aterrissagem.

Aterrissagem (*Landing*)

A partir do início da aterrissagem até a aeronave tocar a pista, seguida pela parada da aeronave.

[39] VFR - Constitui-se basicamente em um conjunto de regulamentos que habilitam um piloto a operar uma aeronave em que as condições atmosféricas em que o piloto é capaz de ver onde a aeronave está indo.

APÊNDICE B – Teoria da informação

O conceito de informação na Teoria da Informação está associado a uma medida de incerteza ou, de outra maneira, à liberdade de escolha quando são selecionados os elementos que irão compor uma determinada mensagem (SHANNON; WEAVER, 1963). Por exemplo, considere a situação em que é necessário escolher um símbolo qualquer para compor uma mensagem. Considere ainda que o conjunto de símbolos disponíveis possuísse somente um elemento. Dadas estas condições não há dúvida sobre que símbolo escolher. Supondo que o processo de escolha é direcionado por perguntas, neste caso o número de perguntas que seria preciso para tomar uma decisão, ou seja, eliminar a incerteza seria 0. Neste caso, diz-se que não há informação nessa mensagem, pois não há variedade, liberdade de escolha. Por outro lado se o conjunto de símbolos possuísse 2 elementos seria preciso ao menos 1 pergunta. Considerando ainda que o conjunto possuísse 4 elementos o número de perguntas para a escolha de um elemento seria 2. A Tabela B.1 abaixo expande tais ponderações para um conjunto de símbolos com até 32 elementos.

Tabela B.1 – Relação entre elementos de um conjunto e perguntas para sua escolha [adaptado de (EDWARDS, 1964)]

Número de elementos no conjunto de símbolos (S)	Número de perguntas necessárias para se escolher um elemento do conjunto (I)
1	0
2	1
4	2
8	3
16	4
32	5

Assume-se que as respostas são equiprováveis. Sendo assim, a frequência de ocorrência de cada uma delas é $p = \frac{1}{|S|}$. Além disso $|S| = 2^I$ o que implica em na quantidade de informação de um determinado símbolo dada por

$$I(S_i) = \log_2 |S| = -\log_2 p_i \qquad \text{(B.1)}$$

A generalização da Tabela B.1 para qualquer valor inteiro de *s* é discutido por Edwards. No caso, é demonstrado que o número médio para de perguntas necessárias para identificar um elemento do conjunto de símbolos é sempre $\log_2 S$ (EDWARDS, 1964).

A escolha por uma medida logarítmica é discutida e justificada por Shannon (SHANNON; WEAVER, 1963, pag. 32). Quanto a escolha da base 2 para os logaritmos Shannon destaca se tratar de uma escolha arbitrária que, contudo tem sua conveniência quando se trata de problemas de comunicação. No caso, se a base 2 é usada a unidade de informação é denominada *bit*.

A título de exemplo considere os conjuntos de símbolos S_1 e S_2 como apresentados abaixo

a) S_1 = {A}
b) S_2 = {A B C D E}

Tomando como referência o conjunto de símbolos S_1, observa-se que o único símbolo disponível para se compor uma mensagem é “A”. Logo a quantidade de informação neste caso é

$I(S_1) = \log_2 1 = 0$ *bits*

Já no conjunto S_2 estão disponíveis 5 símbolos. Considerando que a ocorrência de cada símbolo em uma mensagem é equiprovável a quantidade de informação é

$I(S_2) = \log_2 5 = - \log_2 0{,}2 = 2{,}32$ *bits*

A partir de S_2 é possível construir mensagens tais como

m_1 = A B A D E C B
m_2 = A E
m_3 = E D A A B

Considere agora que probabilidade de ocorrência de cada símbolo de S_2 é diferente e obedece à distribuição (p) abaixo

A = 0,3
B = 0,2
C = 0,15
D = 0,25
E = 0,1

Dessa maneira o cômputo da quantidade de informação da mensagem m_3, por exemplo, seria feito da seguinte maneira

$$I(m_6) = -(\overset{E}{1 \log_2 0{,}1} + \overset{D}{1 \log_2 0{,}25} + \overset{A}{1 \log_2 0{,}3} + \overset{A}{1 \log_2 0{,}3} + \overset{B}{1 \log_2 0{,}2})$$

Pode-se generalizar tal expressão

$$I(m) = -(1 \log_2 p_1 + 1 \log_2 p_2 + \ldots + 1 \log_2 p_{|S|}) \qquad \text{(B.2)}$$

Se a eq. (B.2) for dividida pelo número de símbolos em s tem-se então a quantidade de informação média da mensagem (EDWARDS, 1964).

$$I(m) = -(1 \log_2 p_1 + 1 \log_2 p_2 + \ldots + 1 \log_2 p_{|S|}) / |S| \qquad \text{(B.3)}$$

Porém

$$p_1 = 1/|S|, \; p_2 = 1/|S|, \ldots, p_{|S|} = 1/|S|,$$

Substituindo na eq. (B.3) tem-se

$$I(m) = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \ldots + p_n \log_2 p_n +)$$

(B.4)

O que leva a

$$I(m) = -\sum_{i=1}^{|S|} p_i \log_2 p_i \qquad \text{(B.5)}$$

Se todos os símbolos são equiprováveis pode-se reescrever a eq. (B.5) da seguinte forma

$$I(m) = -|S| \,.\, p \quad \log_2 p \qquad \text{(B.6)}$$

Ora

$$p \quad = \frac{1}{|S|}$$

Substituindo *p* na eq. (B.6), tem-se

$$I(s) = I(m) = -\log_2 p \qquad \text{(B.7)}$$

O que corresponde a quantidade de informação conforme apresentado na eq. (B.1).

A título de exemplo considere o conjunto S_3 como apresentado abaixo

S_3 = {0,1}

A partir de s_3 é possível compor mensagens do tipo

- m_7 = 10101010111101010
- m_8 = 11001010110001
- m_9 = 1
- m_{10} = Ø

Dado que S_3 possui dois símbolos, se a probabilidade de ocorrência destes símbolos é igual, então *p* = 0,5. Para essas mensagens a quantidade de informação por símbolo é dada por

$I(m) = -\log_2 0{,}5 = 1$ *bits*

Assim

$I(m_7) = -17 \log_2 0{,}5 = 17$ *bits*
$I(m_8) = -14 \log_2 0{,}5 = 14$ *bits*
$I(m_9) = -1 \log_2 0{,}5 = 1$ *bits*
$I(m_9) = -0 \log_2 0{,}5 = 0$ *bits*

Neste caso a quantidade de informação das mensagens é proporcional a *k*, ou seja, ao tamanho da mensagem em número de símbolos.

Entropia

Shannon introduziu também o conceito de entropia informacional nos mesmos moldes como proposto por Boltzmann no domínio da Termodinâmica (SHANNON; WEAVER, 1963). A entropia é a medida da incerteza de uma variável aleatória. Seja então *x* uma variável aleatória discreta com probabilidade $p(x)$, $x \in S$. Assim a entropia $H(S)$ de uma variável aleatória *S* é definida por

$$H(s) = -\sum_{x \in s} p_x \log_2 p_x = -\sum_{i=1}^{|S|} p_i \log_2 p_i \qquad \text{(B.8)}$$

$H(s)$ corresponde à quantidade de informação *I* de uma mensagem conforme eq. (B.5).

Partindo-se do cenário mais simples onde uma determinada mensagem é formada por dois símbolos somente, ou seja, $S = \{s_1, s_2\}$. Dessa maneira, as probabilidades de $s_1 + s_2 = 1$, ou de outra forma se $s_1 = p$ então $s_2 = 1-p$, logo (COVER; THOMAS, 2006)

$$H(p, 1-p) = -(p \log_2 p + (1-p) \log_2 (1-p))$$

O gráfico correspondente para valores de *p* [0,1] é apresentado na Figura B.1

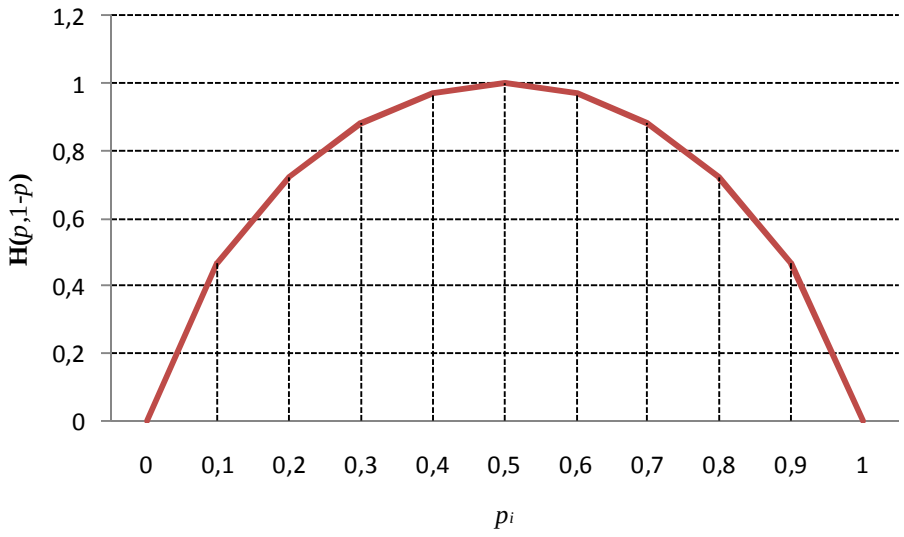


Figura B.1 – Entropia de |*S*| = 2 para *p* [0,1]

A entropia é máxima quando s_1 e s_2, ou seja, os elementos da mensagem têm a mesma probabilidade de ocorrência, no caso, p = 0,5. Por este princípio a entropia máxima para *S* com três elementos ocorre quando p = 0,33, e assim por diante. A Figura B.2 apresenta um gráfico com as curvas correspondentes para |*S*| = {2,3,4}.

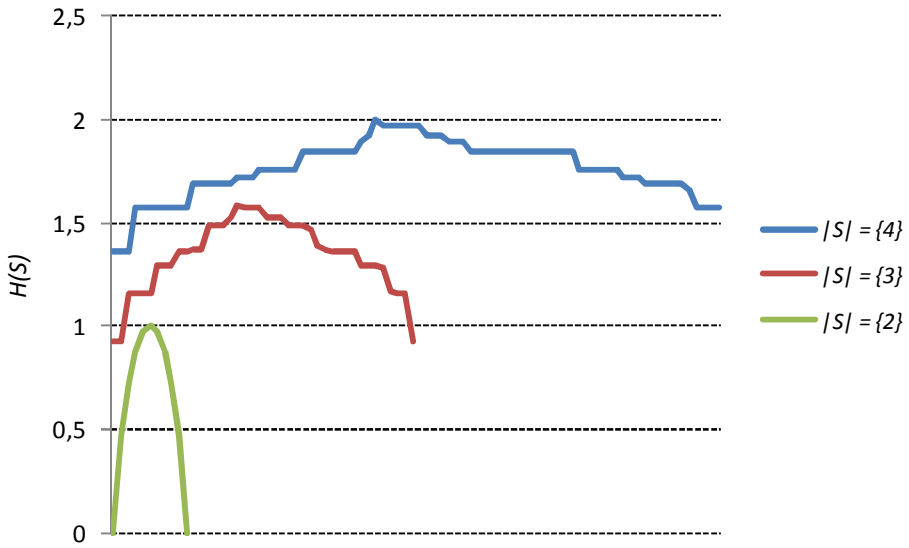


Figura B.2 – Curvas referentes a entropia para |*S*| = {2,3,4}

Generalizando o conceito, a entropia máxima é obtida quando p = 1/|*S*|. A Figura B.3 apresenta as projeções das entropias máximas para |*S*| = [0,50].

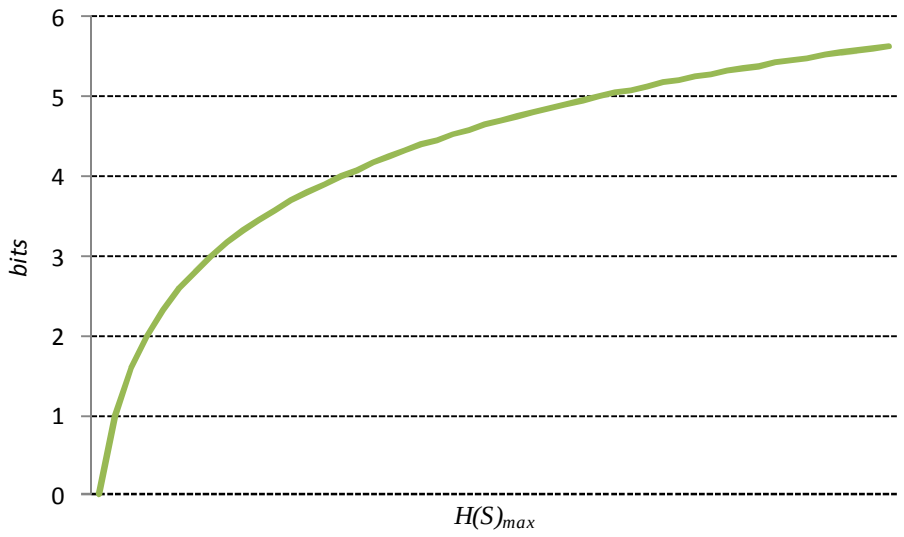


Figura B.3 – Entropia máxima para |*S*| = [0,50]

Uma propriedade que pode ser deduzida a partir de H_{max} é a entropia relativa H_{rel}. A H_{rel} é uma medida da relação entre a entropia de uma determinada mensagem e a entropia máxima do sistema. Assim, quanto mais próximo de 1 maior a entropia relativa. A H_{rel} é definida por

$$H_{rel} = \frac{H}{H_{max}} \tag{B.9}$$

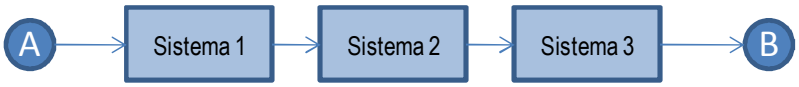
Outra relação importante que pode ser deduzida a partir da fórmula da entropia refere-se a redundância de informação (MACKAY, 2003). Se H_{max} é a entropia máxima do sistema então a redundância *R* é definida por

$$R = \frac{H_{max} - H}{H_{max}} \tag{B.10}$$

APÊNDICE C - Representação em matrizes de estruturas básicas de arquiteturas de sistemas

Existem três estruturas básicas de conexões entre sistemas: Sequência, Paralelismo, Realimentação. A representação de tais estruturas é ilustrada a seguir.

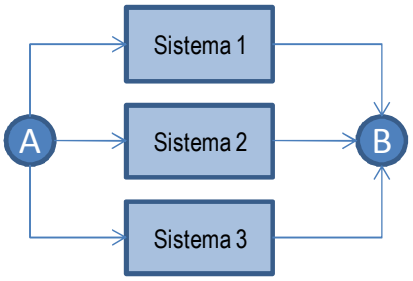
a) Representação de conexões sequenciais entre sistemas



	A	B	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
A	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	1
Sistema 1	1	0	0	0	0
Sistema 2	0	0	1	0	0
Sistema 3	0	0	0	1	0

Figura C.1 – Conexões sequenciais.

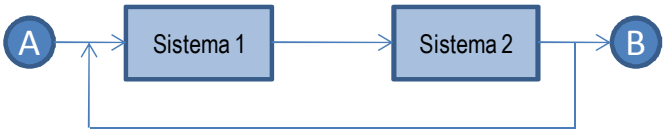
b) Representação de conexões em paralelo entre sistemas



	A	B	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
A	0	0	0	0	0
B	0	0	1	1	1
Sistema 1	1	0	0	0	0
Sistema 2	1	0	0	0	0
Sistema 3	1	0	0	0	0

Figura C.2 – Conexões em paralelo.

c) Representação de realimentação



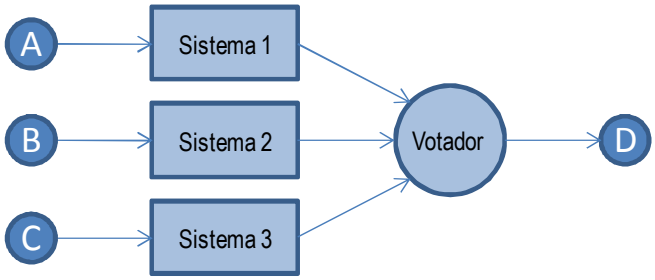
	A	B	Sistema 1	Sistema 2
A	0	0	0	0
B	0	0	0	1
Sistema 1	1	0	0	1
Sistema 2	0	0	1	0

Figura C.3 – Realimentação.

No projeto de sistemas críticos quanto a segurança é comum a utilização de diferentes tipos de técnicas visando torná-lo tolerante a falhas. A mais comum dessas técnicas é a redundância. Nos itens abaixo são apresentas diferentes formas de redundância e sua representação correspondente em matrizes.

a) Redundância modular tripla com votador

Utiliza três sistemas idênticos, executando operações idênticas. No exemplo abaixo, os resultados dos sistemas 1, 2 e 3 são votados determinado os dados de saída (JOHNSON, 1989).

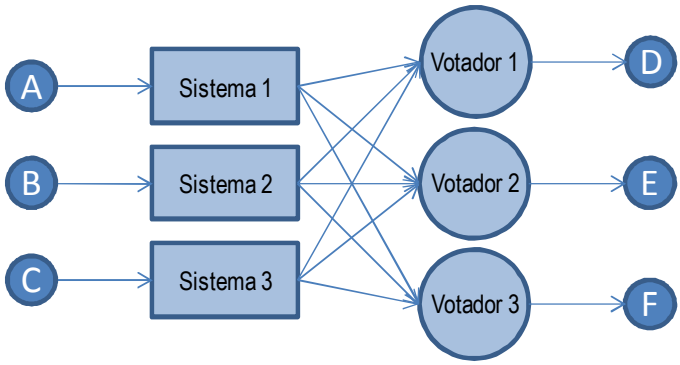


	A	B	C	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Votador
A	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	1
Sistema 1	1	0	0	0	0	0	0
Sistema 2	0	1	0	0	0	0	0
Sistema 3	0	0	1	0	0	0	0
Votador	0	0	0	1	1	1	0

Figura C.4 – Redundância modular tripla.

b) Redundância modular tripla com votadores triplicados

Utiliza três sistemas idênticos, executando operações idênticas. A existência de 3 votadores deixa o sistema mais robusto em termos de possíveis falhas do votador (JOHNSON, 1989).

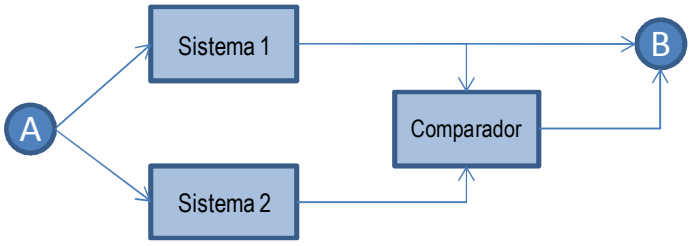


	A	B	C	D	E	F	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Votador 1	Votador 2	Votador 3
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sistema 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sistema 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sistema 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Votador 1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Votador 2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Votador 3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Figura C.5 – Redundância modular tripla com votadores triplicados.

c) Redundância com comparador

Utiliza dois sistemas idênticos, executando operações idênticas. O resultado gerado pelo Sistema 1 é disponibilizado para B e enviado a um comparador. O comparador recebe também o resultado gerado pelo Sistema 2 e disponibiliza para B um sinal de validade do resultado da comparação. B antes de utilizar o resultado do Sistema 1 verificar o sinal de validade do dado (JOHNSON, 1989; KOREN; KRISHNA, 2007).

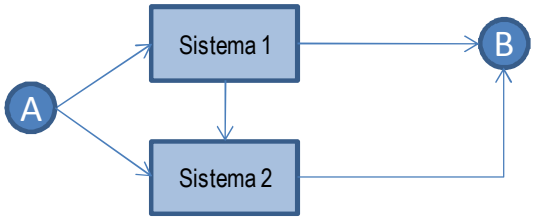


	A	B	Sistema 1	Sistema 2	Comparador
A	0	0	0	0	0
B	0	0	1	0	1
Sistema 1	1	0	0	0	0
Sistema 2	1	0	0	0	0
Comparador	0	0	1	1	0

Figura C.6 – Redundância com comparador.

d) Comando-monitor

Utiliza dois sistemas idênticos, executando operações específicas. Tanto o Sistema 1 quanto o Sistema 2 recebem os mesmos dados e os processam. O resultado gerado pelo Sistema 1 é passado para o Sistema 2 e para B. O Sistema 2 atua como monitor do Sistema 1 verificando se o resultado recebido é igual ao calculado por ele mesmo. O Sistema B fornece um sinal de validade para B que deve verificá-lo antes de utilizar o resultado recebido do Sistema 1.

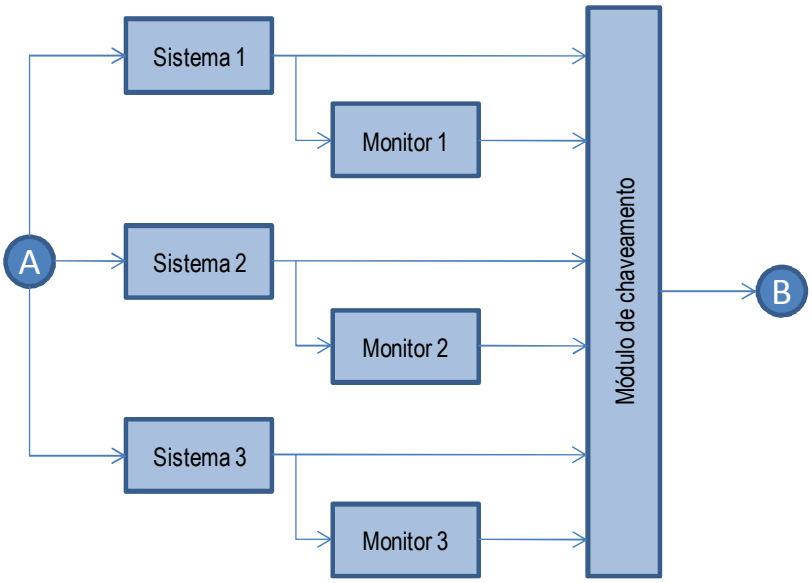


	A	B	Sistema 1	Sistema 2
A	0	0	0	0
B	0	0	1	1
Sistema 1	1	0	0	0
Sistema 2	1	0	1	0

Figura C.7 – Comando–monitor.

e) *Standby*.

Nos exemplos anteriores os sistemas redundantes executavam suas funções concomitantemente. Contudo, é possível que um sistema esteja ativo os demais funcionem como *backup* do primeiro caso este venha a falhar. No diagrama abaixo o Sistema 1 encontra-se ativo enquanto que os Sistemas 2 e 3 encontram-se em *standby*. O Monitor do Sistema 1 passa para o Módulo de Chaveamento um sinal de validade dos dados. Caso a validade seja falsa o Módulo de Chaveamento pode ignorar os dados do Sistema 1 e passar a considerar aqueles gerados pelo Sistema 2 (JOHNSON, 1989).



	A	B	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Monitor 1	Monitor 2	Monitor 3	Mód. de Chav.
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sistema 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sistema 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sistema 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Monitor 1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Monitor 2	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Monitor 3	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Mód. de Chav.	0	0	1	1	1	1	1	1	0

Figura C.8 – Standby.

A matriz da Figura C.8 representa a totalidade das conexões, contudo pode ser necessário considerar que somente o Sistema 1 está ativo. Neste caso existe uma máquina de estados que rege qual sistema está ativo em função da detecção de falhas por parte dos monitores e mudança de sistema pelo Módulo de Chaveamento. A Figura C.9 exemplifica tal máquina de estados e que conexões estão ativas em cada estado.

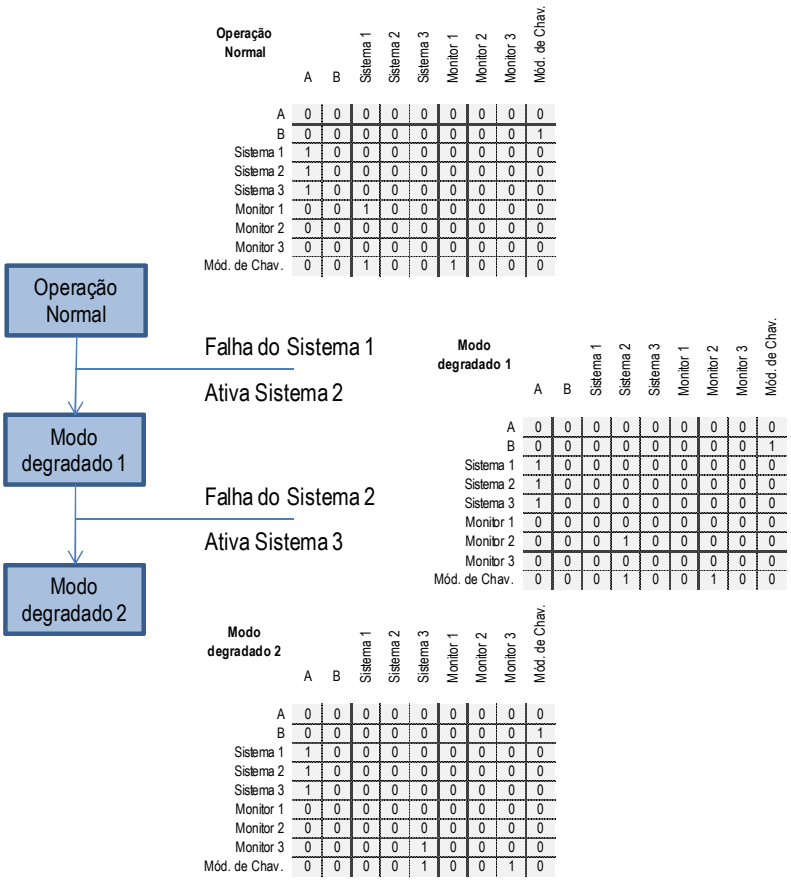


Figura C.9 – Máquina de estados do sistema *standby*.