

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Julián Alfonso Sanabria

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM  
ROBÔS COM APLICAÇÃO EM ROBÔ PARALELO**

Florianópolis

2012



Julián Alfonso Sanabria

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM  
ROBÔS COM APLICAÇÃO EM ROBÔ PARALELO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Acires Dias, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Luís Fernando Peres Calil, Dr. Eng.

Florianópolis

2012

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da  
Universidade Federal de Santa Catarina

A ficha catalográfica é confeccionada pela Biblioteca Central.

Tamanho: 7cm x 12 cm

Fonte: Times New Roman 9,5

Maiores informações em:

<http://www.bu.ufsc.br/design/Catalogacao.html>

Julián Alfonso Sanabria

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE EM  
ROBÔS COM APLICAÇÃO EM ROBÔ PARALELO**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 14 de Maio 2012.

---

Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Acires Dias, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Luís Fernando Peres Calil, Dr. Eng.  
Coorientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Acires Dias, Dr. Eng.  
Presidente

---

Prof. Daniel Martins, Dr. Eng.

---

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.



---

Prof. Tiago L. F. Costa Pinto, Dr. Eng.





Aos meus pais, irmãos e sobrinhos



## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Acires Dias e Prof. Luis Calil, pela confiança, apoio e colaboração neste trabalho.

Aos meus pais e irmãos, pela compreensão e amor, mesmos distantes.

Aos meus amigos Leonardo Mejía, Rafael Lopez, Marianne Romero, Jonh Rodriguez, Paola Monsalve, Dámaris Nuñez e Fran Contreras, pelo incentivo e carinho ao longo destes dois anos, sem eles, estes anos não teria o mesmo significado.

À Laura Guerrero pelas imensas conversas e momentos de apoio.

Ao Florian le Mat e a Lydia Lachenaud pela convivência e momentos de alegria compartilhados.

Ao Yessid Assaf e Cindy Ibarra, pela amizade e carinho.

Aos colegas do NeDIP pelas contribuições feitas.

À Andressa Dreher, pela amizade, a qual espero a leve à Colômbia

À Rani Lopes Lorenzetti, pelo imenso carinho e paciência, para ela toda a minha gratidão.

À sociedade brasileira que, através da agência CAPES, fomentou este trabalho.



*“Si mis amigos no fueran una legion de angeles clandestinos, qué seria de mi.”*

Raul Gomez Satin



## RESUMO

Os conceitos de confiabilidade têm grande aceitação em diversas áreas da engenharia, abrangendo uma grande quantidade de sistemas técnicos que podem ser analisados. Nota-se, com base no auge tecnológico dos últimos anos, que novos sistemas estão sendo desenvolvidos com maior frequência, os quais visam se adaptar às necessidades operacionais mais diversas, valendo-se para isso de robôs móveis, manipuladores seriais ou manipuladores paralelos como uma das principais alternativas. Os robôs industriais são sistemas que integram itens elétricos, eletrônicos, hidráulicos e pneumáticos, propiciando o incremento das fontes de falha e como consequência disso um maior interesse pela análise de confiabilidade. A confiabilidade é a área que deve analisar a funcionalidade de um sistema, evitando as falhas ou minimizando seu impacto por meio da aplicação de técnicas adequadas, onde muitas dessas já estão normatizadas. Nesse contexto, o presente trabalho aborda o desenvolvimento de uma metodologia para analisar a confiabilidade em robôs, usando técnicas que orientem a caracterização das falhas e as suas probabilidades de ocorrência. Assim, a metodologia proposta está apresentada dentro de um processo de projeto, ou seja, durante as atividades de desenvolvimento de um sistema robótico, onde os resultados a serem obtidos devem encaminhar ações que visem garantir a confiabilidade estabelecida no início do projeto. Com isso, pretende-se motivar aos projetistas de robôs à inclusão da confiabilidade como um atributo de produto, aplicando uma metodologia adequada para avaliar o leiaute final a fim de corrigir os problemas associados ao robô antes que este seja fabricado. Finalmente, uma demonstração do uso da metodologia é feita sobre um sistema robótico paralelo, evidenciando as vantagens da sistemática proposta e caracterizando os resultados a serem obtidos

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Robôs. Metodologia





## ABSTRACT

The concepts of reliability are greatly accepted in a vast variety of engineering areas, incorporating an enormous quantity of technical systems that can be analyzed. It is noticed that, in the technological growth of the area in the last few years, new systems are being developed with more frequency, which goal to adapt to an infinite variation of operational needs, by using mobile, serial manipulative or parallel manipulative robots. The industrial robots are systems that include electrical, electronic, hydraulic and pneumatic items, providing more opportunities to failure that reinforces reliability analysis. Reliability is the area that guarantees the functionality of a system, avoiding or minimizing the impacts of failures, by applying suitable techniques, which are mostly already normalized. In this context, the current proposition approaches the development of a methodology for reliability analysis in robots, using techniques that orient the failure characterization and properties associated to them. Therefore, the methodology proposed is presented within a project process, meaning that, during the activities of development of a robotic system, in which the results obtained should lead to actions that aim to guarantee reliability established in the beginning of the project. This leads to motivate robot planners to include reliability as an attribute of their products, applying an appropriate methodology to assess the final layout in order to correct problems associated to the robot before it is produced. Finally, an application is made on the parallel robot, emphasizing the advantages of the systematics proposed and characterizing the results that will be obtained.

**Keywords:** Reliability. Parallel robots. Methodology



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de robôs manipuladores . . . . .	35
Figura 2	Fluxo de potência nos componentes do subsistema de atuação . . . . .	37
Figura 3	Relação de componentes no subsistema de atuação para energia elétrica e hidráulica . . . . .	38
Figura 4	Manipulador serial e paralelo . . . . .	39
Figura 5	Tipos de juntas existentes em robôs . . . . .	40
Figura 6	Desdobramento estrutural do robô paralelo . . . . .	42
Figura 7	Análise funcional no nível de sistema e subsistemas do robô manipulador . . . . .	44
Figura 8	Análise funcional dos componentes do subsistema de monitoramento . . . . .	45
Figura 9	Análise funcional dos componentes do subsistema de controle . . . . .	46
Figura 10	Análise funcional dos componentes do subsistema de atuação . . . . .	46
Figura 11	Análise funcional dos componentes do subsistema mecânico . . . . .	47
Figura 12	Taxonomia das falhas em um robô móvel . . . . .	48
Figura 13	Abordagem para seleção de técnicas na tolerância de falhas em robôs . . . . .	48
Figura 14	Métodos quantitativos e qualitativos para a análise de confiabilidade . . . . .	54
Figura 15	Diagrama de blocos para itens em série . . . . .	55
Figura 16	Comportamento da confiabilidade de itens em série . . . . .	56
Figura 17	Diagrama de blocos para itens em paralelo . . . . .	57
Figura 18	Comportamento de sistemas redundantes . . . . .	58
Figura 19	Reduções sequenciais de um sistema combinado . . . . .	59
Figura 20	Configuração para um item com sensor de condição . . . . .	60
Figura 21	Planilha da FMEA . . . . .	61
Figura 22	Metodologia de análise de confiabilidade em freios pneumáticos automotivos . . . . .	65
Figura 23	Metodologia para análise de confiabilidade da planta trituradora III . . . . .	66
Figura 24	Vida característica em uma função Weibull . . . . .	71
Figura 25	Influência de $\beta$ sobre a confiabilidade . . . . .	73
Figura 26	Influência de $\lambda_0$ sobre a confiabilidade . . . . .	74

Figura 27	Curva característica da $\lambda(t)$ para uma distribuição Weibull ..	75
Figura 28	Métricas de confiabilidade .....	77
Figura 29	Melhor reta que ajusta uma amostra de dados no LMS .....	78
Figura 30	Macrofases do processo de desenvolvimento integrado de produtos – PRODIP .....	84
Figura 31	Relação da MACRoB com o PRODIP .....	86
Figura 32	Metodologia para análise de confiabilidade em robôs .....	87
Figura 33	Desdobramento estrutural do robô associado a um modelo funcional .....	91
Figura 34	Preenchimento da descrição do sistema na planilha de resultados .....	92
Figura 35	Preenchimento da descrição dos subsistemas na planilha de resultados .....	94
Figura 36	Preenchimento da descrição dos componentes na planilha de resultados .....	98
Figura 37	Passos na análise confiabilística dos componentes identificados no modelo estrutural do robô .....	99
Figura 38	Estrutura básica de uma linha automatizada para embalagem de produtos .....	108
Figura 39	Sistema robótico paralelo equivalente .....	110
Figura 40	Desdobramento adicional no atuador do RPE .....	117
Figura 41	Valor do MTTF para um $\beta = 1$ .....	118
Figura 42	Confiabilidade para 600 horas nos componentes do subsistema de atuação do RPE .....	120
Figura 43	Confiabilidade para 600 horas nos subsistemas do RPE .....	121
Figura 44	Confiabilidade total do robô paralelo equivalente .....	123
Figura 45	Comportamento da $R(t)$ e $f(t)$ nos sensores externos do RPE	131
Figura 46	Comportamento da $R(t)$ e $f(t)$ no sensor de condição térmica do RPE .....	131
Figura 47	Comportamento da $R(t)$ e $f(t)$ no módulo de acionamento do RPE .....	132
Figura 48	Comportamento da $R(t)$ e $f(t)$ nas juntas do RPE .....	134
Figura 49	Função densidade de probabilidade Normal ou Gaussiana .....	151
Figura 50	Confiabilidade dos componentes do subsistema de monitoramento do RPE .....	163
Figura 51	Confiabilidade dos componentes do subsistema de controle do	

RPE.....	163
Figura 52 Confiabilidade dos componentes do subsistema de atuação do RPE.....	164
Figura 53 Confiabilidade dos componentes do subsistema mecânico do RPE.....	164
Figura 54 Confiabilidade dos componentes do subsistema efetuator do RPE.....	165
Figura 55 Confiabilidade dos subsistemas do RPE.....	165



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Descrição da planilha FMEA . . . . .	61
Quadro 2	Planilha de resultados da MACRoB . . . . .	90
Quadro 3	Funções parciais dos subsistemas do robô . . . . .	93
Quadro 4	Funções elementares dos componentes do robô . . . . .	95
Quadro 5	Modelos de confiabilidade para os subsistemas do robô . . . . .	101
Quadro 6	Modelo de confiabilidade para o sistema robótico . . . . .	104
Quadro 7	Especificações do sistema robótico equivalente (RPE) . . . . .	111
Quadro 8	Especificações dos subsistemas do robô paralelo equivalente (RPE) . . . . .	112
Quadro 9	Especificações dos componentes no subsistema de atuação do robô paralelo equivalente (RPE) . . . . .	113
Quadro 10	Períodos de falha assumidos para o subsistema de atuação do RPE . . . . .	115
Quadro 11	Parâmetros $\beta$ e $\lambda_0$ dos componentes do subsistema de atuação para o robô paralelo equivalente . . . . .	119
Quadro 12	Valores de confiabilidade do robô paralelo equivalente . . . . .	122
Quadro 13	FMEA para o subsistema de atuação do robô paralelo equivalente . . . . .	125
Quadro 14	Planilha de resultados do robô paralelo equivalente . . . . .	128
Quadro 15	Especificações dos componentes no subsistema de monitoramento do RPE . . . . .	155
Quadro 16	Períodos de falha assumidos para o subsistema de monitoramento do RPE . . . . .	156
Quadro 17	Especificações dos componentes no subsistema de controle do RPE . . . . .	156
Quadro 18	Períodos de falha assumidos para o subsistema de controle do RPE . . . . .	157
Quadro 19	Especificações dos componentes no subsistema mecânico do RPE . . . . .	157
Quadro 20	Períodos de falha assumidos para o subsistema de mecânico do RPE . . . . .	159
Quadro 21	Especificações do componente no subsistema de efetuator do RPE . . . . .	159
Quadro 22	Períodos de falha assumidos para o subsistema efetuator do	

RPE.....160  
Quadro 23 FMEA para o subsistema de monitoramento do RPE ..... 169  
Quadro 24 FMEA para o subsistema de controle do RPE..... 170  
Quadro 25 FMEA para o subsistema mecânico do RPE ..... 171  
Quadro 26 FMEA para o subsistema efetuator do RPE ..... 172



## LISTA DE SIGLAS

### Siglas das organizações ou unidades organizacionais citadas no texto:

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>DOD</b>	Department of Defense / United States of America
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IFR</b>	International Federation of Robotics
<b>NeDIP</b>	Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers

### Outras siglas utilizadas no texto:

<b>CNEA</b>	<i>Causal network event analysis</i> (Análise de eventos por rede causal)
<b>FMEA</b>	<i>Failure modes effects and analysis</i> (Análise do modo de falha e seus efeitos)
<b>FTA</b>	<i>Fault tree analysis</i> (Análise por árvore de falha)
<b>LMS</b>	<i>Least mean squares</i> (Método dos mínimos quadrados)
<b>MACRoB</b>	Metodologia para análise de confiabilidade em robôs
<b>MTBF</b>	<i>Mean time between failure</i> (Tempo médio entre falhas)
<b>MTTF</b>	<i>Mean time to failure</i> (Tempo médio até falha)
<b>MTTFF</b>	<i>Mean time to first failure</i> (Tempo médio até primeira falha)
<b>PRODIP</b>	Processo de desenvolvimento integrado de produtos
<b>RBD</b>	<i>Reliability block diagram</i> (Diagramas de blocos confiabilísticos)
<b>RPE</b>	<i>Robô paralelo equivalente</i>
<b>UGV</b>	<i>Unmanned ground vehicle</i> (Veículos terrestres não tripulados)



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	29
1.1 OBJETIVO GERAL .....	31
<b>1.1.1 Objetivos específicos</b> .....	31
1.2 ESTRUTURA E CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS .....	32
<b>2 SISTEMAS ROBÓTICOS</b> .....	33
2.1 FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA .....	33
<b>2.1.1 Classificação dos robôs industriais</b> .....	34
2.2 ROBÔS SERIAIS E PARALELOS: ARQUITETURA DO SISTEMA .....	35
<b>2.2.1 Subsistema de monitoramento</b> .....	36
<b>2.2.2 Subsistema de controle</b> .....	36
<b>2.2.3 Subsistema de atuação</b> .....	37
<b>2.2.4 Subsistema mecânico</b> .....	38
<b>2.2.5 Subsistema efetuator</b> .....	40
2.3 ANÁLISE FUNCIONAL: APLICAÇÃO AOS ROBÔS MANIPULADORES .....	40
2.4 CONFIABILIDADE EM ROBÓTICA: UMA PERCEPÇÃO AO LONGO DOS ÚLTIMOS ANOS .....	47
2.5 COMENTÁRIOS .....	49
<b>3 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE</b> .....	51
3.1 TERMINOLOGIA DE CONFIABILIDADE .....	52
3.2 ESTRUTURA FUNDAMENTAL DO CONCEITO DE CONFIABILIDADE .....	53
3.3 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS .....	54
<b>3.3.1 Diagrama de blocos</b> .....	54
3.3.1.1 Modelo de confiabilidade para itens em série. ....	55
3.3.1.2 Modelo de confiabilidade para itens em paralelo .....	56
3.3.1.3 Modelo de confiabilidade para itens combinados .....	58
3.3.1.4 Modelo de confiabilidade para itens com sensor de condição ..	59
<b>3.3.2 Análise dos modos de falha e seus efeitos FMEA</b> .....	60
3.4 ESTIMATIVAS DE CONFIABILIDADE EM SISTEMAS TÉCNICOS .....	63
3.5 COMENTÁRIOS .....	66
<b>4 ANÁLISE DE FALHAS</b> .....	69
4.1 MODELOS ESTATÍSTICOS PARAMÉTRICOS USADOS EM CONFIABILIDADE .....	69
<b>4.1.1 Distribuição Weibull</b> .....	70

4.2	FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE PARA ANÁLISE DE FALHAS .....	71
4.2.1	Função densidade de probabilidade .....	71
4.2.2	Função probabilidade de falha .....	72
4.2.3	Função confiabilidade .....	72
4.2.4	Função taxa de falha .....	74
4.3	MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE PARA ANÁLISE DE FALHAS .....	75
4.3.1	Tempo médio até falha .....	76
4.3.2	Tempo médio entre falhas e tempo médio até primeira falha ..	76
4.4	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL .....	77
4.4.1	Influência da ordem das falhas na caracterização dos eventos	79
4.5	COMENTÁRIOS .....	80
5	<b>PROPOSTA DA METODOLOGIA .....</b>	<b>83</b>
5.1	ROBÔ .....	91
5.1.1	Sistema .....	92
5.1.2	Subsistemas .....	93
5.1.3	Componentes .....	95
5.2	ATRIBUTO DA CONFIABILIDADE .....	97
5.2.1	Confiabilidade de componentes .....	98
5.2.2	Confiabilidade dos subsistemas .....	101
5.2.3	Confiabilidade do sistema .....	104
5.3	COMENTÁRIOS .....	105
6	<b>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA .....</b>	<b>107</b>
6.1	ROBÔ PARALELO EQUIVALENTE (RPE) .....	109
6.2	ATRIBUTO DA CONFIABILIDADE .....	116
6.2.1	Confiabilidade dos componentes no robô paralelo equivalente	116
6.2.2	Confiabilidade dos subsistemas no robô paralelo equivalente	120
6.2.3	Confiabilidade do sistema no robô paralelo equivalente .....	122
6.3	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	127
7	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>137</b>
7.1	RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES .....	138
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	139
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>141</b>
	<b>APÊNDICE A - Distribuições de probabilidade .....</b>	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE B - Descrição dos componentes do modelo estrutural para o robô equivalente .....</b>	<b>155</b>
	<b>APÊNDICE C - Confiabilidade dos itens do modelo estrutural do robô paralelo equivalente .....</b>	<b>163</b>

<b>APÊNDICE D - Resultados da técnica FMEA do robô paralelo equivalente.....</b>	<b>169</b>
--	------------



## 1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade, como um atributo de produto, é utilizada em diversos sistemas técnicos de engenharia. Esse conceito têm grande aceitação nas áreas militar, naval, aviação e mineração, mesmo que, com o auge tecnológico dos últimos anos, tem ocorrido um maior interesse pela aplicação da confiabilidade em sistemas automáticos. Nota-se assim, a grande quantidade de sistemas que podem ser analisados.

Uma análise de confiabilidade deve estar baseada no entendimento funcional de cada sistema e a análise de seus eventos de falha, usando técnicas adequadas às necessidades de cada projeto. Assim, os resultados advindos desse tipo de análise suportam a execução de ações, as quais visam garantir ou manter a confiabilidade requerida no sistema. Algumas das ações citadas estão encaminhadas ao estabelecimento de planos de manutenção, uso de itens redundantes, integração de sistemas de monitoramento, desenvolvimento de novos sistemas etc.

Ao longo das aplicações de confiabilidade várias metodologias foram já desenvolvidas. Dias (1996) estabeleceu uma metodologia para analisar a confiabilidade nos circuitos de freios pneumáticos automotivos, Bertsche (2008) sintetizou uma sequência de passos para estimar a confiabilidade em uma transmissão mecânica de etapa simples e Barabady & Kumar (2008) apresentaram um fluxograma de confiabilidade para orientar os cálculos em equipamentos de mineração.

De fato, já existem normas de confiabilidade para orientar a aplicação de seus princípios, cujos procedimentos foram desenvolvidos por diversas organizações. Desta forma, a norma MIL-STD-756B do DOD (Department of Defense / United States of America) e a norma STD 1413 da IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sistematizam o cálculo da confiabilidade em itens mecânicos, elétricos e eletrônicos. Por sua vez, a norma NBR 9320 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) fixa as condições para ensaios de confiabilidade.

Eventualmente, existe uma quantidade maior de normas às citadas neste trabalho, algumas dessas focadas à análise qualitativa da confiabilidade, por exemplo, a norma J1739 da SAE (Society of Automotive Engineers) sistematiza o processo da técnica de análise de modos de falha e seus efeitos (*Failure modes effects and analysis* –FMEA).

Hoje em dia, os sistemas técnicos vêm evoluindo de forma a satisfazer as necessidades e requisitos dos mais diversos tipos, gerando maior interesse pelo atributo da confiabilidade nos projetistas, uma vez que, esse desenvolvimento tecnológico está relacionado diretamente ao incremento das fontes de

falha.

Nesse caminho de desenvolvimento novos sistemas estão sendo projetados para executar tarefas de alto risco, gerar grandes velocidades de operação e altos níveis de exatidão em tarefas de posicionamento. Esses sistemas se tornam importantes quando são projetados para operar sem participação humana direta, e é para criar essa possibilidade que os avanços tecnológicos abrem as portas a equipamentos automáticos e robóticos.

Hoje em dia o mercado da automação oferece três tipos de robôs: robôs manipuladores seriais, robôs manipuladores paralelos e robôs móveis. Esses tipos de sistemas são usados em diversos setores da indústria e cuja demanda é cada vez maior.

Evidência da tendência mostrada é a quantidade de robôs usados. Segundo Weihmann (2011), citando as projeções da IFR (International Federation of Robotics), o número de robôs em 2012 vai superar os 12,65 milhões de unidades.

Da mesma forma, a IFR, em 2008, indicou como o mercado de robôs está atingindo as áreas do planeta. Esse estudo mostrou que na América Latina, tanto Brasil quanto a Argentina apresentaram um forte crescimento influenciado pela indústria automobilística, onde o mercado brasileiro, em 2007, registrou um incremento de 63% em relação a 2006. No total, 703 robôs foram instalados nesse ano, somando 3805 máquinas no Brasil (FLUIPRESS, 2008).

A crescente demanda reforça, assim, a importância de desenvolver estudos de confiabilidade na área de robótica. De fato, Dhillon (1999) ressalta que a robótica se projeta como uma área na aplicação das técnicas de confiabilidade, motivando o desenvolvimento de robôs com maior robustez.

Igualmente, Carlson et al. (2004) indicam que o grande avanço da robótica e sua ampla utilidade devem garantir certo nível de confiabilidade. Por sua vez, Ferreira (2002) destaca que ao longo dos investimentos de automação e robótica, as dimensões competitivas mais importantes para seu estudo de viabilidade são: confiabilidade, custos, produtividade, flexibilidade e qualidade.

Já com relação às pesquisas desenvolvidas, os princípios de confiabilidade são aplicados, principalmente, sobre os manipuladores robóticos seriais e robôs móveis. No caso de robôs seriais, Walker & Cavallaro (1996) apresentam um estudo de aplicação da técnica de *árvore de falhas* em um manipulador para limpeza de resíduos perigosos, e Gao et al. (2008) sugerem o uso de sistemas redundantes de controle, comunicação e atuação em robôs de uso espacial a partir da análise de confiabilidade feita. A importância de robôs móveis na área militar motivou a construção do *centro de confiabilidade para robôs terrestres* (Ground Robotics Reliability Center – GRRC), cujo projeto



foi iniciado em 2007 pela Universidade de Michigan.

Já na perspectiva dos robôs paralelos, a confiabilidade é pouco estudada. No entanto, a importância deste tipo de sistemas no setor de telecomunicações, saúde e bens e serviços motiva a inclusão da confiabilidade, visando analisar os eventos de falha do robô para fundamentar a tomada de decisões.

Nota-se que, parte das pesquisas, acima mostradas, focam-se na análise de confiabilidade na fase de uso do robô. No entanto, é importante analisar a confiabilidade nas primeiras etapas de projeto, ou seja, nas fases de desenvolvimento do sistema.

Desta forma, desenvolver uma metodologia para analisar a confiabilidade em robôs ao longo das fases de desenvolvimento se torna muito significativo, isso porque é durante essas fases que a confiabilidade é incluída como atributo inerente do produto.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia que permita analisar a confiabilidade de sistemas robóticos seriais e paralelos, obtendo informações relevantes de sua estrutura para orientar o planejamento de ações, as quais devem encaminhar o cumprimento dos requisitos mínimos de confiabilidade estabelecidos para a vida útil do robô. Por outro lado, é importante ressaltar que não será abordada a confiabilidade computacional ou de *software*.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar os itens que compõem a estrutura de um robô, relacionando esse modelo estrutural a partir de um desdobramento funcional para encaminhar o entendimento do sistema;
- Determinar os modelos de confiabilidade da estrutura estabelecida para calcular as probabilidades individuais dos itens, suportando a execução de ações necessárias para garantir a confiabilidade projetada para o robô;
- Estabelecer uma sistemática para analisar a confiabilidade do robô, apoiando os processos envolvidos com métodos e técnicas a serem aplicadas nas fases de desenvolvimento do sistema;

## 1.2 ESTRUTURA E CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS

A organização dos conteúdos está feita para orientar o leitor nos fundamentos de uma metodologia desenvolvida, onde os capítulos estão estruturados para envolver duas áreas do conhecimento: confiabilidade e robótica. Cada capítulo é estruturado para incluir um assunto específico que torna o entendimento da metodologia mais simples.

No Capítulo 2 se apresentam os conceitos de robótica, em especial os relacionados a robôs seriais e paralelos. Assim, neste capítulo, mostra-se a arquitetura do robô como uma integração de subsistemas e componentes.

No Capítulo 3 se mostram os conceitos de confiabilidade para analisar sistemas técnicos, isso com base na escolha de técnicas adequadas, como por exemplo, diagrama de blocos e análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA). Além disso, são apresentadas normas que orientam a análise de confiabilidade em itens elétricos, eletrônicos e mecânicos.

No Capítulo 4 se apresentam os modelos estatísticos paramétricos, os quais permitem determinar as probabilidades individuais de um componente. Este capítulo se centra na distribuição Weibull biparamétrica, a qual permite analisar as falhas com base nas funções e métricas de confiabilidade.

No Capítulo 5 se mostra a metodologia para análise de confiabilidade em sistemas robóticos, objetivo principal deste trabalho.

No Capítulo 6 se apresenta a aplicação da metodologia proposta em um sistema robótico paralelo.

Finalmente, têm-se as referências bibliográficas.

## 2 SISTEMAS ROBÓTICOS

Automação programável é uma das principais alternativas oferecidas para melhorar tecnologicamente os processos produtivos, principalmente por sua facilidade de adaptar-se às necessidades operacionais mais diversas.

Destaca-se, com base no contexto anterior, que os sistemas robóticos vêm sendo utilizados em diferentes áreas da indústria e cada vez com maior frequência. No entanto, o desenvolvimento tecnológico desses tipos de sistemas está tornando as suas fontes de falha ainda mais complexas, motivando os projetistas na aplicação dos princípios de confiabilidade.

Os robôs industriais são sistemas que podem incorporar itens elétricos, eletrônicos, pneumáticos e hidráulicos para o cumprimento de uma função. Na prática, esse tipo de componente vai falhar em um instante futuro qualquer, sugerindo uma série de questões a serem analisadas, por exemplo: Por que o sistema falha? Como desenvolver sistemas mais confiáveis? Como medir ou testar a confiabilidade em sistemas cada vez mais complexos? Como manter ou garantir a confiabilidade? (ZIO, 2009, p.128).

O estudo da confiabilidade deve partir de uma estrutura do sistema robótico, a qual deve ser clara e bem definida para tornar simples a aplicação dos princípios de confiabilidade.

Assim, este capítulo contextualiza a robótica a partir dos manipuladores seriais e paralelos, cuja arquitetura do sistema é apresentada como um desdobramento de subsistemas e componentes, aplicando a técnica de *análise funcional* para estabelecer as relações existentes entre itens identificados. Finalmente, são apresentadas algumas pesquisas de confiabilidade feitas na área de robótica.

### 2.1 FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA

A Federação Internacional de Robótica (International Federation of Robotics – IFR) define um robô industrial, citando a norma ISO 8373, como:

“manipulador programável multiuso controlado automaticamente e reprogramável em três ou mais eixos, podendo ser fixos ou móveis para a utilização em aplicações de automação industrial”

De fato, um sistema robótico visa fazer movimentos programados com base em uma ação solicitada pelo usuário. Isso é feito incorporando componentes de comunicação, controle, atuação etc.

Autores como Tsai (1999), Ferreira (2002) e Angeles (2007) identi-

ficam a estrutura básica de um sistema robótico, coincidindo na integração de uma série de componentes. Desta forma, existe um subsistema mecânico que mostra o aspecto estrutural do robô, um conjunto de atuadores que transformam a energia (hidráulica, pneumática ou elétrica) em movimento, uma série de sensores que fornecem a informação sobre o comportamento do manipulador e, uma unidade de controle responsável pelo gerenciamento e monitoramento das variáveis operacionais.

Usualmente, acopla-se um equipamento adicional à estrutura acima indicada, visando criar a interação do robô com um célula de trabalho, em outras palavras, integra-se uma ferramenta relacionada diretamente à aplicação do robô, por exemplo, sistemas de vácuo para manipulação de produtos ou equipamentos de solda para união de materiais.

As características de um robô industrial permitem definir várias classificações, relacionadas à estrutura mecânica e tipo de energia usada nos atuadores, tal como é indicado a seguir.

### 2.1.1 Classificação dos robôs industriais

A classificação mais comum dos robôs é definida pela configuração da estrutura mecânica, a qual permite diferenciar dois tipos de robôs principalmente, sendo estes: robôs manipuladores e robôs móveis (SICILIANO et al., 2009).

Os *robôs manipuladores* consistem estruturalmente em uma sequência de corpos rígidos ou elos interconectados por meios de juntas, essa conexão é chamada de cadeia cinemática. Com base na forma como estão conectados os elos é possível distinguir dois tipos de estruturas (Figura 1), a primeira como um mecanismo de cadeia cinemática aberta, comumente conhecida como manipulador serial e, uma segunda estrutura determinada por uma cadeia cinemática fechada, associada os manipuladores paralelos. Neste tipo de robôs a base é fixa.

Já os *robôs móveis* integram componentes adicionais na sua base, os quais permitem o deslocamento do robô de um ponto a outro, diferenciando-os, assim, dos robôs manipuladores. A principal aplicação dos robôs móveis está na indústria militar.

Existe outra classificação adicional, esta vez quanto à tecnologia utilizada para gerar o movimento do robô. De acordo com Tsai (1999), existem três tipos tecnologia a usar: hidráulica, pneumática e elétrica. Das tecnologias mencionadas se destacam pela sua ampla utilidade:

- Tecnologia elétrica: os robôs elétricos são os mais populares na indústria da robótica, utilizando servomotores e motores de passo para in-

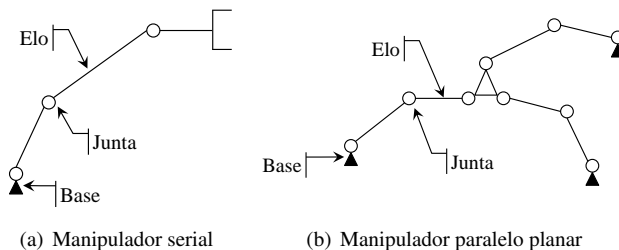


Figura 1 – Tipos de robôs manipuladores

duzir o movimento nas juntas. Entre as principais vantagens dos robôs elétricos está a sua facilidade de controle.

- Tecnologia hidráulica: os robôs hidráulicos são apropriados para altas capacidades de carga.

O foco deste trabalho são os sistemas robóticos seriais e paralelos, isso com base em uma arquitetura semelhante que relaciona esses dois tipos de manipuladores. Por outro lado, ao longo deste texto os termos “robô” e “manipulador” são usados com frequência, referenciando o sistema robótico.

## 2.2 ROBÔS SERIAIS E PARALELOS: ARQUITETURA DO SISTEMA

Como já foi mencionado os robôs manipuladores podem ser configurados a partir de uma cadeia cinemática aberta ou fechada, identificando robôs seriais e paralelos respectivamente.

Os manipuladores seriais foram os primeiros a serem construídos e, até os dias atuais, ainda são a classe de robô mais encontrada na indústria. Esse tipo de manipulador apresenta uma estrutura semelhante ao braço humano, a qual lhe permite movimentos em um amplo espaço de trabalho, mas sofre de baixa rigidez e erro de posicionamento relativamente grande (SANTOS, 2011).

Devido às deficiências apresentadas pelos manipuladores seriais, alguns pesquisadores desenvolveram novos tipos de estruturas cinemáticas para robôs, onde uma dessas novas estruturas é conhecida como manipulador paralelo. Esse tipo de manipulador é capaz de atingir alta rigidez e força, no entanto, apresenta um espaço de trabalho restrito (TSAI, 1999).

Além de uma estrutura mecânica, os robôs seriais e paralelos integram diversos itens na geração de uma trajetória desejada. Assim, neste trabalho, identificou-se cinco subsistemas principais: monitoramento, controle, atua-

ção, mecânico e efetuador, que por sua vez, estão compostos por componentes. O detalhamento de cada subsistema é mostrado a seguir.

### 2.2.1 Subsistema de monitoramento

Segundo Barrientos (1997) para que o sistema robótico consiga fazer sua tarefa final com a adequada exatidão, velocidade e controle, é necessário o conhecimento de seu próprio estado operacional e entorno de trabalho.

De fato, os sensores são cruciais para atingir o desempenho dos sistemas robóticos. Assim, um sensor é “um elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza <sup>1</sup> a ser medida” (INMETRO, 2009)

Nesse contexto, o estado operacional está relacionado às variáveis de posição, velocidade e torque do robô. Usualmente, no controle de posição são empregados diversos transdutores, destacando-se o *encoder* e *resolver* para o fornecimento da posição angular e transdutores LVDT para variáveis lineais.

Mesmo que as medições de velocidade possam ser calculadas a partir das informações dos sensores de posição, é possível, também, obter as medições diretas de velocidade. Desta forma, podem-se utilizar transdutores de velocidade, conhecidos como tacômetros.

Já o entorno de trabalho vincula as variáveis fornecidas no contexto de aplicação do robô, podendo-se usar sistemas de visão, sensores de proximidade, entre outros.

Uma descrição mais detalhada de transdutores de posição, velocidade, sistemas de visão e sensores de proximidade, pode ser consultada em Siciliano et al. (2009) e Barrientos (1997).

### 2.2.2 Subsistema de controle

O controle de sistemas robóticos estabelece estratégias adequadas para gerar as trajetórias do robô, relacionando uma programação computacional executada em uma arquitetura de *hardware*. Entretanto, esta dissertação foca a confiabilidade do subsistema de controle unicamente nos itens físicos.

Basicamente, um subsistema de controle deve estar dotado de itens que permitam processar a informação para modificar o comportamento do robô. Em termos de hardware, usa-se recursos computacionais no processamento da informação, de modo a utilizar canais de comunicação adequados

---

<sup>1</sup>Propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e uma referência (INMETRO, 2009)

para transferir os dados ao robô e vice-versa (SICILIANO et al., 2009).

As características técnicas dos recursos computacionais dependem dos requisitos para processamento da informação. Por outro lado, a transferência de dados usa protocolos de comunicação, integrando com frequência unidades E/S (Entradas/Saídas) para comunicar o robô com os elementos de processamento.

### 2.2.3 Subsistema de atuação

Com base na natureza da potência fornecida pelo subsistema de atuação é possível especificar a tecnologia usada no robô. Assim, normalmente, utilizam-se itens elétricos, pneumáticos ou hidráulicos.

Segundo Siciliano et al. (2009, p.192) os componentes típicos de um subsistema de atuação, independente da tecnologia incorporada, são: fonte de potência, módulo de acionamento, atuadores e elementos de transmissão. A relação de funcionalidade desses componentes pode ser estabelecida pelo fluxo de potência dentro do subsistema, tal como é indicado na Figura2.

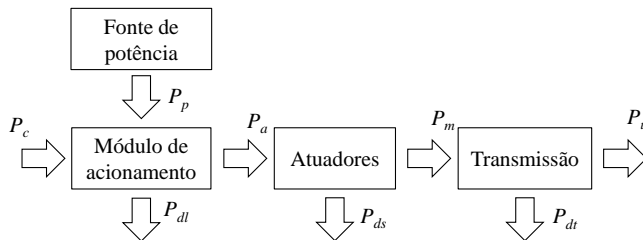


Figura 2 – Fluxo de potência nos componentes do subsistema de atuação  
Fonte: Siciliano et al. (2009, p.192)

Onde

$P_p$  = Potência proveniente da fonte primária;

$P_c$  = Potência associada aos sinais de controle;

$P_u$  = Potência mecânica requerida para o movimento das juntas;

$P_a$  = Potência requerida nas conexões intermédias;

$P_m$  = Potência gerada pelos atuadores;

$P_{dl}$ ,  $P_{ds}$  e  $P_{dt}$  = Perdas de potência.

Observa-se, conforme à Figura 2, que a potência proveniente da fonte primária  $P_p$  é controlada pelo módulo de acionamento, o qual ativa os atuadores para fornecer potência mecânica  $P_u$  aos elementos de transmissão.

Com base na potência mecânica  $P_u$  é selecionada a tecnologia usada no subsistema de atuação. Desta forma, é possível associar componentes existentes à fonte de potência, módulo de acionamento e atuadores, tal como exemplifica a Figura 3.

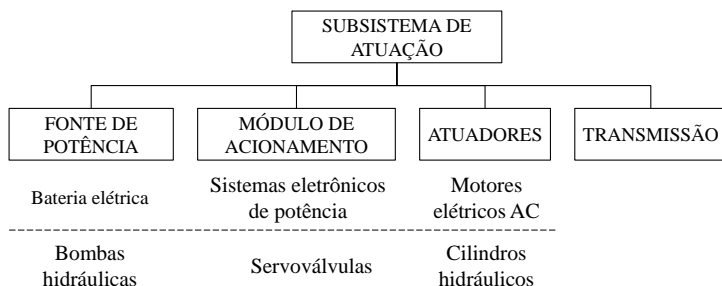


Figura 3 – Relação de componentes no subsistema de atuação para energia elétrica e hidráulica

Os elementos de transmissão estão restritos à necessidade de seu uso, por exemplo, quando o extremo do robô se movimenta com acelerações elevadas, gera momentos de inércia nos atuadores que devem ser reduzidos ao máximo. Nesse caso, é adequado o uso caixas redutoras de engrenagens (elementos de transmissão) para diminuir o impacto das altas velocidades (BARRIENTOS, 1997).

Também existe a possibilidade de que torques elevados sejam necessários no extremo do robô mas, dependendo do atuador utilizado, nem sempre é possível fornecer a capacidade de torque requerida; por exemplo, atuadores elétricos de alta velocidade para manipulação de carga. Assim, para solucionar o problema anterior podem se usar, novamente, caixas redutoras de engrenagens acopladas nos atuadores.

Quando não existem elementos de transmissão é usado o termo *acoplamento direto*, o qual especifica que o eixo do atuador é conectado diretamente às juntas do subsistema mecânico.

#### 2.2.4 Subsistema mecânico

O subsistema mecânico está relacionado à estrutura do robô. Um robô paralelo está composto por uma plataforma móvel conectada a uma plataforma fixa por no mínimo duas cadeias cinemáticas independentes (elos e juntas), ou seja, possui uma estrutura mecânica paralela (MERLET, 2006). Por



sua vez, o robô serial possui uma série de juntas (pares cinemáticos) atuadas que conectam a base ao efetuador final (TSAI, 1999).

A configuração das estruturas apresentadas anteriormente podem ser exemplificadas com base em dois tipos de robôs. O primeiro (Figura 4 a) é uma plataforma Stewart, a qual representa um manipulador paralelo. Por outro lado, o robô tipo Scara é um manipulador serial (Figura 4 b).

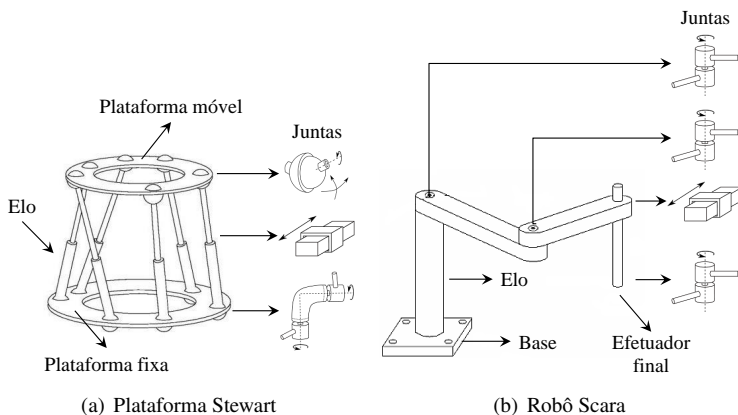


Figura 4 – Manipulador serial e paralelo

Como é mostrado na Figura 4 os robôs manipuladores usam diferentes tipos juntas ou pares cinemáticos, os quais permitem desenvolver uma diversidade de movimentos dependendo do tipo de junta usada (Figura 5), tal como indica a seguir.

- Par cinemático (ou junta) rotativo: permite movimentos de rotação entre dois elos sobre um eixo que é definido pela sua geometria.
- Par cinemático prismático: possibilita um único movimento de translação entre os dois elos.
- Par cinemático helicoidal: possibilita rotar sobre, e trasladar ao longo, de um eixo definido pela geometria da mesma.
- Par cinemático esférico: Permite que um elemento rotacione o translade de forma independente em relação a um mesmo eixo.
- Par cinemático universal: É uma combinação de duas juntas rotativas com interseção e eixos ortogonais.

- Par cinemático planar: permite duas translações ao longo de um plano de contato e uma rotação sobre seu eixo normal.

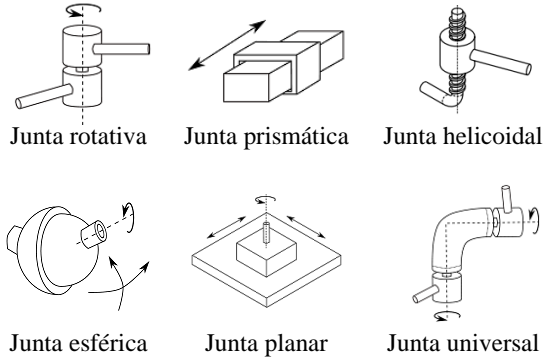


Figura 5 – Tipos de juntas existentes em robôs

### 2.2.5 Subsistema efetuator

O item final, também chamado de efetuator final, está disposto para interagir diretamente com o entorno de aplicação do robô. Geralmente, este tipo de item pode ser do tipo ferramentas ou garras mecânicas (BARRIENTOS, 1997).

Dentro das garras mecânicas é comum usar os acionamentos pneumáticos, isso porque oferecem ambientes de trabalho limpos quando se requer. Já as ferramentas são usadas em outro tipo de aplicações, por exemplo, robôs em processos de pintura ou solda.

Tanto as garras mecânicas (também conhecidos como *grippers* em inglês) quanto as ferramentas, estão acoplados à estrutura mecânica do robô. Assim, o efetuator final é posicionado para executar um procedimento particular.

## 2.3 ANÁLISE FUNCIONAL: APLICAÇÃO AOS ROBÔS MANIPULADORES

A partir da estrutura do sistema robótico – estabelecida como uma integração dos subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e

efetuador – é possível detalhar as relações de funcionalidade existentes entre os itens identificados.

Para tal fim, a técnica de *análise funcional* se torna adequada para estruturar um modelo de funções com base na estrutura de componentes do robô, acompanhando dentro do modelo os fluxos de energia, material e sinal existentes.

Segundo Dias et al. (2011), a técnica de análise funcional é definida como um conjunto de atividades, as quais são feitas com o intuito de obter maior conhecimento do sistema em estudo. O processo da técnica é detalhado em três atividades principais, sendo estas: *descrição do sistema*, *desdobramento em subsistemas e componentes* e *identificação de funções*.

Na descrição do sistema é igualmente definido o escopo da análise, o ambiente e a interação com outros sistemas. Já o detalhamento da estrutura varia de acordo à complexidade do sistema.

A técnica de análise funcional é bastante utilizada para o desenvolvimento de produtos, mas é possível vinculá-la na análise de falhas e confiabilidade de sistemas técnicos. Desta forma, quanto maior for o detalhamento do sistema, menor será o tempo requerido para a análise das falhas.

As três atividades da técnica de análise funcional foram realizadas sobre um sistema robótico, assim, os resultados obtidos são apresentados a seguir.

1. Descrição do sistema: O robô é um manipulador multifuncional reprogramável, estruturalmente composto por uma cadeia cinemática fechada ou aberta, e mecanicamente integrado por múltiplos subsistemas e componentes. Esses itens são projetados para desempenhar uma tarefa de posicionamento, a qual é feita dentro de um espaço de trabalho limitado pela configuração estrutural do robô.

De fato, o objetivo da análise é determinar a relação funcional existente entre os itens identificados, fornecendo informações que suportem a representação do sistema na forma de diagrama de blocos de confiabilidade.<sup>2</sup>

2. Desdobramento em subsistemas e componentes: A estrutura do robô manipulador foi definida em três níveis hierárquicos: sistema, subsistemas e componentes, como indicado na Figura 6.
3. Identificação de funções: As funções estão detalhas por nível hierárquico, quer dizer, ao sistema se associa uma *função global (FG)*, a cada subsistema uma *função parcial (FP)* e para cada componente uma

---

<sup>2</sup>Diagrama de blocos é uma técnica usada para estimar a confiabilidade de sistemas técnicos.

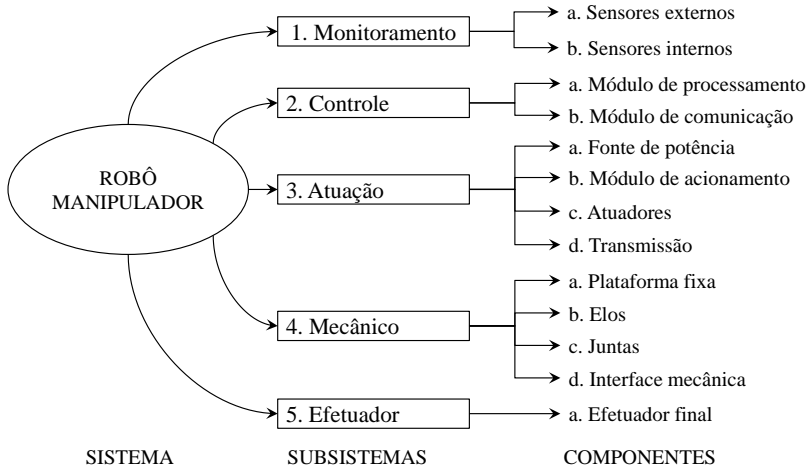


Figura 6 – Desdobramento estrutural do robô paralelo

*função elementar (FE)*, conforme se detalha a seguir.

**Robô manipulador (FG):** Desenvolver trajetórias programadas a partir de um controlador para, eventualmente, serem executadas dentro de um espaço de trabalho cujas dimensões estão limitadas pela configuração da estrutura mecânica. Assim, ao longo das trajetórias é posicionada uma ferramenta final, disposta para executar a tarefa específica do robô;

**Subsistema de monitoramento (FP1):** Fornecer as variáveis operacionais do robô, garantindo a partir destas a adequada posição e velocidade na trajetória desejada;

**Subsistema de controle (FP2):** Processar as variáveis operacionais para modificar o comportamento do robô, executando rotinas pre programadas para transferir as informações aos itens periféricos do sistema robótico;

**Subsistema de atuação (FP3):** Fornecer potência mecânica de forma controlada para gerar os movimentos do robô;

**Subsistema mecânico (FP4):** Transmitir a potência mecânica ao subsistema efetuador, usando a cadeia cinemática para posicionar a estrutura ao longo de uma trajetória de posição;

**Subsistema efetuador (FP5):** Interagir de forma direta com o entorno de trabalho do manipulador, realizando a tarefa final estabelecida no contexto de aplicação do robô.

**Sensores externos (FE1-1):** Fornecer as variáveis do entorno de tra-

balho, de modo a assegurar a correta iteração entre o extremo do robô e superfície de contato, relacionado à aplicação do robô;

**Sensores internos (FE1-2):** Proporcionar a informação do estado operacional do robô, fundamentalmente os parâmetros de posição, velocidade e torque nas juntas;

**Módulo de comunicação (FE2-1):** Transferir de forma cíclica os parâmetros do estado operacional e variáveis do entorno de trabalho, parâmetros gerados nos componentes periféricos do robô e processados no hardware de controle;

**Módulo de processamento (FE2-2):** Executar as rotinas pré programadas usando as variáveis operacionais, cujas informações obtidas permitem gerenciar o estado operacional do robô;

**Fonte de potência (FE3-1):** Fornecer potência;

**Módulo de acionamento (FE3-2):** Ativar os atuadores;

**Atuadores (FE3-3):** Gerar o movimento do robô;

**Transmissão (FE3-4):** Transferir a potência mecânica dos atuadores às juntas;

**Plataforma fixa (FE4-1):** Fixar a estrutura mecânica do manipulador ao sistemas inercial de referência;

**Juntas (FE4-2):** Permitir o movimento relativo entre dois elos;

**Elos (FE4-3):** Configurar, a partir do acoplamento com as juntas, as pernas do robô para conectar a plataforma fixa e interface mecânica;

**Interface mecânica (FE4-4):** Conectar a estrutura mecânica com uma ferramenta final, posicionando-a dentro do espaço de trabalho definido para o robô;

**Efetuator final (FE5-1):** Executar a tarefa final do robô no seu contexto de aplicação;

Cada nível hierárquico do desdobramento estrutural – associado às funções global, parcial e elemental – relaciona um fluxo de sinal e energia entre os itens identificados.

Para o primeiro e segundo nível hierárquico, identificados para o sistema e subsistemas, os fluxos relacionados anteriormente são detalhados na Figura 7.

Ressalta-se, então, que o robô manipulador, definido pela função global (FG), *usa energia elétrica, hidráulica ou pneumática* para gerar as trajetórias na forma de *potência mecânica*, as quais são controladas por rotinas pré programadas estabelecidas pelo usuário na forma de *sinal de programação*.

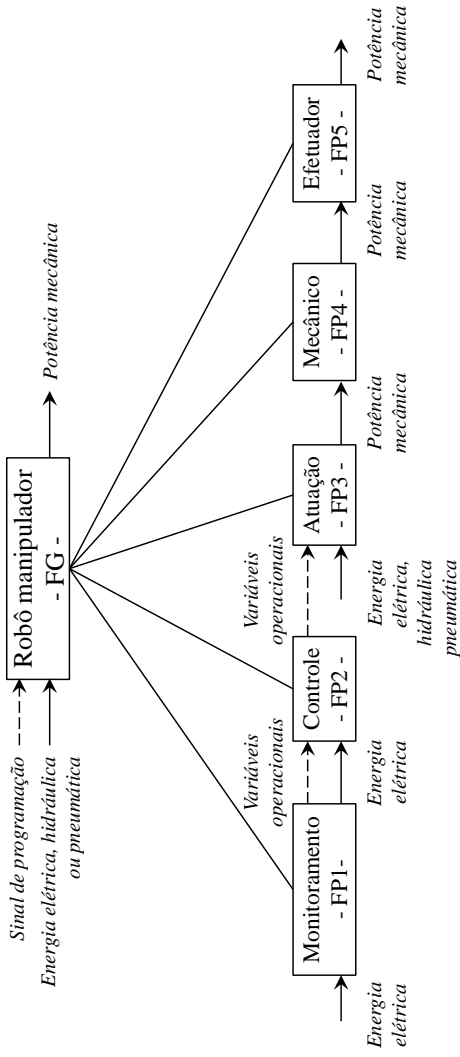


Figura 7 – Análise funcional no nível de sistema e subsistemas do robô manipulador

Já no nível hierárquico de subsistemas se distinguem duas regiões, uma caracterizada pelo fluxo contínuo de sinais (parte esquerda da Figura 7) e outra pelo fluxo de potência mecânica (parte direita).

Inicialmente, o fluxo de sinais corresponde às *variáveis operacionais* do robô, relacionadas aos subsistemas de monitoramento e controle.

Por outro lado, o fluxo contínuo de energia mecânica existe entre os subsistemas de atuação, mecânico e efetuator. Assim, o subsistema de atuação fornece *energia elétrica, hidráulica ou pneumática* à estrutura mecânica, a qual é posicionada para permitir ao subsistema efetuator realizar a sua tarefa final.

Já o nível hierárquico de componentes do subsistema de monitoramento (Figura 8), os sensores externos fornecem as *variáveis do entorno de trabalho* – posição de um produto qualquer sobre uma banda transportadora em movimento –, sobre as quais são geradas as *variáveis do estado operacional* do robô – posição, velocidade e torque necessários nas juntas do robô –.

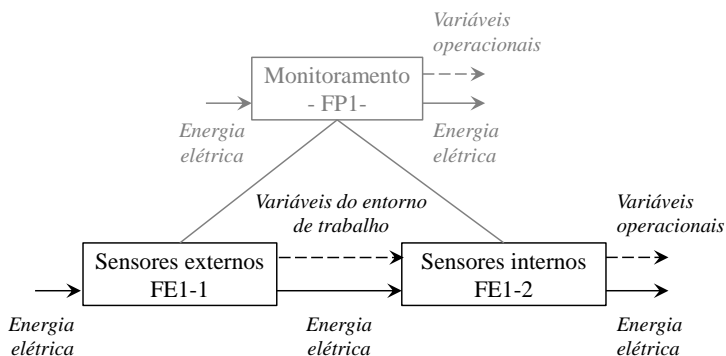


Figura 8 – Análise funcional dos componentes do subsistema de monitoramento

Esse conjunto de variáveis, advindas do entorno de trabalho e o estado operacional, são referenciadas como *variáveis operacionais*, de forma a fornecer os dados que deverão ser processados no controle do robô.

O fluxo de sinal entre os componentes do subsistema de controle (Figura 9) é na forma de ida e volta, pois o módulo de comunicação recebe os sinais dos itens periféricos do robô (sensores externos, sensores internos, módulo de acionamento, atuadores etc.) para serem processados, retornando novos sinais à rede de comunicação para ativar controladamente o subsistema de atuação.

Entretanto, o fluxo de energia entre os componentes do subsistema de

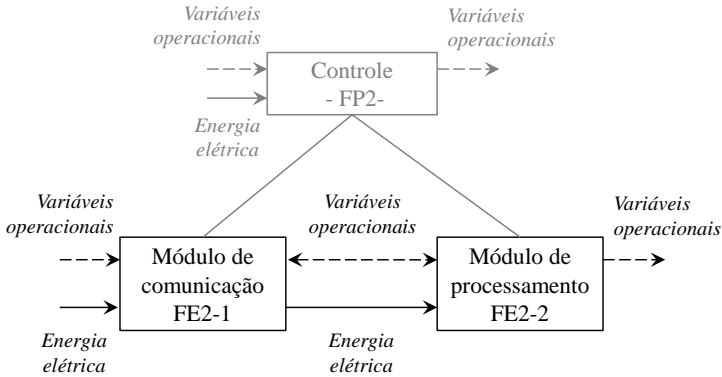


Figura 9 – Análise funcional dos componentes do subsistema de controle

atuação é mostrado na Figura 10. Percebe-se, que, as *variáveis operacionais* permitem ao módulo de acionamento controlar a quantidade de energia fornecido aos atuadores. Desta forma, a *potência mecânica* de saída do subsistema de atuação é fornecida às juntas atuadas do subsistema mecânico, a qual é transferida através das pernas do robô à interface mecânica (Figura 11). Como resultado desse fluxo é possível posicionar o efetuator final.

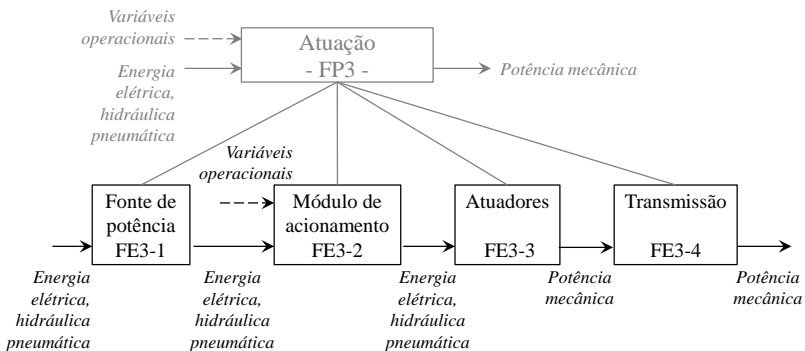


Figura 10 – Análise funcional dos componentes do subsistema de atuação



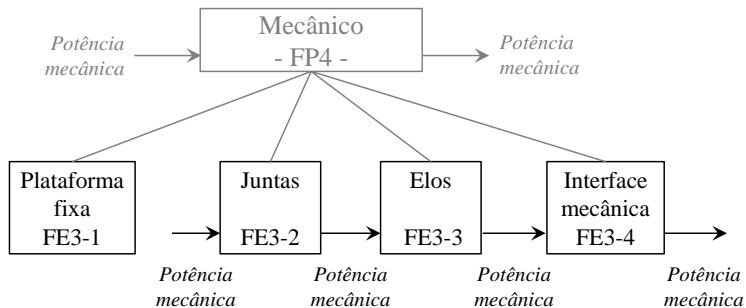


Figura 11 – Análise funcional dos componentes do subsistema mecânico

O entendimento da estrutura de um robô (seja paralelo ou serial) é fundamental para aplicar os conceitos de confiabilidade. Desta forma, na seção a seguir se indicam pesquisas de confiabilidade na área de robótica.

## 2.4 CONFIABILIDADE EM ROBÓTICA: UMA PERCEPÇÃO AO LONGO DOS ÚLTIMOS ANOS

O desenvolvimento de trajetórias em um robô pode estar afetada por problemas relacionados aos componentes de controle, existência de vibrações, defeitos de fabricação, erros de programação, entre outros.

Assim, pesquisas em robótica mostram um contínuo interesse na identificação e caracterização das falhas, cujos estudos vêm sendo feitos ao longo dos últimos 15 anos. De fato, serão apresentados na sequência alguns desses resultados.

- Walker & Cavallaro (1996) detalham a aplicação da técnica *Fault tree analysis* (FTA)<sup>3</sup> na fase de design de um manipulador serial, usado na remoção de resíduos perigosos em um tanque de armazenamento subterrâneo. A partir da técnica usada foram definidos dois cenários de falha: colisão do robô dentro do tanque e incapacidade de retirar o manipulador do tanque.
- Carlson et al. (2004) apresentam a taxonomia das falhas (Figura 12) para um robô móvel, detalhando a sua origem e tipo de falha. Desta

<sup>3</sup>A análise de árvore de falhas (FTA – *fault tree analysis*) é uma técnica dedutiva, ou seja, a partir do evento de falha inicial que se deseja analisar, identifica-se os eventos intermediários resultantes da associação lógica das causas básicas (DIAS et al., 2011).

forma, foram definidas *falhas físicas* como aquelas presentes nos componentes de potência, sensor, comunicação, efetuator e controle, e as *falhas humanas* como resultado da interação entre o robô e o usuário.

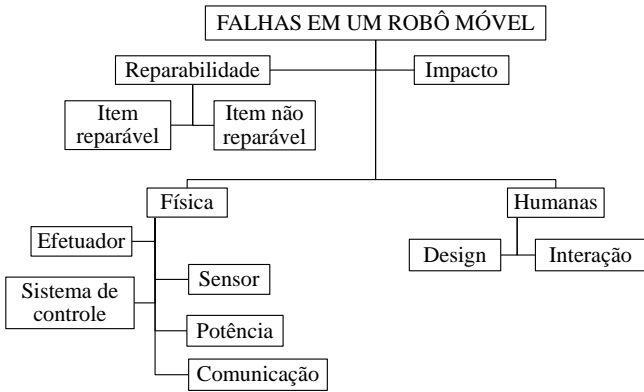


Figura 12 – Taxonomia das falhas em um robô móvel

Fonte: Adaptado de Carlson et al. (2004, p.4989)

- Shim et al. (2009) desenvolveram uma sistemática (Figura 13) para a seleção de técnicas apropriadas na tolerância de falhas, estabelecendo nessa sistemática etapas entre as falhas possíveis no robô e a técnica adequada.

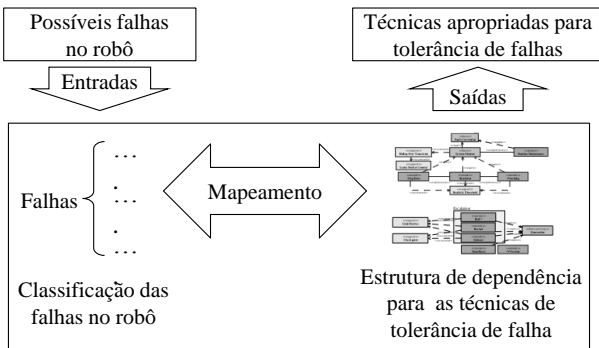


Figura 13 – Abordagem para seleção de técnicas na tolerância de falhas em robôs

Fonte: Adaptado de Shim et al. (2009, p.298)

Inicialmente, deve-se classificar as falhas em termos da aplicação do robô, seguido disso, deve-se organizar as técnicas em uma estrutura baseada no seu entendimento para estabelecer a dependência das técnicas. Finalmente, é feito um mapeamento da relação entre o tipo de falha classificada e a aplicabilidade da técnica, obtendo como saída a técnica apropriada para tolerância de falhas em robôs.

Pesquisas adicionais continuam com a tendência já mostrada, por exemplo, Leusche et al. (1998) usam o modelo de Markov<sup>4</sup> para estimar a confiabilidade, aplicando seus princípios em um robô para limpeza de resíduos radiativos. Khodabandehloo (1996) aplica as técnicas FTA e FMEA<sup>5</sup> em robôs industriais de tecnologia hidráulica. Gao et al. (2008) analisam a confiabilidade de robôs usados em aplicações espaciais, recomendando a partir do resultados o uso de sistemas redundantes nos subsistemas de comunicação, controle e acionamento. Phuoc & Titus (2009) documentam a análise de confiabilidade de veículos terrestres não tripulados (*Unmanned ground vehicle* –UGV), como parte dos aportes ao centro de pesquisa de robôs terrestres (Ground robotics research center) da Universidade de Michigan nos Estados Unidos.

## 2.5 COMENTÁRIOS

Este capítulo apresentou os conceitos de robótica, centrando-se principalmente nos robôs paralelos. Esse tipo de sistemas podem integrar tecnologia elétrica, hidráulica ou pneumática, sua escolha depende das características operacionais requeridas na aplicação do robô.

O robô paralelo foi mostrado como um sistema composto pelos subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuator, os quais estão integrados por diversos componentes. Sobre essa arquitetura do sistema foi aplicada a técnica de análise funcional, cujos resultados facilitam o entendimento do robô paralelo e orientam a identificação da relação existente entre os diversos itens.

Assim, este capítulo fornece o modelo estrutural do robô paralelo, usado dentro da metodologia proposta para analisar a sua confiabilidade. Portanto, deve-se procurar as técnicas adequadas para aplicá-las sobre o modelo

---

<sup>4</sup>O modelo de Markov permite determinar a confiabilidade de um sistema o componentes, caracterizados por serem itens reparáveis (BERTSCHE, 2008)

<sup>5</sup>A análise dos modos de falha e seis efeitos (*failure mode and effects analysis* –FMEA) é uma sistemática estabelecida para reconhecer e avaliar falhas potenciais de produtos/processos junto com seus efeitos, identificando ações que possam eliminar ou reduzir a chance de uma falha potencial acontecer (SAE, 2002)

estrutural do robô paralelo, abordando as estimativas de confiabilidade e análise das falhas.

Desta forma, os conceitos de confiabilidade relacionados a esse método serão apresentados no capítulo a seguir.

### 3 CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

A engenharia de confiabilidade é a disciplina que deve analisar a funcionalidade de um sistema quando é operado de maneira específica, em outras palavras, deve evitar as falhas ou minimizar seu impacto (YANG, 2007).

A diversidade de tecnologias incorporadas nos sistemas técnicos coloca a confiabilidade como um campo multidisciplinar, a qual visa pesquisar os limites de incerteza entre o bom funcionamento de sistemas e suas possíveis falhas.

Assim, uma análise de confiabilidade precisa de uma orientação adequada, relacionando os conceitos básicos, técnicas de análise, termos usados, tipos de resultados a serem obtidos etc. No entanto, a confiabilidade é analisada a partir de modelos que simplificam a realidade do sistema. Isso significa que existe um erro associado à análise, mas que não é parte do objetivo desta dissertação.

As características confiabilísticas de um sistema podem ser otimizadas, seja nas fases de projeto ou durante sua operação. De fato, segundo Back et al. (2008), adotar os seguintes princípios de projeto ajudam nesse objetivo:

- Simplificar o projeto ao máximo sem prejudicar o desempenho da função, o que vem em benefício da confiabilidade.
- Melhorar a confiabilidade individual dos componentes.
- Projetar um sistema para melhorar a manutenibilidade etc.

De acordo com Yang (2007), as atividades para analisar a confiabilidade de um sistema tem maior impacto quando são executadas nas fases de projeto, pois é nessa fase do ciclo de vida onde se adiciona a confiabilidade e se eliminam os potenciais modos de falha do sistema.

As atividades de confiabilidade estão relacionadas à aplicação das técnicas adequadas, visando caracterizar os eventos de falha através de suas probabilidades e análise da cadeia que envolve a ocorrência de um dado modo de falha. Assim, existem técnicas já consolidadas para tal fim, por exemplo, modelo de Markov, diagrama de blocos (*Reliability block diagram – RBD*), análise probabilístico, análise dos modos de falha e seus efeitos (*Failure modes effects and analysis – FMEA*), análise de árvore de eventos (*Fault tree analysis – FTA*) etc.

Por tanto, este capítulo mostra os conceitos de confiabilidade, a técnica de *diagrama de blocos* e a *análise dos modos de falha e seus efeitos*. Essa informação é complementada com normas técnicas, as quais orientam o caminho a ser percorrido para analisar a confiabilidade de sistemas.

### 3.1 TERMINOLOGIA DE CONFIABILIDADE

A engenharia de confiabilidade usa uma alta variedade de vocabulário relacionado aos tipos de falhas, classes de itens, estados operacionais, medidas de desempenho, entre outros. De fato, a norma NBR 5462/1994 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) padroniza a terminologia de confiabilidade e manutenibilidade, definindo vários termos considerados relevantes neste trabalho, por exemplo:

- “Item: Qualquer parte, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente.” (ABNT, 1994, p. 1).
- “Item reparado: Item reparável que será de fato reparado depois de uma falha” (id., 1994, p. 1).
- “Item não reparado: Item que não será reparado depois de uma falha” (id., 1994, p. 2).
- “Falha: Termina da capacidade de um item desempenhar a função requerida” (id., 1994, p. 3).
- “Vida útil: Sobre dadas condições, é o intervalo de tempo desde o instante em que um item é colocado pela primeira vez em estado de disponibilidade, até o instante em que a intensidade de falha se torna inaceitável ou até que o item seja considerado irrecuperável” (id., 1994, p. 10).
- “Modelo de confiabilidade: Modelo matemático usado para previsão ou estimação das medidas de confiabilidade de um item” (id., 1994, p. 14).
- “Tempo até primeira falha: Duração acumulada dos tempos de operação de um item, desde sua colocação pela primeira vez no estado de disponibilidade até o instante de ocorrência de falha” (id., 1994, p. 12).
- “Tempo até falha (*Mean time to failure* - MTTF): Duração acumulada dos tempos de operação de um item, desde sua colocação em estado de disponibilidade até a ocorrência da falha, ou do instante do restabelecimento funcional até ocorrência da próxima falha” (id., 1994, p. 12).
- “Tempo entre falhas (*Mean time between failure* – MTBF): Tempo acumulado entre duas falhas consecutivas de um item reparado” (id., 1994, p. 12).

### 3.2 ESTRUTURA FUNDAMENTAL DO CONCEITO DE CONFIABILIDADE

A tendência do homem é prever o risco, transformando essa noção ao benefício da engenharia para preservar a funcionalidade de sistemas técnicos. De fato, desde começo dos anos 30 são usados os princípios de confiabilidade, tempo durante o qual várias definições foram apresentadas, por exemplo:

1. “A probabilidade de um sistema desempenhar seu propósito adequadamente por um período desejado, dentro das condições de operação encontradas” (BILLINTON; ALLAN, 1992, p. 6);
2. “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sobre condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (ABNT, 1994, p. 3);
3. “Medida de credibilidade, ou confiança, que se deposita em um item quanto a sua capacidade de executar uma dada missão por certo período de tempo” (ALMEIDA, 1999, p. 12);
4. “A probabilidade de um sistema ou produto desempenhar a função de forma satisfatória, por um determinado período de tempo, quando operado sobre especificadas condições de operação” (BACK et al., 2008, p. 555);

Dias (1996), confrontando algumas outras definições de confiabilidade, propõe quatro estruturas fundamentais: *probabilidade*, vista como a ferramenta estatística na avaliação da confiabilidade; *condições de operação*, onde são definidos os padrões de uso recomendados no projeto inicial; *comportamento adequado*, estabelecida para identificar o padrão de referência na operação satisfatória do item e; *período de uso*, o qual relaciona a medida de uso no funcionamento do item.

Os fundamentos probabilísticos da confiabilidade requerem informação relacionada aos períodos de falha, fornecidos na medida em que se tornam disponíveis durante a vida útil do item ou por meio de testes de laboratório. No entanto, em sistemas complexos não é tão fácil obter esses tipos de dados, pois a ocorrência de um evento de falha pode ser considerada como catastrófica ou de alto valor econômico, como acontece em usinas hidroelétricas, plantas nucleares e sistemas de telecomunicações.

Para Dias (2010), a escassez de dados de falha pode ser mitigada a partir de um desdobramento do sistema, ou seja, definindo subsistemas, componentes, itens etc. Entenda-se, assim, que as informações dos níveis baixos

são mais fáceis de serem obtidas. Desta forma, a probabilidade de falha do sistema completo é resultado da relação entre as confiabilidades individuais dos níveis baixos, onde essa relação pode ser obtida com base na aplicação de técnicas adequadas de confiabilidade.

### 3.3 CONFIABILIDADE DE SISTEMAS

O estudo da confiabilidade pode ser abordado na perspectiva quantitativa e qualitativa das falhas, de modo que existem métodos e técnicas particulares para cada uma, tal como indicado na Figura 14.

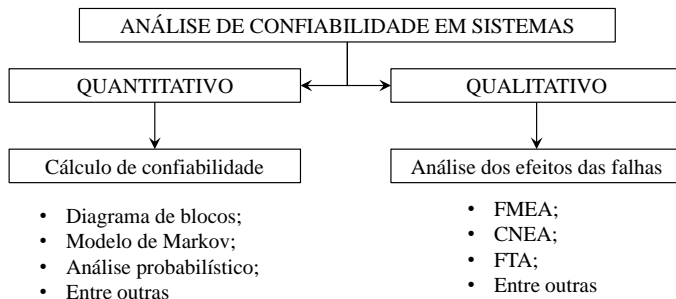


Figura 14 – Métodos quantitativos e qualitativos para a análise de confiabilidade

Fonte: Adaptado de Bertsche (2008, p.5)

Percebe-se, assim, a variedade de técnicas que podem ser usadas. No entanto, nas seguintes seções serão apresentadas unicamente as técnicas usadas dentro da metodologia proposta, ou seja, diagrama de blocos e *Failure modes effects and analysis* (FMEA).

#### 3.3.1 Diagrama de blocos

O fundamento da técnica de diagrama de blocos é a álgebra Booleana, usando seus operadores lógicos para fazer o encadeamento dos eventos de falha, os quais estão identificados por uma probabilidade individual.

Eventualmente, existem restrições na aplicação desta técnica, as quais são destacadas por Bertsche (2008) da seguinte forma:

- Os itens do sistema devem ser não reparáveis - a definição desse termo



foi apresentada na Seção 3.1 -; para sistemas reparáveis é possível somente calcular a confiabilidade até a primeira falha;

- O estado funcional dos itens é definido como sucesso ou falha;
- Os itens do sistema devem ser independentes, quer dizer, a falha de um não deve influenciar a falha do outro.

O encadeamento dos eventos de falhas, fundamental na técnica *Reliability block diagram* (RBD), é feito a partir da sua lógica de ocorrência e representado na forma de blocos, onde cada um desses blocos representa um evento de falha em particular.

Arranjos de blocos podem ser estabelecidos para representar um sistema técnico, configurando estruturas que são identificadas por um modelo matemático, o qual encaminha as estimativas de confiabilidade.

Desta forma, encontram-se normalmente configurações em série e/ou paralelo. No entanto, existe outro tipo de configurações que podem ser usadas, por exemplo, *Delta-Estrela*, *Stand By*, *Tri modular* e *conexão R em N*.

### 3.3.1.1 Modelo de confiabilidade para itens em série.

A Figura 15 mostra a estrutura de uma configuração em série, a qual fornece o modelo de confiabilidade mais simples (Equação 3.1) a ser estabelecido para um sistema. Nota-se, a partir dessa estrutura, que a ocorrência de um evento de falha provoca a “falha” do item como um todo, ou seja, a sua operação normal depende do bom funcionamento de todos os itens que a compõem.

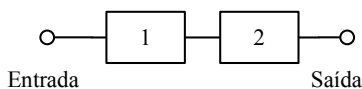


Figura 15 – Diagrama de blocos para itens em série

$$R_s = P(R_1)P(R_2) = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3.1)$$

Onde

$R_s$  = confiabilidade do sistema;

$R_1$  = confiabilidade do item 1;

$R_2$  = confiabilidade do item 2;

$R_i$  = confiabilidade do item, para  $i = 1, 2, 3 \dots n$ .

A probabilidade do sistema – calculada como o produto das confiabilidades individuais – pode se tornar crítica na medida que aumenta o número de itens em série. Assim, uma má confiabilidade é resultado de cada item adicional incorporado, ainda que as confiabilidades individuais sejam altas. A Figura 16 mostra a tendência mencionada para itens com probabilidades individuais idênticas ( $R_{B1} = 99.9\%$ ,  $R_{B2} = 99.5\%$ ,  $R_{B3} = 99\%$  e  $R_{B4} = 95\%$ ).

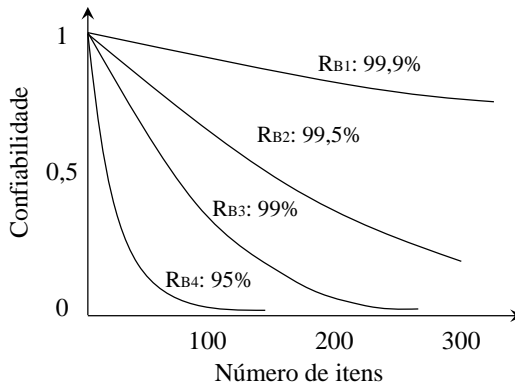


Figura 16 – Comportamento da confiabilidade de itens em série

Fonte: Adaptado de Bertsche (2008, p.75)

### 3.3.1.2 Modelo de confiabilidade para itens em paralelo

Um item pode ser representado por uma configuração em paralelo, tal como é mostrado na Figura 17. Frequentemente, essa estrutura é usada para relacionar “n” elementos operando simultaneamente entre “k” disponíveis, definindo a confiabilidade do sistema em análise como indica a Equação 3.2

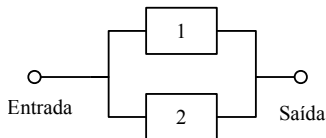


Figura 17 – Diagrama de blocos para itens em paralelo

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (3.2)$$

Onde

$R_s$  = confiabilidade do sistema em paralelo

$R_i$  = probabilidade de falha do item, para  $i = 1, 2, 3 \dots n$

Em confiabilidade uma estrutura em paralelo pode ser vinculada a sistemas redundantes, cuja nomenclatura está definida pela quantidade de itens em operação sobre o total de itens disponíveis. O termo *redundância* - em confiabilidade - descreve a capacidade de um sistema para superar um evento de falha, usando recursos secundários disponíveis, ou seja, um sistema redundante possui um segundo item que assume as funções do item primário quando esse esteja falhando.

Desta forma, arranjos puros ou plenos são redundâncias do tipo “*um*” *item bom entre “n” disponíveis*, representando a redundância ideal, mas nem sempre presente nos sistemas de engenharia. A formulação matemática para esse tipo de arranjo é igual à já apresentada na Equação 3.2.

Arranjos parcialmente redundantes são definidos por “*k*” *itens bons entre “n” disponíveis*. Nesse caso, precisa-se de um bom funcionamento dos “*k*” itens (que atuam como um arranjo em série), os quais estão apoiados pela redundância existente dos  $n - k$  itens (que atuam como uma configuração em paralelo). Já o modelo de confiabilidade indicado a seguir assume itens idênticos com confiabilidades, também, idênticas.

$$R_{k/n} = 1 - \sum_{i=1}^k \binom{n}{i-1} R^{i-1} (1 - R)^{n-i+1} \quad (3.3)$$

Onde

$R_{k/n}$  = confiabilidade com redundância parcial de  $k$  itens bons de  $n$ ;

$R$  = confiabilidade individual dos itens idênticos.

$$\binom{n}{i-1} = n! / (i-1)!(n-1+1)!$$

Dhillon (2005) apresenta o comportamento característico da confiabilidade para vários sistemas redundantes (Figura 18), especificamente itens com redundância ideal ( $k = 1$  e  $n = 3$ ), redundância de “dois” itens em “três” ( $k = 2$  e  $n = 3$ ) e redundância de “três” itens em “três” ( $k = 3$  e  $n = 3$ ). Nota-se que, o arranjo pleno atinge a maior confiabilidade, de modo que quando começa a diminuir a quantidade de itens secundários disponíveis ( $n - k$ ), a confiabilidade do arranjo torna-se também mais baixa.

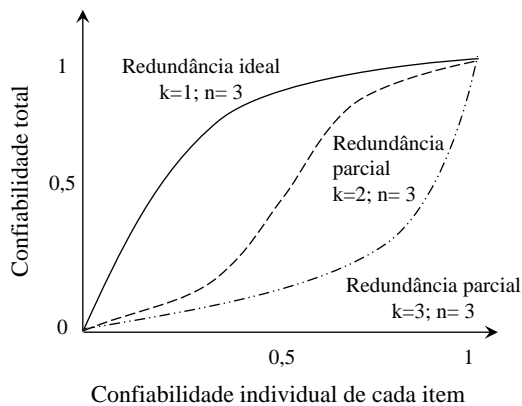


Figura 18 – Comportamento de sistemas redundantes

Fonte: Adaptado de Dhillon (2005, p.61)

### 3.3.1.3 Modelo de confiabilidade para itens combinados

Um sistema técnico pode estar constituído por múltiplos itens, os quais estão configurados em série e paralelo dentro da mesma representação do sistema. Nesse caso, é feito um processo de redução da configuração combinada até obter uma estrutura mais simples (Figura 19).

Para obter o modelo de confiabilidade final são identificados conjuntos de itens que estejam configurados em série ou paralelo, onde cada conjunto está definido pela formulação matemática já mostrada nas Seções 3.3.1.1 e 3.3.1.2. Assim, em cada processo de redução se aplica um modelo de confiabilidade particular até chegar à configuração mais simples.

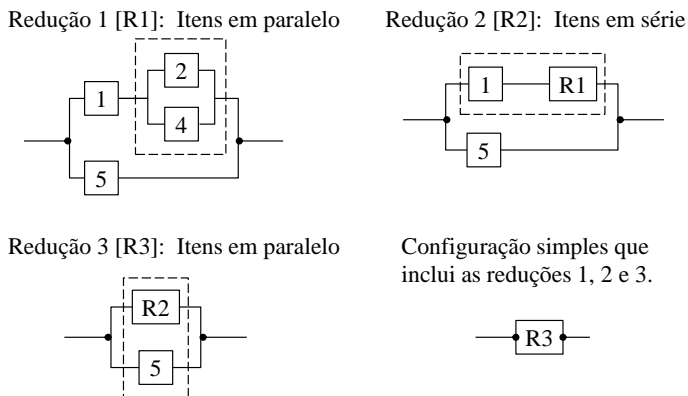


Figura 19 – Reduções sequenciais de um sistema combinado

### 3.3.1.4 Modelo de confiabilidade para itens com sensor de condição

É possível que itens incorporem sensores pra monitorar uma condição em particular, relacionada a um estado de falha iminente que visa ser detectada antes que efetivamente ocorra.

De acordo com Dias (1996), o arranjo que pode representar essa realidade está constituído por um item inicial ( $CO_A$ ) e um sensor ( $SE$ ). No desenho esquemático da Figura 20 o sensor monitora a condição do item inicial, por sua vez,  $CO_B$  representa o item secundário disposto para quando  $CO_A$  esteja em condição de falha iminente. Na pratica, o item secundário é uma ação de resposta à condição detectada. De fato, como a falha efetivamente não ocorreu, a ação de resposta deve ser interpretada como uma suspensão<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>A perda da função de um item está definida pelo período de uso anterior à sua ocorrência, assim, podem ser estabelecidos períodos de falha ou períodos de suspensão. No primeiro caso, são falhas propriamente ditas, já no segundo, faz-se referência a atividades de manutenção ou troca de itens.

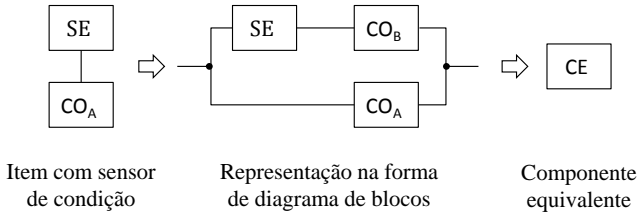


Figura 20 – Configuração para um item com sensor de condição

Fonte: Adaptado de Dias (1996, p.55)

Para analisar a confiabilidade da estrutura mostrada é considerado o item secundário igual ao item inicial ( $CO_A = CO_B$ ), em consequência as suas confiabilidades também são idênticas  $R_{CO_A} = R_{CO_B} = R_{CO}$ . Assim, o modelo de confiabilidade é detalhado pela Equação 3.4

$$R_{CE} = 1 - [(1 - R_{SE}R_{CO})(1 - R_{CO})] \quad (3.4)$$

### 3.3.2 Análise dos modos de falha e seus efeitos FMEA

A análise dos modos de falha e seus efeitos (*Failure modes effects and analysis* – FMEA) é uma técnica que auxilia a análise de qualidade, manutenção e confiabilidade em sistemas.

A FMEA objetiva a análise das falhas a partir dos detalhes que envolvem a sua ocorrência, ou seja, identificando a forma como o item deixa de executar a sua função, a maneira como é percebida aquela falha e as causas que levam a sua ocorrência. Segundo SAE (2002), a FMEA é definida como:

“Grupo de atividades sistemáticas estabelecidas para reconhecer e avaliar falhas potenciais de produtos ou processos junto com seus efeitos, identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de uma falha potencial acontecer e, documentar o processo”.

Vários tipos de FMEA e abordagens podem ser definidos. A escolha depende do tipo de resultados desejados, a complexidade do sistema, os clientes principais etc. De acordo com (KAGUEIAMA, 2012), o tipo de FMEA está relacionado ao ciclo de vida do item, podendo identificar:

- FMEA de sistema, utilizada na análise de itens nas primeiras fases de concepção e projeto;
- FMEA projeto, utilizado para análise de produtos antes que esses cheguem à manufatura;



Quadro 1 – Descrição da planilha FMEA

(continuação)

Coluna	Descrição
c	Descrever os efeitos da falha em termos do que usuário pode perceber na sua ocorrência, ou seja, como a falha se manifesta, por exemplo, ruído, evento térmico, item sem operação etc
d	Índice que indica a severidade do efeito.
f	Listar as causas/mecanismos da falha. A causa potencial é como a falha pode ocorrer e ser indicada, por exemplo, inadequadas instruções de manutenção, corrosão, inadequada lubrificação, tratamento térmico inadequado etc.
g	Índice que indica a ocorrência da causa.
h	Registrar os controles já existentes para prevenir ou detectar as causas identificadas.
i	Índice que indica a dificuldade de detecção, associado ao nível de controle imerso na causa de falha.
j	Número de prioridade de risco, obtido como a multiplicação dos índices atribuídos à severidade, ocorrência e detecção.
k	Recomendações a partir da priorização do R.P.N.
l	Responsável pela implementação das tarefas.
m, n	Acompanhamento das ações e verificação dos resultados atribuindo novos índices de severidade, ocorrência e detecção.

Fonte: Adaptado de SAE (2002)

É importante destacar que a técnica FMEA identifica as ações recomendadas que devem ser desenvolvidas para mitigar as causas e efeitos, relacionados aos modos de falha identificados. O índice NPR permite priorizar as ações a serem tomadas, mas nem sempre essa avaliação de criticidade é feita, no entanto, quando for pertinente pode ser considerada.

Nota-se, finalmente, que, a FMEA avalia as ações recomendadas atualizando novamente os índices de severidade, ocorrência, detecção e RPN em cada uma das ações identificadas. Isso é especificado na parte final da planilha de resultados, já mostrada na Figura 21.



### 3.4 ESTIMATIVAS DE CONFIABILIDADE EM SISTEMAS TÉCNICOS

Existem duas normas que orientam as estimativas de confiabilidade: a norma militar *MIL-STD-756B* do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (Department of Defense / United States of America – DoD) e a norma *STD 1413* do instituto de engenheiros elétricos e eletrônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE). Essas normas não são as únicas a serem disponibilizadas na literatura, mas se consideram adequadas para orientar o caminho a ser percorrido na procura de estimar a confiabilidade de sistemas robóticos, isso com base no tipo de itens que um robô pode integrar na sua estrutura.

Segundo DoD (1981b), a norma MIL-STD-756B pode ser aplicada em itens eletrônicos, elétricos, mecânicos e eletromecânicos. O procedimento especificado nessa norma está baseado no método de diagrama de blocos (RBD), usando modelos estatísticos paramétricos<sup>2</sup> para o cálculo das probabilidades individuais dos itens.

Nesse contexto, os passos estabelecidos na norma MIL-STD-756B são:

1. Definir o item;
2. Definir as condições de uso;
3. Definir o diagrama de blocos que melhor represente o item;
4. Definir o modelo matemático;
5. Definir as partes do item;
6. Definir os dados de operação;
7. Definir os dados de estresse;
8. Definir a distribuição de falha;
9. Definir as taxas de falha;
10. Calcular a confiabilidade do item de estudo.

---

<sup>2</sup>Modelos estatísticos paramétricos são distribuições de probabilidade que ajustam os dados de falha. Entre as distribuições de maior aplicação na área de confiabilidade estão a distribuição Weibull e a distribuição Exponencial

Por outro lado, a norma STD 1413 ressalta a necessidade de obter informações suficientes do sistema, esclarecendo suposições e riscos associados aos cálculos da confiabilidade (IEEE, 2010). Ao igual que MIL-STD-756B, a norma STD 1413 pode ser aplicada em itens elétricos, eletrônicos e mecânicos, no entanto, a STD 1413 não especifica as técnicas e métodos de confiabilidade a usar, deixando nos projetistas a sua escolha.

Os passos indicados na norma STD 1413 são:

1. Identificar e descrever o item.;
2. Estabelecer o destino no uso dos resultados;
3. Identificar o método a usar:
  - Suposições;
  - Modelos;
  - Técnicas;
  - Fontes de dados;
  - Descrição dos atributos das falhas: modo de falha, mecanismo da falha, causa da falha e efeito da falha.
4. Listar as entradas requeridas, por exemplo, condições de operação, ambiente, tempo de uso etc;
5. Definir as métricas a ser calculadas;
6. Definir limitações e fontes de incertezas;
7. Estabelecer a confiança estatística nas estimativas;
8. Resumir a metodologia e considerações adotadas na análise.

Percebe-se, com base nas normas citadas acima, que são diversos os sistemas elétricos, eletrônicos e mecânicos sobre os quais podem se analisar a confiabilidade. Assim, diversos autores propõem sistemáticas próprias para aplicar a sistemas técnicos particulares, visando analisar a confiabilidade desses sistemas.

Dias (1996), propôs-se desenvolver uma metodologia para a análise de confiabilidade em circuitos de freios pneumáticos automotivos, fundamentada basicamente em cinco etapas (Figura 22), as quais podem se resumir como:

- O *modelo físico* (etapa 1) é uma abstração do mundo real dos itens que compõem o freio pneumático, contemplando as suas funções requeridas, condições de falha e lógica de funcionamento do circuito;

- A *identificação dos itens do sistema* (etapa 2) procura registrar os itens que compõem o sistema, ressaltando o cuidado que deve se ter no descarte ou inclusão de itens;
- O *modelo confiabilístico* (etapa3) define os modelos de confiabilidade segundo as características em série, paralelo e combinado do sistema;
- O *modelo matemático* (etapa 4) estabelece as equações para o cálculo da confiabilidade conforme ao tipo de arranjo, dependência ou independência dos eventos de falha e outro fatores;
- Ao final, o *modelo computacional* (etapa 5) é a ferramenta que permite a interação entre os projetistas e os resultados gerados a partir de dados disponíveis.

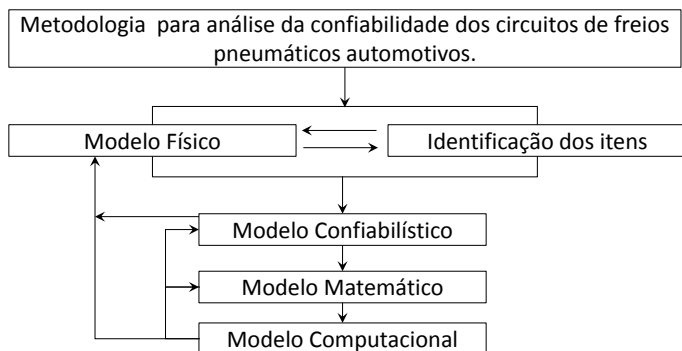


Figura 22 – Metodologia de análise de confiabilidade em freios pneumáticos automotivos

Fonte: Adaptado de Dias (1996, p.100)

Por sua vez, Barabady & Kumar (2008) estruturaram uma metodologia (Figura 23) para analisar a confiabilidade da planta trituradora III da mina Jajarm Bauxite, localizada no Irã. As características desta metodologia respondem aos objetivos de melhorar o entendimento e natureza das falhas na planta, as quais são analisadas de forma quantitativa a partir de uma coleta de dados.

Para analisar esses períodos de falha os autores propõem usar uma das distribuições de probabilidade contínuas (Weibull, Exponencial etc.), sempre e quando não exista uma tendência<sup>3</sup> nem correlação serial entre os dados

<sup>3</sup>Verifica-se, a partir do teste estatístico  $X^2$ , a tendência dos dados a uma distribuição Poisson, aplicada para fenômenos discretos

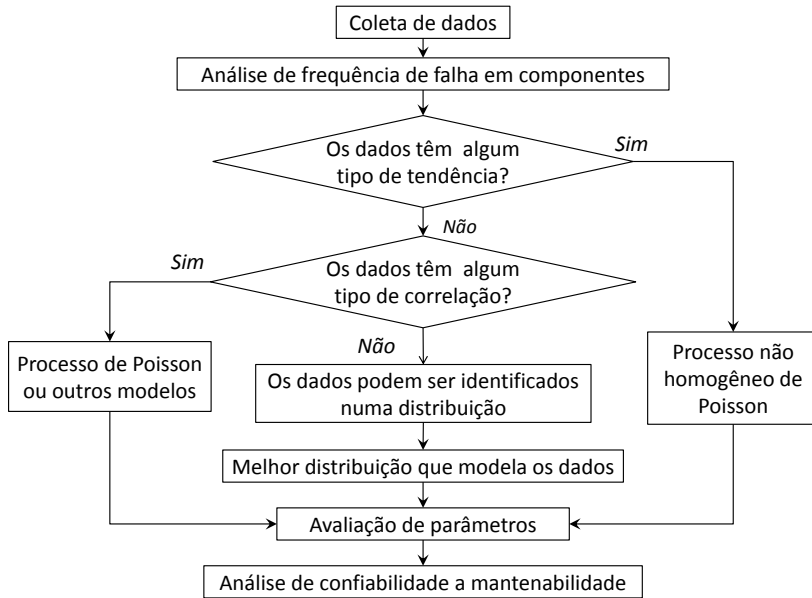


Figura 23 – Metodologia para análise de confiabilidade da planta trituradora III

Fonte: Adaptado de Barabady & Kumar (2008, p.2)

analisados.

Eventualmente, qualquer que seja a distribuição probabilidade usada, essa é definida por uma série de parâmetros que devem ser calculados. Ao final, a partir dessas informações é feita a análise de confiabilidade para cada componente identificado na planta trituradora III, tal está definido ao longo da sistemática mostrada já na Figura 23.

### 3.5 COMENTÁRIOS

Este capítulo apresentou os conceitos de confiabilidade, orientando nas técnicas para analisar sistemas técnicos desde a abordagem qualitativa e quantitativa das falhas. Além disso, foram mostradas normas técnicas que encaminham o processo para analisar a confiabilidade de itens elétricos, eletrônicos e mecânicos.

Desta forma, a confiabilidade de sistemas pode ser analisada com base na técnica de diagrama de blocos RBD, partindo da identificação dos itens

para associá-los a uma configuração de confiabilidade, seja, itens em série, paralelo ou combinada.

Por sua vez, a técnica de análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA) é bastante útil, já que identifica a cadeia que caracteriza um evento de falha, quer dizer, desde a forma como a falha acontece até a maneira como é percebida pelo usuário do sistema, detalhando as causas que a provocam.

Nota-se, então, com base no modelo estrutural do robô paralelo, mostrado no Capítulo 2, que já é possível determinar os modelos de confiabilidade que vão representar os subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuado, como também, o modelo de confiabilidade para o sistema total.

No entanto, o RBD assume o conhecimento das probabilidades de falha individuais de cada item. Então, deve-se procurar a aplicação de métodos que permitam calculá-las. Para isso, a distribuição Weibull é bastante utilizada pela sua abrangência, facilitando o cálculo das confiabilidades em itens eletrônicos, elétricos e mecânicos. Essa distribuição de probabilidade é utilizada para análise de falhas.



## 4 ANÁLISE DE FALHAS

A confiabilidade usa a estatística para analisar a probabilidade de funcionamento de um sistema, aplicando modelos paramétricos que ajustam os períodos de falha dentro de uma tendência de comportamento.

Esses modelos paramétricos são, especificamente, as distribuições de probabilidade. Na área de confiabilidade, a distribuição normal, lognormal e gama são usadas com frequência, mas a *distribuição Weibull* e *distribuição exponencial* são os modelos estatísticos paramétricos de maior aplicação.

Basicamente, uma distribuição de probabilidade qualquer permite inferir o comportamento dos eventos de falha, isso a partir das seguintes informações: funções e métricas de confiabilidade.

As *funções de confiabilidade* envolvem o formato probabilístico dos eventos de falha e, por sua vez, as *métricas de confiabilidade* especificam a sua frequência de ocorrência.

Desta forma, neste capítulo são mostrados as principais distribuições de probabilidade, focando-se na distribuição Weibull para o modelamento matemático das funções e métricas de confiabilidade associadas à análise das falhas.

### 4.1 MODELOS ESTATÍSTICOS PARAMÉTRICOS USADOS EM CONFIABILIDADE

Modelos estatísticos paramétricos são distribuições de probabilidade que associam, à variável analisada, uma probabilidade de ocorrência.

Em confiabilidade a variável de análise é o período de falha do sistema técnico, o qual está definido em horas de uso, quilômetros percorridos etc. Para analisar a probabilidade de ocorrência dos períodos de falha são usadas, frequentemente, distribuições contínuas de probabilidade, por exemplo, Normal, Lognormal, Exponencial e Weibull.

Neste contexto, a distribuição Normal, de acordo com Almeida (1999), não representa adequadamente a realidade dos mecanismos de falha, fazendo dessa distribuição pouco significativa na confiabilidade. Por sua vez, uma distribuição lognormal é utilizada para caracterizar os tempos de reparo ao longo da vida útil do item. Já uma distribuição gama, segundo Lopes (2001), pode modelar o comportamento de vários mecanismos de falha em situações de falhas parciais, ou seja, falhas associadas à ocorrência de “n” falhas a uma taxa ocorrência constante.

Tipicamente, as distribuições Exponencial e Weibull são as de maior

aplicação. De fato, uma distribuição Exponencial é apropriada para modelar falhas aleatórias, usualmente causadas por perturbações externas em equipamentos eletrônicos e elétricos. Por sua vez, uma distribuição Weibull envolve um maior domínio das aplicações de confiabilidade, isso devido a sua alta adaptabilidade aos períodos de falha coletados já que não possui um formato de curva definido.

Um maior detalhamento das distribuições Exponencial e Normal, pode ser consultado no Apêndice A.

#### 4.1.1 Distribuição Weibull

Uma distribuição de probabilidade, qualquer que seja a utilizada, é definida por uma série de parâmetros em uma função matemática, onde os parâmetros determinam o comportamento dessa função.

Assim, uma distribuição Weibull é especificada pelo parâmetro de forma ( $\beta$ ), vida inicial ( $\gamma$ ) e escala ou vida característica ( $\alpha$ ). Por tanto, a função que representa a distribuição Weibull é indicada a seguir:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (4.1)$$

Onde

$$\begin{aligned} \beta &> 0 \\ \gamma &\geq 0 \\ \alpha &> 0 \end{aligned}$$

A Equação 4.1 mostra a forma triparamétrica da distribuição Weibull, onde o parâmetro de forma caracteriza o nível de tecnologia como valor agregado no componente em análise, o parâmetro de vida inicial relaciona o funcionamento do componente até a ocorrência dos primeiros eventos de falha e, a vida característica identifica o tempo no qual ocorrem o 63,2% das falhas (Figura 24).

No entanto, para itens mecânicos, elétricos e eletrônicos o parâmetro de vida inicial é, normalmente, menor, se é comparado com a sua vida útil, quer dizer,  $\gamma \ll t$ . Isso se traduz na possibilidade de definir a distribuição Weibull como uma função de dois parâmetros, tal como se indica a seguir:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (4.2)$$



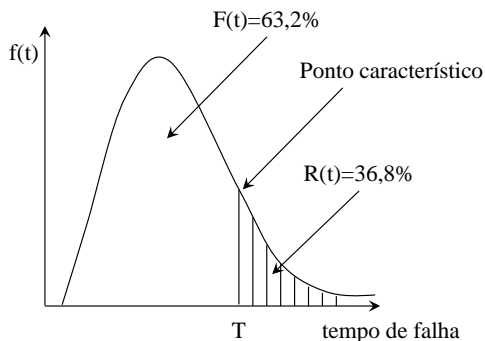


Figura 24 – Vida característica em uma função Weibull

Existem algumas condições sobre as quais a distribuição Weibull pode representar outra distribuição de forma idêntica, isso depende dos valores calculados para o parâmetro de forma. De fato, quando  $\beta = 1$ , a distribuição Weibull se torna uma distribuição Exponencial exata e, se  $\beta = 3,5$  é possível identificar uma distribuição Normal (BERTSCHE, 2008).

## 4.2 FUNÇÕES DE CONFIABILIDADE PARA ANÁLISE DE FALHAS

Um evento de falha pode ser analisado na abordagem das probabilidades, usando os períodos de uso que identificam esse evento no passado para calcular as suas possibilidades de ocorrência no futuro.

Para isso, a confiabilidade utiliza as distribuições de probabilidade caracterizando as funções densidade de probabilidade, probabilidade de falha, confiabilidade e taxa de falha.

### 4.2.1 Função densidade de probabilidade

A função densidade de probabilidade  $f(t)$  faz uma descrição simples dos eventos de falha, identificando a etapa na qual ocorrem a maioria desses eventos.

Por outro lado, no domínio da distribuição Weibull biparamétrica, a função  $f(t)$  foi definida na Equação 4.2. No entanto, no ponto conhecido como *vida característica*, ou seja, onde acontecem o 63,2% das falhas, o parâmetro  $\alpha$  é inversamente proporcional à taxa de falha característica ( $\lambda_0$ ).

Desta forma, se  $\alpha = 1/\lambda_0$ , pode-se alterar a função  $f(t)$ , tal como mostrado na equação a seguir.

$$f(t) = \beta (\lambda_0)^\beta (t)^{\beta-1} e^{-(\lambda_0 t)^\beta} \quad (4.3)$$

Onde

$$\lambda_0 = \frac{1}{\alpha}$$

#### 4.2.2 Função probabilidade de falha

Dias (1996) utiliza o termo *não confiabilidade* para descrever a função probabilidade de falha  $F(t)$ , apresentando a seguinte definição:

“não confiabilidade é o substantivo que expressa o evento complementar da confiabilidade, é a probabilidade de um item não desempenhar uma função requerida, ou seja, de estar em falha para um determinado período de uso, sobre certas condições previamente estabelecidas.”

A probabilidade de falha, como evento complementar da confiabilidade, está representada pela definição matemática indicada a seguir.

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (4.4)$$

Onde

$f(t)$  = função densidade de probabilidade.

Ressalta-se, então, que a partir da função  $f(t)$  para distribuição Weibull biparamétrica é possível determinar a função probabilidade de falha, tal como mostra a Equação 4.5.

$$F(t) = 1 - e^{-(\lambda_0 t)^\beta} \quad (4.5)$$

#### 4.2.3 Função confiabilidade

A função confiabilidade  $R(t)$  permite analisar a probabilidade de funcionamento depois de transcorrido um tempo  $t$ . Tal como é mostrado a seguir.

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (4.6)$$

Assim, a função confiabilidade para uma distribuição Weibull biparamétrica, com base na definição matemática acima mostrada, está indicada na Equação 4.7.

$$R(t) = e^{-(\lambda_0 t)^\beta} \quad (4.7)$$

A  $R(t)$  é um dos principais resultados obtidos em uma análise de confiabilidade. Desta forma, o comportamento da função  $R(t)$  para um distribuição Weibull biparamétrica, quando é assumido um valor constante de  $\lambda_0 = 1$  e vários valores de  $\beta = (0,5; 1; 2 \text{ e } 4)$ , é como mostrado na Figura 25.

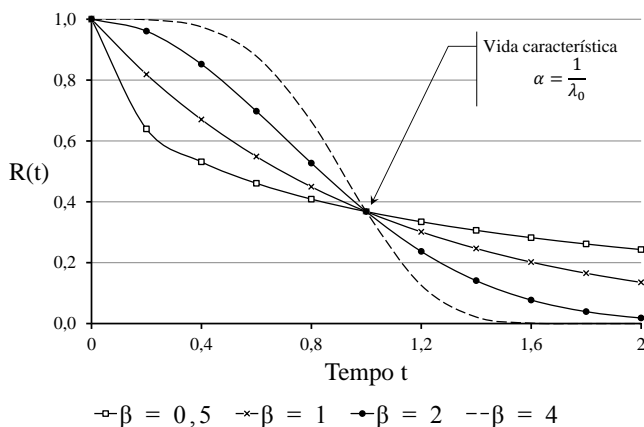


Figura 25 – Influência de  $\beta$  sobre a confiabilidade

Nota-se, a partir da figura acima mostrada, a influência do parâmetro de forma  $\beta$  na confiabilidade do sistema em análise. Assim, como  $\beta$  está relacionado ao nível de tecnologia inserido no item em análise, então, quanto maior  $\beta$ , maior será a confiabilidade e menor a dispersão das falhas.

Já a taxa de falha característica  $\lambda_0$  indica a quantidade média de falhas de um item em relação à unidade de uso. Assim, uma melhora na qualidade do item tende a diminuir esse índice, resultando em um aumento da vida média do item e da confiabilidade, tal como é mostrado na Figura 26.

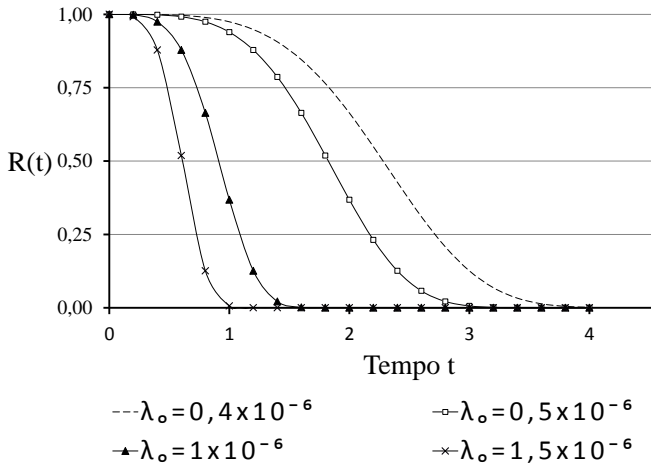


Figura 26 – Influência de  $\lambda_0$  sobre a confiabilidade

#### 4.2.4 Função taxa de falha

De acordo com (DOD, 1981a), o termo *taxa de falha* é definida pela norma MIL-STD 721C como:

“Número total de falhas de um item dentro de uma população, dividido por o número total de unidades empregadas durante um intervalo de tempo sob as condições estabelecidas”

Em outras palavras, a taxa de falha  $\lambda(t)$  representa a velocidade relativa na qual acontece um evento de falha. A tendência dessa velocidade ao longo da vida útil do componente permite ressaltar três regiões, sendo estas: falhas de juventude, falhas aleatórias e falhas por desgaste (BERTSCHE, 2008).

Eventualmente, as falhas de juventude são causadas por defeitos existentes nas etapas de montagem, produção, design etc. Por sua vez, as falhas aleatórias estão representadas por uma taxa de falha relativamente constante, provocadas pela inadequada operação e falhas na manutenção. Finalmente, um incremento na velocidade da falha é percebido como resultado das falhas por desgaste, consequência do envelhecimento irreversível do componente e nesse ponto, que, a falha é iminente.

A função  $\lambda(t)$  é uma relação de duas funções já conhecidas, a função densidade de probabilidade  $f(t)$  e função confiabilidade  $R(t)$ . Desta forma, a partir da Equação 4.8, calcula-se  $\lambda(t)$ .

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.8)$$

No entorno da distribuição Weibull biparamétrica a taxa de falha é, então, a função indicada a seguir.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \beta \lambda_0^\beta t^{\beta-1} \quad (4.9)$$

A função  $\lambda(t)$ , a partir dos valores calculados para  $\beta$ , permite analisar o comportamento das falhas nas regiões do ciclo de vida. Assim, o formato de curva da Figura 27, conhecido como curva da banheira, define para valores de  $\beta < 1$  as falhas de juventude. Por sua vez, quando  $\beta = 1$  a taxa de falha se torna constante, ou seja, onde acontecem as falhas aleatórias e, finalmente, para  $\beta > 1$  a  $\lambda(t)$  aumenta drasticamente identificando as falhas por desgaste.

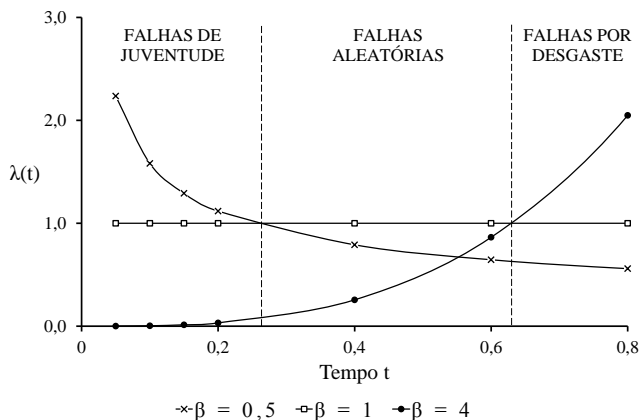


Figura 27 – Curva característica da  $\lambda(t)$  para uma distribuição Weibull

#### 4.3 MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE PARA ANÁLISE DE FALHAS

Estimar a frequência na qual acontecem os eventos de falha fundamenta o planejamento de ações, as quais serão aplicadas ao longo da vida útil do item, por exemplo, planos manutenção. Assim, usa-se como referência o tempo médio até falha (*Mean time to failure* – MTTF), tempo médio entre falhas (*Mean time between failure* – MTBF) e tempo médio até primeira falha

(*Mean time to first failure* – MTTFF). Essas métricas são mostradas a seguir.

### 4.3.1 Tempo médio até falha

O *Mean time to failure* (MTTF) especifica o tempo de funcionamento para itens não reparáveis, cuja expectativa de vida -  $E(t)$  - pode ser calculada como:

$$MTTF = E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (4.10)$$

Já para uma distribuição Weibull biparamétrica, cuja  $f(t)$  é já conhecida, é possível obter a seguinte formulação matemática para o MTTF:

$$MTTF = E(t) = \frac{1}{\lambda_0} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (4.11)$$

Onde

$$\Gamma(r) = (r - 1)!$$

Se  $r$  for inteiro positivo, indicada como a função Gamma.

Nota-se que, quando  $\beta = 1$ , caso particular que representa uma distribuição Exponencial exata, o período médio até falha corresponde:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_0} \quad (4.12)$$

### 4.3.2 Tempo médio entre falhas e tempo médio até primeira falha

O tempo médio entre falhas – *Mean time between failure* (MTBF) – para itens reparáveis especifica a ocorrência do seguinte evento de falha, uma vez já aconteceu a primeira falha. Esse primeiro evento de falha, como métrica de confiabilidade, é chamado de *tempo médio até primeira falha* – MTTFF).

A Figura 28 detalha de forma mais simples as métricas de confiabilidade MTTFF, MTBF e MTTF.

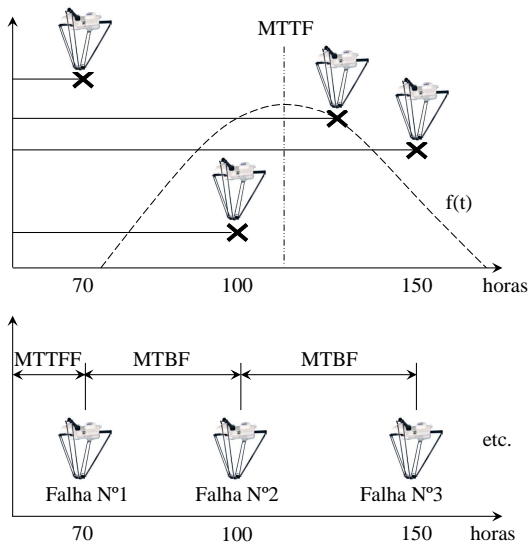


Figura 28 – Métricas de confiabilidade

Os períodos entre os eventos de falha da figura, acima mostrada, estão estabelecidos em horas de uso. Percebe-se, então, que o primeiro evento de falha acontece depois de 70 horas de uso, especificando o *Mean time to first failure* (MTTFF). Por sua vez, os seguintes períodos de falha acontecem aos 100 e 150 horas de uso, ou seja, o MTBF do sistema é de 50 horas.

#### 4.4 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

A distribuição Weibull inclui os parâmetros de forma  $\beta$  e taxa de falha característica  $\lambda_0$  que, sendo desconhecidos inicialmente, devem ser estimados a partir das observações de falha. Para isso, pode-se usar o método dos mínimos quadrados (*Least mean squares* – LMS)

O *Least mean squares* (LMS) é um método gráfico que procura obter a melhor reta que ajusta os períodos de falha, tal como mostra a Figura 29. Eventualmente, é possível estabelecer uma relação linear desses dados, minimizando a somatória quadrática das diferenças entre os valores coletados ( $y_i$ ) e valores estabelecidos pela reta ( $y$ ) (Equação 4.13).

$$\sum (y - y_i)^2 \rightarrow 0 \quad (4.13)$$

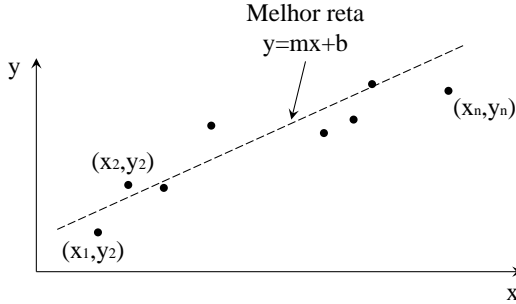


Figura 29 – Melhor reta que ajusta uma amostra de dados no LMS

Basicamente, o procedimento exige linearizar a função  $F(t)$  da distribuição Weibull biparamétrica, calculando um estimador que associa as probabilidades de falha para, finalmente, calcular os valores dos parâmetros  $\beta$  e  $\lambda_0$ . No entanto, linearizar a função  $F(t)$  requer uma sequência de logaritmos, tal como indicado a seguir:

$$F(t) = 1 - e^{-(\lambda_0 t)^\beta}$$

$$1 - F(t) = e^{-(\lambda_0 t)^\beta}$$

O resultado de aplicar logaritmo nos dois lados da equação anterior é:

$$\ln(1 - F(t)) = -(\lambda_0 t)^\beta$$

Fazendo, novamente, uma operação de logaritmos, tem-se:

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln(\lambda_0) + \beta \ln(t)$$

Finalmente, reorganizando os termos, tem-se:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) = \beta \ln(t) + \beta \ln(\lambda_0) \quad (4.14)$$

Os termos da Equação 4.14 representam a formulação de uma reta, do tipo  $y = m x + b$ . Assim, identifica-se cada termo como:

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right)$$



$$m = \beta$$

$$x = \ln(t)$$

$$b = \beta \ln(\lambda_0)$$

Percebe-se que, o parâmetro de forma é igual ao coeficiente angular da reta. Por sua vez, o parâmetro de taxa de falha característica é função do valor de corte no eixo  $Y$ , ou seja, o valor de  $b$ . Igualmente,  $\lambda_0$  é função de  $\beta$ , tal como indicado a seguir.

$$\lambda_0 = e^{-\frac{b}{\beta}} \quad (4.15)$$

No método LMS se faz necessário calcular um *estimador*, o qual parametriza os períodos de falha, transformando esses valores em probabilidades de falha  $F(t)$ . Esse estimador, baseado na ordem das falhas ( $i$ ), é chamado de “*categoria mediana*” e pode ser calculado a partir da seguinte aproximação matemática:

$$RM(t_i) = \frac{i(1 - \ln 2) - (2 \ln 2 - 1) \frac{i-1}{n-1}}{n} \quad (4.16)$$

onde

$RM(t_i)$  = Estimador, categoria mediana.

$n$  = Número total de períodos de falha.

$i$  = Ordem da falha.

Uma vez calculados as duplas de pontos  $(x, y)$  da reta, pode-se estimar os parâmetros  $\lambda_0$  e  $\beta$  a partir das características geométricas da reta gerada.

#### 4.4.1 Influência da ordem das falhas na caracterização dos eventos

O método dos mínimos quadrados, tal e como foi mostrada anteriormente, calcula os parâmetros da distribuição só para itens que falharam. No entanto, devem ser considerados os itens que foram suspensos (caso existam).

O termo *suspensão* se refere aos eventos que não são considerados como falha, mas que, da mesma forma que uma falha, produzem uma queda funcional do item em análise. Esses tipos de eventos são, usualmente, provocados por sensores de condição ou atividades de manutenção, onde no primeiro caso é detectada a condição de falha sem que realmente essa aconteça

e, atividades programadas de manutenção visam mitigar os eventos de falha.

Desta forma, as suspensões devem ser incluídas no cálculo dos parâmetros  $\beta$  e  $\lambda_0$ . Para tal fim é calculado um incremento no número da ordem ( $\Delta i_s$  da Equação 4.17), influenciando o estimador da categoria mediana  $RM(t_i)$ .

$$\Delta i_s = \frac{(N + 1) - i_{i-1}}{1 + nip} \quad (4.17)$$

Onde

$i_{i-1}$  = número de ordem da falha anterior.

$nip$  = número de itens posteriores.

Assim, o novo número de ordem para itens considerados suspensos é:

$$i = i_{i-1} + \Delta i_s \quad (4.18)$$

Por outro lado, o método dos mínimos quadrados é recomendado para períodos até (entre) falha ou até suspensão, mas com predominância dos primeiros.

## 4.5 COMENTÁRIOS

Este capítulo apresentou os modelos estatísticos paramétricos que permitem analisar as probabilidades dos eventos de falha, especificamente, a distribuição Weibull triparamétrica e biparamétrica.

A distribuição Weibull, usada em uma análise de confiabilidade, tem grande abrangência em itens mecânicos, eletrônicos e elétricos. Esse tipo de itens são componentes comuns dentro da estrutura de vários tipos de sistemas, por exemplo, à estrutura de um sistema robótico, de forma que se torna adequada para ser aplicada dentro da metodologia proposta.

De fato, foi detalhada a modelagem matemática para as funções densidade de probabilidade  $f(t)$ , probabilidade de falha  $F(t)$ , confiabilidade  $R(t)$ , taxa de falha  $\lambda(t)$  e tempo médio até falha MTTF, com base na distribuição Weibull biparamétrica, a qual está detalhada pelo parâmetro do forma  $\beta$  e taxa de falha característica  $\lambda_0$ .

Desta forma, foram apresentadas as funções e métricas de confiabilidade que vão caracterizar os componentes do robô paralelo, usando a distribuição Weibull biparamétrica.

Finalmente, a longo da revisão bibliográfica foi mostrado o modelo estrutural do robô, a técnica de diagrama de blocos, a FMEA e a distribui-

ção Weibull biparamétrica, cujos conceitos e princípios são relacionados dentro de um processo de projeto na metodologia proposta nesta dissertação, tal como é indicado no capítulo a seguir.



## 5 PROPOSTA DA METODOLOGIA

Na indústria, a necessidade de robôs confiáveis é evidente. A importância dos robôs em processos automatizados, tais como: manipulação de produtos, procedimentos médicos, manufatura e posicionamento sugerem aos projetistas a avaliação dos princípios de confiabilidade, utilizando técnicas e métodos para aproveitar as informações disponíveis.

De acordo com Pallerosi (2008), na confiabilidade, a obtenção de resultados práticos deve estar auxiliado por um procedimento conciso, com visão gerencial e um caminho a ser percorrido. Nesse contexto, a Metodologia para análise de confiabilidade em robôs (MACRoB) sistematiza o processo para analisar a confiabilidade em sistemas robóticos, visando aplicá-la ao longo das fases de desenvolvimento do sistema. Isso é feito para recomendar ações que orientem o cumprimento das metas de confiabilidade, as quais são estabelecidas ao início do processo de projeto.

A metodologia desenvolvida favorece a redução de tempo no planejamento das atividades relacionadas ao atributo da confiabilidade, isso com base na proposta de técnicas específicas para a análise confiabilística de um robô. Destaca-se, ainda, que algumas considerações foram adotadas para garantir o entendimento da metodologia:

- A metodologia visa demonstrar os procedimentos e técnicas que permitam a inclusão da confiabilidade no projeto de robôs, apoiando a avaliação do leiaute final a fim melhorar ou garantir a sua confiabilidade, a qual deve cumprir a meta estabelecida nos requisitos iniciais.
- As estimativas de probabilidades estão baseadas em modelos matemáticos já definidos, identificados por equações simples e adequadas. Isso em consideração dos múltiplos itens eletrônicos, elétricos e mecânicos que compõem um robô manipulador, os quais podem levar a modelos de confiabilidade muito detalhados e complexos.
- O robô é detalhado para analisar as suas probabilidades de falha, partindo de um *modelo estrutural* de itens proposto neste trabalho, onde cada um desses itens está associado a uma função particular, de forma a estabelecer o *modelo funcional do robô*. Essa caracterização está fundamentada na análise funcional feita na Seção 2.3.
- A análise de confiabilidade, baseada no modelo funcional proposto, visa extrair as informações geradas ao longo do processo de projeto para acoplá-las às funções do robô.

- Itens eletrônicos do subsistema de controle e comunicação podem ser considerados como sistemas não reparáveis, no entanto, outros itens que integram o sistema robótico são, usualmente, itens reparáveis. Assim, se um item reparado for assumido na condição de *tão bom como novo*, é possível caracterizar a confiabilidade a partir do tempo médio até falha (*Mean time to failure –MTTF*) para todos os componentes identificados.

A confiabilidade pode ser analisada em qualquer fase de um processo para desenvolvimento de produtos. Evidentemente, existe um grande número de sistemáticas relacionadas ao processo de projeto. Back et al. (2008) cita as contribuições de diversos autores na influência em várias outras propostas de metodologias de projeto.

O NeDIP<sup>1</sup>, por meio de experiências e pesquisas, desenvolveu o Processo de desenvolvimento integrado de produtos – PRODIP que contribui com uma metodologia mais formal e sistemática para o processo de projeto. A partir da estrutura do PRODIP, propõe-se essa metodologia como referência para ressaltar a relação entre a MACRoB e as fases de desenvolvimento de produtos, caracterizando o atributo da confiabilidade para sistemas robóticos.

O Processo de desenvolvimento integrado de produtos (PRODIP) é uma sistemática detalhada em três macrofases: planejamento, elaboração do projeto do produto e implementação do lote inicial, que por sua vez estão desdobradas em oito fases, tal como mostra a Figura 30.

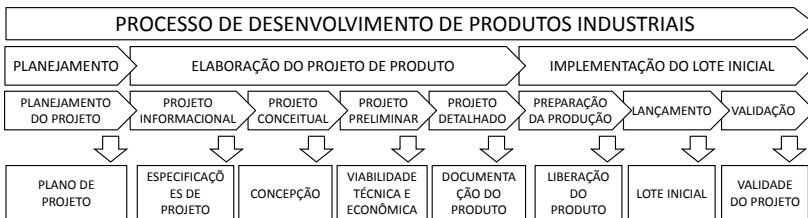


Figura 30 – Macrofases do processo de desenvolvimento integrado de produtos – PRODIP

Fonte: Adaptado de Back et al. (2008, p.70)

A primeira macrofase formaliza a existência do projeto dentro da organização, relacionando planos de marketing, partes envolvidas, políticas de segurança etc. Na segunda macrofase, espera-se obter as especificações do projeto, a concepção do produto, viabilidade técnica e econômica e a sua

<sup>1</sup>Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (Florianópolis, Brasil)

documentação final. Já a terceira macrofase, implementação do lote inicial, envolve a liberação do produto, lote inicial e validade do projeto (BACK et al., 2008).

Como já foi dito, a confiabilidade pode ser considerada ao longo do processo de projeto, mas seus resultados dependem da fase na qual se está analisando esse atributo. Segundo Kagueiama (2012), a abordagem da confiabilidade na macrofase de *planejamento* do PRODIP visa desenvolver um programa adequado para o sistema a ser desenvolvido. Já na segunda macrofase, *elaboração do projeto de produto*, a confiabilidade é abordada dependendo da fase, conforme é detalhado a seguir:

- *Projeto informacional*: Nesta fase são definidas as especificações do projeto. Na perspectiva da confiabilidade, a fase de projeto informacional fornece as informações relevantes para o desenvolvimento de um bom projeto de confiabilidade, por exemplo, condições de operação, levantamento de taxas de falha, caracterização do bom desempenho dos sistema e metas de confiabilidade;
- *Projeto conceitual*: O objetivo desta fase é desenvolver concepções de produto, selecionando um desses ao final da fase. Assim, os conceitos de confiabilidade são incorporados à concepção do produto por meio de princípios de solução;
- *Projeto preliminar*: Aqui visa-se estabelecer o leiaute final para o produto, determinando a sua viabilidade técnica e econômica. No ponto de vista da confiabilidade, a fase de projeto preliminar permite avaliar o produto aplicando técnicas qualitativas (FMEA, CNEA, FTA etc.) e quantitativas (diagrama de blocos, redes Bayesianas entre outras), identificando os possíveis problemas no produto para ser corrigidos, de forma a tornar maior a confiabilidade final;
- *Projeto detalhado*: Nesta fase procura-se finalizar as especificações técnicas, solicitar o investimento requerido e definir a procedimentos de assistência técnica ao produto. Desta forma, as informações advindas das fases prévias permitem estimar a confiabilidade do produto para incorporá-la na documentação técnica;

Para efeito da metodologia proposta neste trabalho, o foco de sua aplicação será dado na macrofase de elaboração do projeto de produto, centrando a sistemática na fase de projeto preliminar (Figura 31), isso em relação que toda a parte informacional e conceitual do processo de projeto já está definida. Também, a fase de validação interage com a MACROB, verificando os resultados de confiabilidade obtidos para do leiaute final durante seu uso.

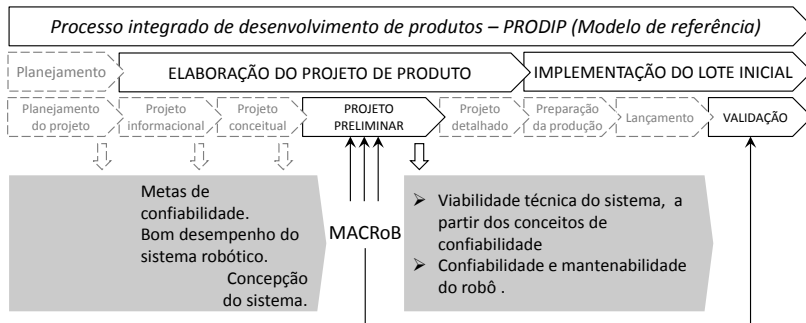


Figura 31 – Relação da MACRoB com o PRODIP

Nota-se, então, que a MACRoB visa desenvolver a análise de confiabilidade em relação às especificações de forma da concepção final do robô, por exemplo, dimensões do espaço de trabalho, potência mecânica utilizada, peso, capacidade de carga, velocidade de operação, tempo de funcionamento, falhas funcionais entre outros, sendo essas informações obtidas na fase preliminar do PRODIP.

A MACRoB é uma ferramenta que propõe usar um modelo funcional (apresentado na Seção 5.1.) para representar o sistema robótico paralelo, aco- plando as informações obtidas no projeto preliminar para suportar decisões de projeto com base na análise de confiabilidade, tais como: reprojeção de itens, uso de redundâncias, atividades de manutenção etc.

A proposição anterior permite detalhar uma sistemática para a abordagem da confiabilidade, cuja aplicação é feita no processo de desenvolvimento para robôs, tal como mostrado na Figura 32.



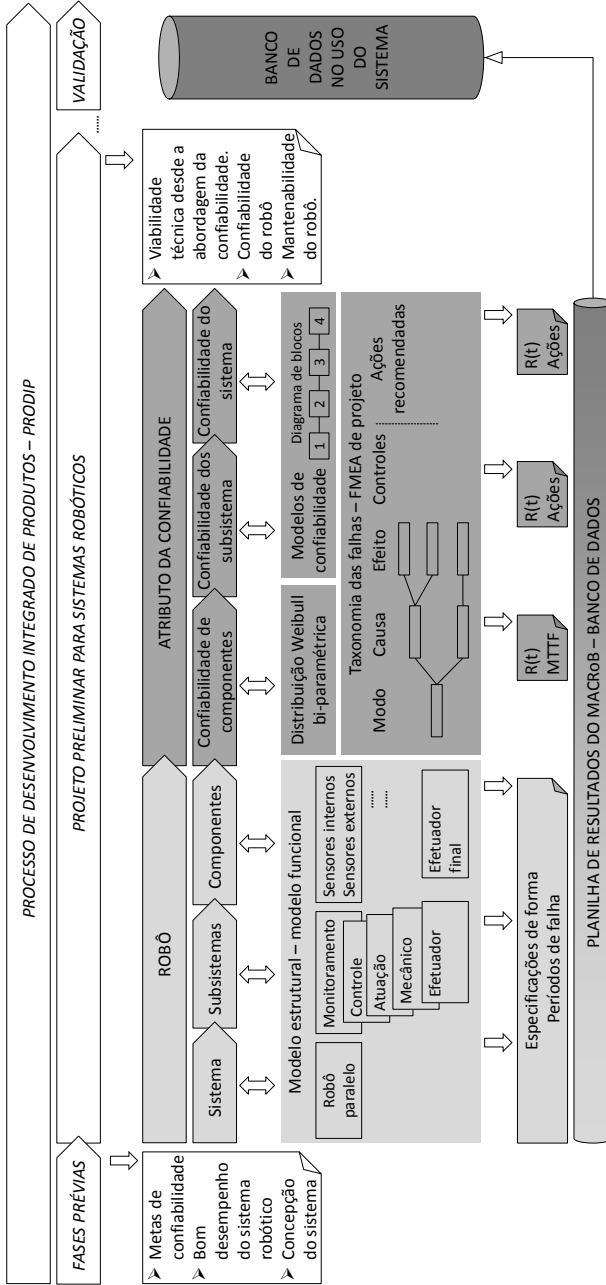


Figura 32 – Metodologia para análise de confiabilidade em robôs

A MACRoB estabelece um robô como um sistema integrado por subsistemas, sendo estes: monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuidor; sobre os quais foram definidos uma série de componentes. Esse desdobramento estrutural de três níveis (sistema, subsistemas e componentes) está associado a um modelo funcional dentro da metodologia.

As informações fornecidas ao longo da fase preliminar permitem detalhar o modelo funcional proposto, identificando as principais especificações de forma nos componentes, tais como: condições de operação, relação com itens existentes etc. Igualmente, os períodos de falha são fornecidos, os quais são advindos de testes de laboratório, consulta com especialistas, equipamentos similares etc. Assim, as variáveis com influência direta sobre a confiabilidade começam a ser já determinadas.

De fato, a partir das informações mencionadas, é possível aplicar técnicas adequadas para analisar a confiabilidade do robô, avaliando o leiaute final do sistema a partir da suas falhas.

Adicionalmente, os períodos de falha são modelados por meio da distribuição Weibull biparamétrica, a qual permite calcular as confiabilidades individuais dos componentes do robô e seu tempo médio até falha (MTTF), baseando essas estimativas nos parâmetros de forma ( $\beta$ ) e taxa de falha característica ( $\lambda_0$ ).

As confiabilidades dos componentes são, necessariamente, complementadas com as confiabilidades nos subsistemas e sistema, usando configurações na forma de diagrama de blocos (*Reliability block diagram* –RBD), como mostrou a Figura 32. A relação na lógica das falhas entre os diversos blocos está baseada no modelo funcional proposto neste trabalho.

Para ter condições de analisar, com suficiente fundamento, o atributo da confiabilidade, não somente é necessário os modelos matemáticos na análise quantitativa, também é preciso aplicar técnicas qualitativas de confiabilidade.

Com base nessa necessidade, analisa-se os modos de falha, causas e efeitos usando a técnica FMEA. Está técnica, aplicada na fase de projeto preliminar, prioriza as ações de melhora no projeto, a fim de cumprir com os requisitos de confiabilidade estabelecidos no planejamento projeto.

Nesse contexto, a metodologia considera os resultados quantitativos para apoiar, conjuntamente, a técnica FMEA na procura de estruturar as melhores ações recomendadas.

Ao longo da descrição apresentada para a estrutura da MACRoB, mostrada já na Figura 32, pode-se identificar os resultados a serem obtidos da sua aplicação:

- Especificações de forma nos itens do modelo estrutural;

- Confiabilidade dos componentes e MTTF, a partir do parâmetro de forma ( $\beta$ ) e taxa de falha ( $\lambda$ );
- Confiabilidade dos subsistemas;
- Confiabilidade total do sistema;
- Ações recomendadas para serem executadas;

Com objetivo de coletar as informações fornecidas ao longo da aplicação da MACRoB, foi estabelecida uma planilha de resultados (Quadro 2), a qual visa facilitar a apresentação de ditas informações e servir como banco de dados para projetos robóticos futuros. Desse modo, a planilha permite verificar os valores preenchidos na fase do projeto preliminar com os obtidos na fase de validação do PRODIP.

Conforme foi apresentado na Figura 32, a estrutura da MACRoB define dois processos principais: *robô* e *atributo da confiabilidade*. Assim, no entorno do primeiro processo são apresentadas três fases: *sistema subsistemas* e *componentes*, entretanto, o segundo processo estima em mais três fases as confiabilidades respectivas, quer dizer, *confiabilidade do sistema*, *confiabilidade de subsistemas* e *confiabilidade de componentes*. Cada processo e fase serão detalhados na sequência deste capítulo.

Quadro 2 – Planilha de resultados da MACRoB

ROBÓ		ATRIBUTO DA CONFIABILIDADE			
Item	Descrição	R(t)	Curva	EQUIPE DE PROJETO	
Robô					
1. Monitoramento	...	...	...	...	...
2. Controle	...	...	...	...	...
...					
1.1 Sensores internos	...	...	...	$\beta$	Ações recomendadas
1.2 Sensores externos	...	...	...	$\lambda$	Reprojeto
...				$\lambda_{0_{1,1}}$	Manutenção cada T horas
				$\lambda_{0_{1,2}}$	...
				...	...
				$\beta_{1,1}$	$MTT F_{1,1}$
				$\beta_{1,2}$	$MTT F_{1,2}$
				...	...

## 5.1 ROBÔ

A abordagem do *robô* na metodologia proposta parte de uma representação do sistema vinculada ao mundo real, contemplando as funções requeridas para seu funcionamento e relacionando-as a subsistemas e componentes definidos durante o projeto preliminar do PRODIP (modelo de referência neste trabalho).

Assim, o robô foi desdobrado em subsistemas e componentes para torná-lo um sistema mais simples na análise de confiabilidade (Figura 33). O desdobramento estrutural proposto está vinculado a um modelo funcional, relacionando ao sistema uma *função global*, por sua vez, os subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuador foram definidos por uma sub função, chamada de *função parcial* e, finalmente, os componentes identificados estão definidos pelas *funções elementares* do sistema.

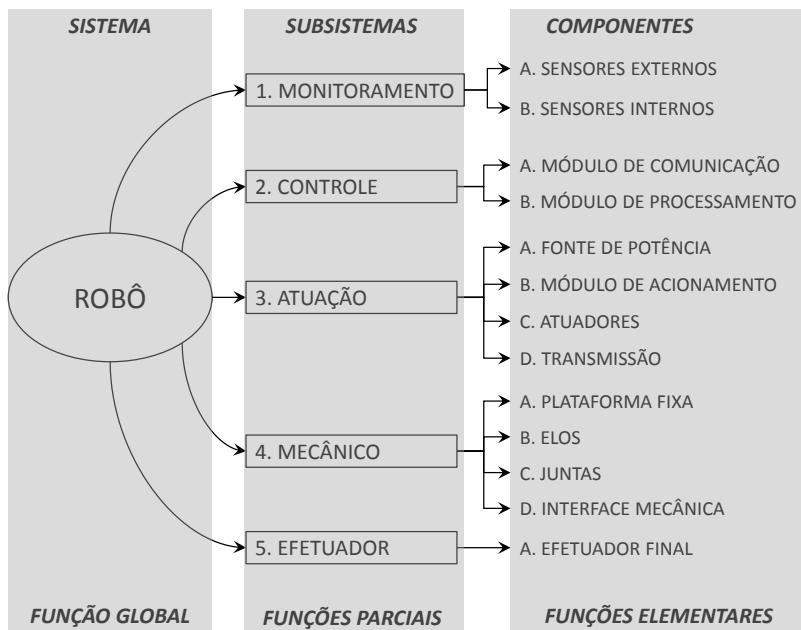


Figura 33 – Desdobramento estrutural do robô associado a um modelo funcional

As funções de cada item da estrutura do robô foram definidas na Seção 2.3. No entanto, são referenciadas novamente neste capítulo, conside-

rando que é informação importante e relevante para o entendimento da metodologia proposta.

### 5.1.1 Sistema

Um robô é um sistema técnico que integra itens mecânicos, elétricos, eletrônicos, pneumáticos e/ou hidráulicos para a execução de uma tarefa final. Assim, a partir da representação física, foi definida a seguinte *função global* para um sistema robótico:

Um robô permite gerar trajetórias programadas a partir de um controlador para, eventualmente, serem executadas dentro de um espaço de trabalho cujas dimensões estão limitadas pela configuração da estrutura mecânica. Assim, ao longo das trajetórias é posicionada uma ferramenta final, disposta para executar a tarefa específica do robô.

A partir dessa função global, é possível já vincular as especificações do sistema. Desta forma, a MACRoB propõe associar uma descrição para o sistema, a ser preenchida na planilha de resultados (Figura 34). Esse detalhamento deve ser claro e conciso, para que seja compreendido por outros projetistas.

ROBÔ						
ITEM	Descrição	R(t) Curva R(t)	EQUIPE DE PROJETO			
Robô manipulador	<b>Descrição</b>		.....			
Subsistema 1			.....			
Subsistema 2			Parâmetro de forma [β]	Taxa de falha [λ]	MTTF	Ações recomendadas [FMEA]
Subsistema n						
Componente 1						
Componente 2						
Componente n						

Figura 34 – Preenchimento da descrição do sistema na planilha de resultados

No entorno da confiabilidade, a MACRoB propõe estimar a probabilidade de falha do sistema, visando analisar o cumprimento das metas propostas durante o projeto informacional. Com base na comparação feita, ações a serem executadas podem ser consideradas, isso porque o sistema ainda pode sofrer modificações.

### 5.1.2 Subsistemas

O entendimento do robô se torna mais simples quando existe uma arquitetura clara do sistema. Nota-se que, foi apresentado o sistema a partir da sua função global. Assim, o entendimento do robô, nesta seção, está orientado nos subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuator.

Considera-se, então, que os cinco subsistemas estão projetados para executar uma função parcial dentro do sistema robótico. Essas funções estão detalhadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Funções parciais dos subsistemas do robô

Subsistema	Função parcial
Monitoramento	Fornecer as variáveis operacionais do robô, garantindo, a partir dessas, a adequada posição e velocidade na trajetória desejada.
Controle	Processar as variáveis operacionais para modificar o comportamento do robô, executando rotinas pré-programadas para transferir as informações aos itens periféricos do sistema robótico.
Atuação	Fornecer energia mecânica de forma controlada para gerar os movimentos do robô.
Mecânico	Transmitir a potência mecânica ao subsistema efetuator, usando a cadeia cinemática para posicionar a estrutura ao longo de uma trajetória de posição.
Efetuator	Interagir de forma direta com o entorno de trabalho do manipulador, realizando a tarefa final estabelecida no contexto de aplicação do robô.

As funções parciais mostradas para os diferentes subsistemas orientam o caminho a ser percorrido na procura pelo detalhamento de sua des-

crição, cujas informações deverão ser preenchidas na planilha de resultados (Figura 35). Existem, portanto, especificações de forma a serem identificadas, tais como:

- Mecanismos para obtenção das variáveis operacionais no subsistema de monitoramento, ou seja, especificação dos tipos de sensores ou sistemas de visão a serem usados;
- Características das técnicas de programação no subsistema de controle, identificando o *hardware* necessário para sua aplicação;
- Tipo de energia utilizada no subsistema de atuação, ou seja, uso de tecnologia hidráulica, pneumática ou elétrica;
- Dimensões do espaço de trabalho gerado pela configuração da cadeia cinemática do subsistema mecânico;
- Tipo de equipamento presente no subsistema efetuator, especificando a sua tarefa final, por exemplo, manipulação, soldagem, pintura etc;

ROBÔ					
Item	Descrição	R(t)	Curva R(t)	EQUIPE DE PROJETO	
Robô manipulador	Descrição			Responsável do projeto	
Monitoramento	<b>Descrição A</b>			.....	
Controle	<b>Descrição B</b>			.....	
Atuação	<b>Descrição C</b>			.....	
Mecânico	<b>Descrição D</b>				
Efetuator	<b>Descrição E</b>			Parâmetro de forma [β]	Taxa de falha [λ]
Componente 1				MTTF	Ações recomendadas [FMEA]
Componente 2					
Componente n					

Figura 35 – Preenchimento da descrição dos subsistemas na planilha de resultados

A abordagem da confiabilidade nos subsistemas visa calcular as probabilidades de falha individuais. Isso é feito para estabelecer o impacto de cada subsistema sobre a confiabilidade total do robô.

Identificar subsistemas críticos, ou seja, aqueles com menor confiabilidade, permite encaminhar decisões relevantes de projeto, por exemplo, recomendar maiores investimentos econômicos para pesquisas sobre novas tecnologias, técnicas para tolerância de falhas mais eficazes etc.



As informações obtidas nesta fase da metodologia levam a uma análise de confiabilidade aceitável, mas nem sempre suficiente. Por isso, um nível básico de componentes é estabelecido, considerando que a partir desses são obtidos resultados abrangentes no atributo da confiabilidade para um robô.

### 5.1.3 Componentes

O robô foi detalhado em diversos componentes integrados nos cinco subsistemas, tal qual já foram apresentado na Figura 33. Desse modo, os sensores internos e sensores externos fazem parte do subsistema de monitoramento; o módulo de comunicação e o módulo de processamento integram o subsistema de controle; a fonte de potência, módulo de acionamento, atuadores e transmissão compõem o subsistema de atuação; os elos, juntas, plataforma fixa e interface mecânica, estão incorporados no subsistema mecânico e; finalmente, o efetuator final é um único item que está especificado para o subsistema efetuator.

Esses componentes estão, necessariamente, representados por uma função elementar. Desta forma, as funções são definidas como mostra o seguinte Quadro.

Quadro 4 – Funções elementares dos componentes do robô

Subsistema	Componente	Função elementar
Monitoramento	Sensores externos	Fornecer as variáveis do entorno de trabalho, de modo a assegurar a correta iteração entre o extremo do robô e superfície de contato, relacionado à aplicação do robô.
	Sensores internos	Proporcionar a informação do estado operacional do robô, fundamentalmente os parâmetros de posição, velocidade e torque nas juntas.

(continua na próxima página)

Quadro 4- Funções elementares dos componentes do robô

(continuação)

Subsistema	Componente	Função elementar
Controle	Módulo de comunicação	Transferir de forma cíclica os parâmetros do estado operacional e variáveis do entorno de trabalho, parâmetros gerados nos componentes periféricos do robô e processados no hardware de controle.
	Módulo de processamento	Executar as rotinas pré programadas usando as variáveis operacionais, cujas informações obtidas permitem gerenciar o estado operacional do robô.
Atuação	Fonte de potência	Fornecer energia.
	Módulo de acionamento	Ativar os atuadores.
	Atuadores	Gerar o movimento do robô.
	Transmissão	Transferir a potência mecânica dos atuadores às juntas.
Mecânico	Plataforma fixa	Fixar a estrutura mecânica do manipulador ao sistemas inercial de referência.
	Juntas	Permitir o movimento relativo entre dois elos.
	Elos	Configurar, a partir do acoplamento com as juntas, as pernas do robô para conectar a plataforma fixa e interface mecânica.

(continua na próxima página)

Quadro 4- Funções elementares dos componentes do robô

(continuação)		
Subsistema	Componente	Função elementar
	Interface mecânica	Conectar a estrutura mecânica com uma ferramenta final, posicionando-a dentro do espaço de trabalho definido para o robô.
Efetuator	Efetuator final	Executar a tarefa final do robô no seu contexto de aplicação.

Eventualmente, as funções elementares fundamentam a análise de confiabilidade fornecendo dois tipos de informações – a serem preenchidas na planilha de resultados da Figura 36 –, sendo estas:

- Especificações de forma, por exemplo, mecanismos físicos para aquisição de dados nos sensores, condições máximas de temperatura e umidade aceitáveis nos itens; tensão-pressão mínima a ser fornecida pela fonte de potência com base nos requisitos do subsistema de atuação; tensão-pressão de trabalho dos atuadores etc.;
- Períodos de falha advindos de consulta com especialistas, interpolação com equipamentos similares, banco de dados etc.;

Os componentes, na abordagem da confiabilidade, estão caracterizados pelas probabilidades associadas aos eventos de falha e a forma como estas falhas acontecem. Nesta última, MACRoB aplica a técnica FMEA em uma análise conjunta com as probabilidades, levando a recomendar, na fase de projeto preliminar, ações que visem o reprojeto do componentes, uso de itens redundantes, aplicação de sensores de condição, estabelecimento de atividades de manutenção etc.

## 5.2 ATRIBUTO DA CONFIABILIDADE

A metodologia proposta neste trabalho, através do atributo da confiabilidade, visa desenvolver motivação para planejar sistemas robóticos de robustez, suportando as metas de confiabilidade que foram estabelecidas no projeto informacional.

Para que isso possa ocorrer, a MACRoB (estrutura mostrada na Figura 32) está apoiada por procedimentos, técnicas e ferramentas que são apli-

ROBÔ							
SISTEMA	Descrição	R(t)	Curva R(t)	EQUIPE DE PROJETO			
Robô manipulador	Descrição			Responsável do projeto			
Monitoramento	Descrição			1. ....			
Controle	Descrição			2. ....			
Atuação	Descrição			3. ....			
Mecânico	Descrição			Parâmetro de forma [β]	Taxa de falha [λ]	MTTF	Ações recomendadas [FMEA]
Efetuator	Descrição						
Sensores externos	Descrição 1						
Sensores internos	Descrição 2						
Módulo de processamento	Descrição 3						
Módulo de comunicação	Descrição 4						
Fonte de potência	Descrição 5						
Módulo de acionamento	Descrição 6						
Atuadores	Descrição 7						
Transmissão	Descrição 8						
Plataforma fixa	Descrição 9						
Elos	Descrição 10						
Juntas	Descrição 11						
Interface mecânica	Descrição 12						
Efetuator final	Descrição 13						

Figura 36 – Preenchimento da descrição dos componentes na planilha de resultados

cados sobre o modelo estrutural proposto do robô, ajudando na tomada de decisões ao longo do projeto preliminar.

Assim, a MACRoB usa distribuições de probabilidade na fase de *confiabilidade de componentes* para, a partir delas, inferir sobre o comportamento das probabilidades de falha ao longo do ciclo de vida dos componentes.

O sistema robótico é representado, na abordagem da confiabilidade, na forma de diagrama de blocos, essa representação é analisada nas fases de *confiabilidade de subsistemas* e *confiabilidade do sistema*. Além disso, a MACRoB aplica a técnica FMEA para obter informações sobre os modos de falha, causas e efeito da falha que podem se apresentar em um sistema robótico.

### 5.2.1 Confiabilidade de componentes

Como já foi mencionado, parte dos resultados do processo de *robô* são os períodos de falha coletados para cada componente. Da mesma forma, foi especificado que, neste nível do modelo estrutural, inicia-se a análise de confiabilidade durante a fase de projeto preliminar.

Nesse contexto, ao usar a *distribuição Weibull biparamétrica* (Equa-

ção 5.1), analisa-se a confiabilidade dos componentes do robô caracterizando o parâmetro de forma  $\beta$  e taxa de falha característica  $\lambda_0$ .

$$R(t) = e^{-(\lambda_0 t)^\beta} \quad (5.1)$$

O cálculo dos parâmetros  $\beta$  e  $\lambda_0$  é feito a partir dos períodos de falha coletados, usando o método LMS para orientar esse processo a ser aplicado em cada componente. Para tal fim, esta metodologia propõe seguir a sequência de atividades mostrada na Figura 37.

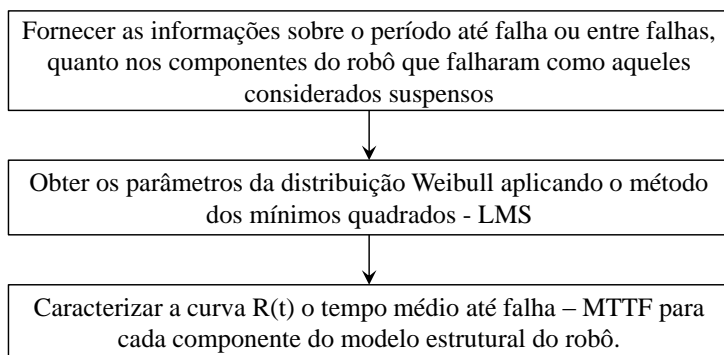


Figura 37 – Passos na análise confiabilística dos componentes identificados no modelo estrutural do robô

Os resultados obtidos deverão ser preenchidos na planilha de resultados, mostrada já no Quadro 2, quer dizer, deve-se fornecer os valores no parâmetro de forma ( $\beta$ ), taxa de falha ( $\lambda$ ), tempo médio até falha MTTF e comportamento da função confiabilidade  $R(t)$ .

Os valores calculados para  $\beta$  e  $\lambda$  permitem inferir algumas características do componente em análise, por exemplo, o parâmetro de forma é uma variável que caracteriza o nível de tecnologia agregado ao item em análise, então, quanto menor  $\beta$  maior será a dispersão dos períodos de falha, evidenciando falta de controle nos causas das falhas identificadas.

A taxa de falha, como o próprio nome sugere, indica a quantidade média de falhas de um item em relação à unidade de uso, porém, uma melhora na qualidade do componente do robô tende a diminuir o índice  $\lambda$ .

O ciclo de vida do componente está relacionado ao tempo médio entre falhas MTTF calculado. Essa métrica de confiabilidade é um valor médio dos períodos de falha, igualmente caracterizada pela dispersão desses períodos. Assim, procura-se projetar componentes robóticos com ciclos de vida adequados aos requerimentos do projeto.

A função  $R(t)$  mostra o comportamento da confiabilidade ao longo do ciclo de vida. Uma análise comparativa das funções  $R(t)$ , entre os componentes do robô, permite identificar o impacto das confiabilidades individuais nas probabilidades dos subsistemas.

Eventualmente, a confiabilidade  $R(t)$  é a função principal a ser estabelecida na MACRoB. Por outro lado, as funções densidade de probabilidade  $f(t)$ , probabilidade de falha  $F(t)$  e taxa de falha  $\lambda(t)$  podem complementar a análise confiabilística dos componentes do robô, caso sejam necessárias na apresentação dos resultados.

É provável, que uma arquitetura mais profunda seja requerida no nível básico do modelo estrutural proposto para o robô, principalmente quando se trata da análise de confiabilidade de itens eletrônicos ou elétricos. Por exemplo, podem ser usados motores elétricos AC como *atuadores* no subsistema de atuação, incorporando sensores de condição térmica para monitoramento de sua temperatura. Nesse caso, deve-se considerar um desdobramento adicional na estrutura do componente “atuador”, aplicando a configuração de confiabilidade para itens com sensor de condição visto na revisão bibliográfica desta dissertação.

Para estabelecer uma arquitetura adicional, quando for apropriado, é necessário contar com a orientação adequada. Sendo assim, propõem-se, para tal fim, as seguintes atividades:

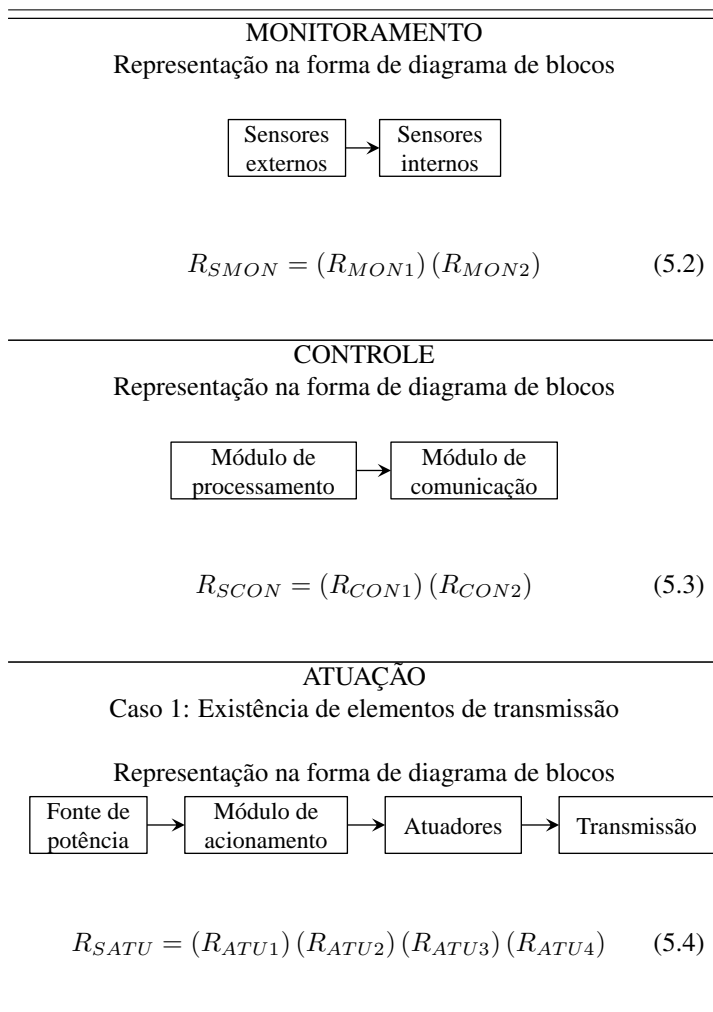
1. Desdobrar o componente em mais um nível estrutural, identificando os itens que compõem esse novo *componente equivalente*;
2. Relacionar à estrutura estabelecida as funções respectivas para cada item adicional identificado;
3. Determinar o modelo de confiabilidade do componente equivalente, usando o recurso de diagrama de blocos RBD para representar a lógica de falhas dos itens identificados;
4. Calcular as confiabilidades individuais dos itens seguindo os passos da Figura 37;
5. Calcular a confiabilidade do componente equivalente;

Finalmente, ao longo desta fase da MACRoB, ou seja, confiabilidade de componentes, são estimadas as confiabilidades individuais, necessárias para calcular as probabilidades de falha dos subsistemas no modelo estrutural do robô.

## 5.2.2 Confiabilidade dos subsistemas

A análise de confiabilidade nos cinco subsistemas do robô é feita a partir da técnica de diagrama de blocos RBD, propondo dentro desta metodologia as suas representações e formulação matemática correspondente (modelo de confiabilidade), tal como indicado no Quadro 5.

Quadro 5 – Modelos de confiabilidade para os subsistemas do robô

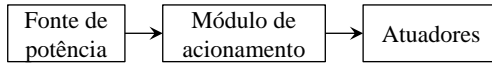


(continua na próxima página)

Quadro 5- Modelos de confiabilidade para os subsistemas do robô

(continuação)

Caso 2: Acoplamento direto  
Representação na forma de diagrama de blocos

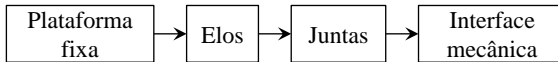


$$R_{SATU} = (R_{ATU1}) (R_{ATU2}) (R_{ATU3}) \quad (5.5)$$

---

MECÂNICO

Representação na forma de diagrama de blocos

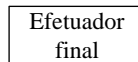


$$R_{SMEC} = (R_{MEC1}) (R_{MEC2}) (R_{MEC3}) (R_{MEC4}) \quad (5.6)$$

---

EFETUADOR

Representação na forma de diagrama de blocos



$$R_{SEFE} = (R_{EFE1}) \quad (5.7)$$


---

Onde

$R_{MON1}$  = Confiabilidade dos sensores externos;

$R_{MON2}$  = Confiabilidade dos sensores internos;



$R_{CON1}$  = Confiabilidade do módulo de processamento;  
 $R_{CON2}$  = Confiabilidade do módulo de comunicação;  
 $R_{ATU1}$  = Confiabilidade da fonte de potência;  
 $R_{ATU2}$  = Confiabilidade do módulo de acionamento;  
 $R_{ATU3}$  = Confiabilidade dos atuadores;  
 $R_{ATU4}$  = Confiabilidade da transmissão;  
 $R_{MEC1}$  = Confiabilidade da plataforma fixa;  
 $R_{MEC2}$  = Confiabilidade dos elos;  
 $R_{MEC3}$  = Confiabilidade das juntas;  
 $R_{MEC4}$  = Confiabilidade da interface mecânica;  
 $R_{EFE1}$  = Confiabilidade do efetuator final.

O Quadro 5 relaciona, individualmente, em série, cada subsistema. Essa condição de confiabilidade está indicando que um evento de falha, em um componente qualquer, vai deixar o subsistema respectivo em estado, igualmente, de falha.

Na configuração em série para cada subsistema existe, implicitamente, a possibilidade de considerar redundâncias em componentes particulares ou integração de sensores de condição. Destaca-se, então, que a representação na forma de diagrama de blocos proposta para o robô, é aberta à inclusão das considerações anteriormente mencionadas.

Por outro lado, o subsistema de atuação pode ser configurado de duas formas, dependendo do tipo de acoplamento entre os atuadores e o subsistema mecânico, tal como está indicado no Quadro 5. No caso 1, especificam-se elementos de transmissão usados para fazer o acoplamento entre os atuadores e as juntas. Já, no caso 2, indica-se um acoplamento direto entre os itens já mencionados.

A partir do contexto anterior, o subsistema de atuação deve estar identificado por uma única configuração, seja com elementos de transmissão ou acoplamento direto.

As probabilidades de falha obtidas dos modelos de confiabilidade de cada subsistema são coletados na planilha de resultados, preenchendo as colunas de *tempo* e  $R(t)$  para, a partir de uma figura, mostrar o seu comportamento respectivo ao longo do ciclo de vida. Essa figura deve ser detalhada, igualmente, na coluna *Curva  $R(t)$*  da planilha de resultados proposta nesta metodologia.

### 5.2.3 Confiabilidade do sistema

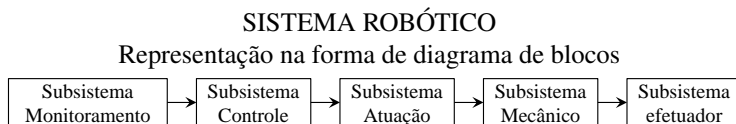
A operação do robô é normal quando todos os subsistemas estão funcionando corretamente. Assim, as condições do estado operacional (posição, velocidade, torque etc.) e do entorno de trabalho (variáveis a serem medidas no contexto de aplicação) devem ser fornecidas pelo subsistema de monitoramento ao subsistema de controle, permitindo o processamento desses sinais para interagir no acionamento do robô.

O fornecimento de energia mecânica controlada, por parte do subsistema de atuação às juntas, permite posicionar a estrutura mecânica, basicamente, a sua interface mecânica. Desta forma, o subsistema efetuator pode executar a tarefa final, por exemplo, atividades de solda, manipulação de alimentos etc.

Em vista dessa lógica de funcionamento, a ocorrência de uma falha em qualquer dos subsistemas deixa o robô funcionalmente fora de serviço.

A anterior relação nas falhas é facilmente representada por um diagrama de blocos, configurando os cinco subsistemas em série e gerando seu respectivo modelo de confiabilidade, tal como mostra o Quadro 6.

Quadro 6 – Modelo de confiabilidade para o sistema robótico



$$R(t)_{sist} = (R_{smon}) (R_{scon}) (R_{satu}) (R_{smec}) (R_{sefe}) \quad (5.8)$$

Onde

$R(t)_{sist}$  = Confiabilidade do sistema robótico;

$R_{smon}$  = Confiabilidade do subsistema de monitoramento;

$R_{scon}$  = Confiabilidade do subsistema de controle;

$R_{satu}$  = Confiabilidade do subsistema de atuação;

$R_{smec}$  = Confiabilidade do subsistema mecânico;

$R_{sefe}$  = Confiabilidade do subsistema efetuator;

Cada uma das confiabilidades requeridas já foram calculadas na fase anterior da MACRoB. Essas probabilidades, então, são utilizadas na Equação 5.8 para calcular a confiabilidade total do sistema robótico.

Ao longo do processo do *atributo da confiabilidade*, várias inferências baseadas nos parâmetros de forma, taxa de falha, período médio entre falhas e confiabilidade podem ser estabelecidas para cada item no modelo estrutural do robô. Essa análise quantitativa de confiabilidade é complementada com a aplicação da técnica FMEA, como foi estruturado na Figura 32.

Com base na aplicação da técnica FMEA, são detalhados os modos de falha funcionais, causas e efeitos no robô, encaminhando ações recomendadas para evitar ou controlar as causas identificadas em cada item do modelo funcional ou mitigar os efeitos. Tais ações podem, por exemplo, ser do tipo: reprojetar itens, atividades de manutenção ou sistemas redundantes, de forma a aumentar ou manter a confiabilidade do robô.

Finalmente, a confiabilidade total do sistema e as ações recomendadas, advindas da técnica FMEA, devem ser preenchidas na planilha de resultados nas suas colunas correspondentes.

### 5.3 COMENTÁRIOS

Este capítulo apresentou a metodologia para análise de confiabilidade em robôs (MACRoB), objetivo principal desta dissertação.

A MACRoB se fundamenta, basicamente, no modelo estrutural proposto para o robô, a técnica de diagrama de blocos (RBD), a análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA e a distribuição Weibull biparamétrica). Esse conjunto de técnicas, integradas na metodologia proposta, auxiliam aos projetistas à inclusão do atributo da confiabilidade nas fases de desenvolvimento do robô.

Assim, a partir dos processos de “robô” e “atributo da confiabilidade”, são obtidas as confiabilidades de cada componente e subsistema, junto com a confiabilidade total do manipulador. Além disso, os eventos de falha do robô são identificados com base na técnica FMEA. Desta forma, uma análise conjunta dos resultados orienta, eventualmente, um processo de decisão no qual se procura garantir a confiabilidade do robô.

Finalmente, o capítulo a seguir mostra uma aplicação da metodologia proposta, isso para demonstrar a praticidade dos resultados obtidos da MACRoB



## 6 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia proposta no Capítulo 5 vincula a confiabilidade ao processo de projeto, especificamente quando se tratando do desenvolvimento de sistemas robóticos. Um robô, dentro do contexto da MACRoB, está relacionado a um modelo estrutural de subsistemas e componentes, especificando para cada item uma função particular a fim de relacionar informações advindas das fases do processo de desenvolvimento.

De fato, com base na estrutura do robô são aplicadas as técnicas de confiabilidade FMEA, diagrama de blocos e distribuições de probabilidade. Assim, a integração dessas técnicas e seus resultados encaminham a tomada de decisões, as quais se tornam ações para garantir ou melhorar a confiabilidade do robô.

Para avaliar o uso da metodologia proposta, foi feita uma aplicação em um sistema robótico de estrutura paralela, visando responder as seguintes perguntas:

- O modelo estrutural proposto para um sistema robótico responde às especificidades de uma representação física?
- Os modelos de confiabilidade definidos dentro da metodologia se tornam adequados para serem aplicados em robôs?
- Os resultados a serem obtidos da MACRoB fornecem informações práticas ao longo do processo de projeto para robôs?

Assim, o objetivo deste capítulo é evidenciar a aplicabilidade da metodologia, mas considera-se apropriado ressaltar algumas limitações encontradas ao longo de seu desenvolvimento, sendo estas:

- A aplicação da metodologia é feita sobre um sistema robótico paralelo, usando como referência um robô já existente, ou seja, deve-se supor que as informações detalhadas no modelo estrutural foram obtidas ao longo do desenvolvimento desse sistema;
- O contexto de aplicação do robô paralelo é projetado para especificar as características da célula de trabalho do robô;
- Os períodos de falha aqui usados, e as respectivas distribuições de probabilidade, não foram obtidos experimentalmente, mas foram estipulados aleatoriamente a fim de ilustrar os resultados a serem obtidos da MACRoB;

- É possível fazer discussões mais amplas sobre o detalhamento do modelo estrutural para o sistema robótico paralelo, mas no contexto das informações disponíveis, consideram-se as descrições feitas como suficientes para abranger o atributo da confiabilidade no sistema em análise.

Com base nas questões e limitações mencionadas, a MACRoB foi aplicada em um robô paralelo, baseando-se nas informações de um sistema fabricado pela ABB Group. Esse sistema robótico pode ser projetado para executar tarefas repetitivas com rapidez e exatidão, vantagens aproveitadas para solucionar diversos problemas na indústria, por exemplo, baixos níveis de produtividade por inadequada velocidade na embalagem dos produtos, cujo processo é típico na indústria de alimentos.

Eventualmente, uma linha de embalagem automatizada pode ser tão complexa quanto às exigências do processo produtivo. No entanto, uma estrutura básica de uma linha de embalagem (Figura 38) para está composta por robôs paralelos (identificados por [A] na Figura 38), bandas transportadoras [B], sistemas de detecção [C], sistemas de controle redes de comunicação [D] e, necessariamente, pacotes de *software* [E].

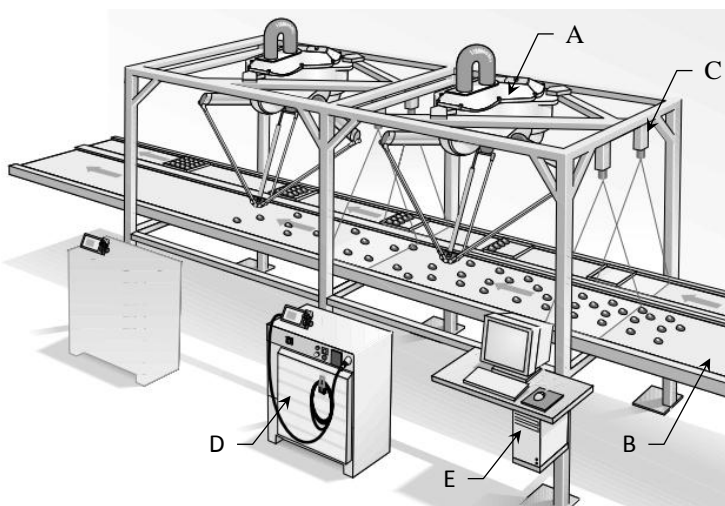


Figura 38 – Estrutura básica de uma linha automatizada para embalagem de produtos

Fonte: Brantmark & Hemmingson (2001, p.16)

Destaca-se, então, que neste capítulo se contextualiza a projeção de um sistema robótico, chamado ao longo deste capítulo como *Robô paralelo*

*equivalente* (RPE), para executar tarefas de embalagem de alimentos. As informações apresentadas estão baseadas nas informações do sistema fabricado pela ABB, mas sem representar especificamente esse sistema, porém, usa-se o robô paralelo equivalente como sistema na validação da metodologia proposta.

Desta forma, os resultados dos processos de *robô* e *atributo da confiabilidade*, definidos na MACRoB, são mostrados a seguir.

## 6.1 ROBÔ PARALELO EQUIVALENTE (RPE)

A aplicação da metodologia proposta supõe que as fases de planejamento, projeto informacional e conceitual do PRODIP já foram executadas, obtendo os planos do projeto, as especificações e a concepção do produto respectivamente. Desta forma, as contribuições da MACRoB estão centradas na fase de projeto preliminar, avaliando a concepção final do sistema na abordagem da confiabilidade.

Para ser feita essa avaliação, deve-se especificar a meta de confiabilidade proposta, a qual é definida ao longo da projeto informacional. Para ilustrar adequadamente a aplicação da MACRoB, estabeleceu-se para o robô paralelo equivalente uma meta de 90% de confiabilidade para 600 horas de uso. Esse tempo significa 75 dias de operação, trabalhando 8 horas/dias, o que corresponde a 3,12 meses.

Alem da meta de confiabilidade, mencionada acima, deve-se projetar um robô paralelo para responder aos requisitos de velocidade e precisão na manipulação de alimentos. Portanto, a concepção do sistema, advinda do projeto conceitual, está baseada na Figura 39, onde seus componentes preliminares estão especificados na sequência do gráfico.

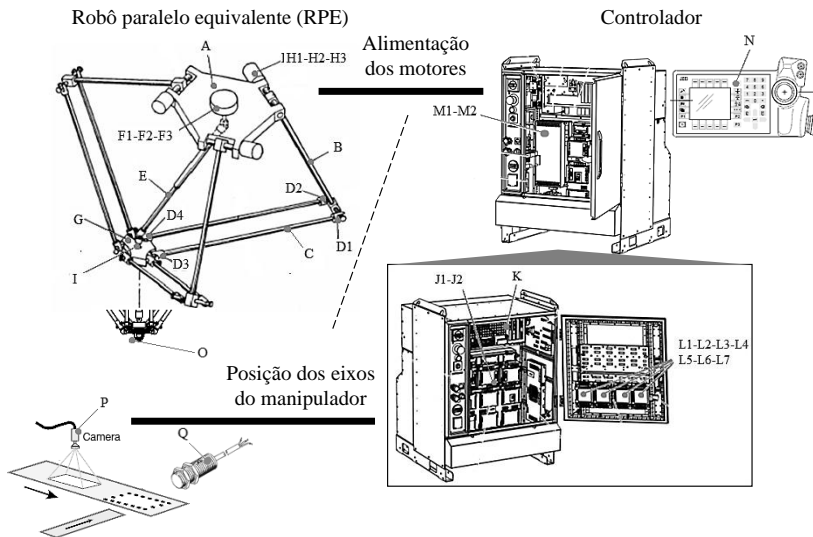


Figura 39 – Sistema robótico paralelo equivalente

Fonte: adaptado de ABB Group (2000) e ABB Group (entre 2004 e 2010)

Onde

- |                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| A. Plataforma fixa;             | K. Unidade de computadores; |
| B. Elo superior;                | L1. Unidade E-S Digital;    |
| C. Elo inferior;                | L2. Unidade E-S Analógica;  |
| D. Juntas esféricas;            | L3. Fonte de tensão 24 V;   |
| E. Junta prismática;            | L4. Cabo de potência;       |
| F1. Motor elétrico;             | L5. Cabo de sinal;          |
| F2. Sensor de condição térmica; | M1. Fonte de tensão 230 V;  |
| F3. Caixa de engrenagens;       | M2. Transformador;          |
| G. Interface mecânica;          | N. Painel de controle;      |
| H1. Motor elétrico;             | O. Sistema de vácuo;        |
| H2. Sensor de condição; térmica | P. Câmara de visão;         |
| H3. Caixa de engrenagens;       | Q. Sensor de proximidade.   |
| I. Junta Universal;             |                             |
| J1. Unidades de acionamento;    |                             |
| J2. Retificadores;              |                             |

O objetivo principal do processo de *sistema robótico* é obter as especificações de forma do RPE, as quais são detalhadas para o sistema, subsistemas e componentes do modelo estrutural proposto, definidos com base nas



funções global, parcial e elementar respectivamente.

Inicialmente, a coleta de informações do robô paralelo equivalente permitiu detalhar a sua função global, tal como é mostrado no Quadro 7.

Quadro 7 – Especificações do sistema robótico equivalente (RPE)

<b>Robô paralelo</b>	
<b>Função global:</b> Desenvolver trajetórias programadas a partir de um controlador para, eventualmente, serem executadas dentro de um espaço de trabalho cujas dimensões estão limitadas pela configuração da estrutura mecânica. Assim, ao longo das trajetórias é posicionada uma ferramenta final, disposta para executar a tarefa específica do robô	
<b>Associação de informações:</b> Robô paralelo de tecnologia elétrica, estruturalmente caracterizado por quatro pernas configuradas em paralelo, as quais devem permitir posicionar, ao longo de um espaço de 1132 mm de diâmetro por 250 mm de altura, um efetuator pneumático. O controle deve estar baseado em técnicas que permitam fornecer os parâmetros de velocidade requeridos nos movimentos e a exatidão desses parâmetros. Projeta-se o robô paralelo equivalente para executar tarefas repetitivas, relacionadas à manipulação de alimentos em ambientes higiênicos.	
Robô paralelo equivalente	
Capacidade de carga	3 kg
Temperatura de trabalho	[0–52]C
Velocidade máxima	10 m/seg
Aceleração máxima	60 m/seg <sup>2</sup>
Umidade máxima	95%
Tensão de alimentação	200–600 V
Operações de seleção	até 180 por min
Controlador	
Tensão de alimentação (usuário)	200–600 V
Tensão de alimentação (sinais)	24 V
Temperatura máxima de trabalho	+45 C
Umidade máxima permitida	95%

Por sua vez, as funções parciais – relacionadas para os subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuator – orientaram a seguintes descrições:

Quadro 8 – Especificações dos subsistemas do robô paralelo equivalente (RPE)

---



---

Subsistemas do modelo estrutural para o RPE

---

Item –SMON. Subsistema de monitoramento

**Função parcial:** Fornecer as variáveis operacionais do robô, garantindo a partir destas a adequada posição e velocidade na trajetória desejada.

**Descrição:** A detecção das caixas e posição do produto na banda central é feita por meio de um sistema de visão e sensores de proximidade, entretanto, a posição angular de cada junta ativa é fornecida por um encoder incremental.

---

Item –SCON. Subsistema de controle

**Função parcial:** Processar as variáveis operacionais para modificar o comportamento do robô, executando rotinas pre programadas para transferir as informações aos itens periféricos do sistema robótico.

**Descrição:** O controle do RPE, usa um protocolo de comunicação standard DeviceNet para a transferência de dados entre os componentes periféricos de controle. Para que isso seja feito, placas PCI, ordenadores, retificadores, entre outros, são incorporados neste subsistema.

---

Item –SATU. Subsistema de atuação

**Função parcial:** Fornecer potência mecânica de forma controlada para gerar os movimentos do robô.

**Descrição:** Um sistema elétrico de atuação é incorporado, com base nas suas vantagens de controle e adaptabilidade a ambientes limpos. Este subsistema usa motores AC acionados por um sistema eletrônico de potência. Necessariamente, elementos de transmissão são incorporados para acoplar os motores às juntas ativas do robô.

---

Item –SMEC. Subsistema mecânico

**Função parcial:** Transmitir a potência mecânica ao subsistema efetuator, usando a cadeia cinemática para posicionar a estrutura ao longo de uma trajetória de posição.

**Descrição:** A estrutura mecânica integra três juntas ativas para transmitir energia, configurando três pernas em paralelo para gerar movimentos nas três eixos coordenados  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Também, um quarto braço é incorporado para fornecer o movimento de rotação  $\theta$  ao efetuator.

---

Item –SEFE. Subsistema efetuator

---

(continua na próxima página)

Quadro 8 – Especificações dos subsistemas do robô paralelo equivalente (RPE)

(continuação)

---

Subsistemas do modelo estrutural para o RPE.

---

**Função parcial:** Interagir de forma direta com o entorno de trabalho do manipulador, realizando a tarefa final estabelecida no contexto de aplicação do robô.

**Descrição:** Um sistema pneumático de vácuo é integrado ao RPE, permitindo a manipulação do produto de forma adequada, isto em vista que com os níveis adequados de pressão o produto não é danificado.

---

No último nível do modelo estrutural, correspondente aos componentes, foram usadas as funções elementares para relacionar uma descrição clara de cada item. Para efeitos deste capítulo, somente serão mostrados os componentes do subsistema de atuação, ou seja, a fonte de potência, módulo de acionamento, atuadores e transmissão. Os componentes dos subsistemas de monitoramento, controle, mecânico e efetuator são detalhados no Apêndice B por meio dos Quadros 15, 17, 19 e 21.

Quadro 9 – Especificações dos componentes no subsistema de atuação do robô paralelo equivalente (RPE)

---

Subsistema de atuação do RPE

---

Item ATU1. Bateria

**Função elementar:** Fornecer energia.

**Descrição:** A fonte de potência fornece ao subsistema de atuação uma tensão elétrica de 230 V AC. Essa tensão é diferente aos requerimentos externos de 200-600 V fornecidos pelo usuário (especificações de funcionamento). Para regular a tensão externa a 230 V é usado um transformador elétrico.

---

Item ATU2. sistema eletrônico de potência

**Função elementar:** Ativar os atuadores.

---

(continua na próxima página)

Quadro 9 - Especificações dos componentes no subsistema de atuação do robô paralelo equivalente (RPE)

(continuação)

---

Subsistema de atuação do RPE

---

**Descrição:** As unidades de acionamento principal alimentam e controlam a potência fornecida nas três fases U–W–V dos motores AC. Na sincronização elétrica de cada fase é usado um sistema eletrônico de potência com modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*), cada um desses circuitos (*main circuits*) funciona com corrente contínua (DC) obtida do retificador (*DC link*); por outro lado, para ativar e desativar os motores é interrompido o fornecimento de corrente nas fases do motor.

---

Item ATU3. Motores AC

**Função elementar:** Gerar o movimento do robô.

**Descrição:** Os atuadores do RPE são motores elétricos AC livres de manutenção com requerimentos de potência de 1255 W e capacidade de gerar 2 Nm de torque. Os motores estão equipados com freios eletromecânicos e sensores de temperatura para monitorar sua condição térmica.

---

Item SATU4. Caixas redutoras de engrenagens

**Função elementar:** Transferir a potência mecânica dos atuadores às juntas.

**Descrição:** Caixas de engrenagens redutoras com óleo Mobil DTE FM 220 para sua lubrificação.

---

Fonte: ABB Group (2000), ABB Group (entre 2004 e 2010) e ABB Group (entre 2004 e 2007)

As informações associadas a cada item do RPE permitem, eventualmente, destacar a facilidade de relacionar itens existentes a cada uma das funções definidas na MACRoB. Por outro lado, as descrições mostradas são o primeiro resultado relevante da fase de *robô*, já que fornecem as especificações que orientam um melhor entendimento do sistema em análise.

Além das descrições já apresentadas, o modelo estrutural deve estar detalhado pelos períodos de falha de cada componente. Assim, nas fases de desenvolvimento os períodos de falha podem ser coletados por meio de consulta com especialistas, testes de laboratório, interpolação de dados em equipamentos similares etc.

No entanto, nesta aplicação foram adotados períodos de falha aleató-

rios, os quais visam ilustrar os resultados a serem obtidos da MACRoB. Isso foi feito pela dificuldade de coletar esse tipo de informação.

O Quadro 10 mostra os períodos de falha adotados para cada componente do subsistema de atuação. Para os restantes componentes do robô paralelo equivalente, os períodos de falha são mostrados no Apêndice B.

Quadro 10 – Períodos de falha assumidos para o subsistema de atuação do RPE

Componente ATU1: Bateria.
<i>Períodos de falha (horas)*:</i> 4590 (F); 5060 (F); 5680 (F); 5930 (F); 6090 (F); 6310 (F); 6810 (F); 6980 (F); 7000 (F); 7200 (F); 7320 (F); 7430 (F); 10500 (F); 10500 (F); 13100 (F).
Componente ATU2: Módulo de acionamento.
<i>Períodos de falha (horas)*:</i> 3500 (F); 7580 (F); 8040 (F); 8890 (F); 9050 (F); 9230 (F); 10500 (F); 10830 (F); 11000 (F); 12000 (F); 13650 (F); 13720 (F); 14200 (F); 14930 (F); 15680 (F)
Componente ATU3e: Atuador.
<i>Períodos de falha dos motores ME (horas)*:</i> 5030 (F); 5560 (F); 7900 (S); 8390 (F); 8480 (F); 8820 (F); 9010 (S); 10210 (F); 10790 (F); 12150 (F); 12170 (F); 13000 (F); 13150 (F); 14800 (S); 14980(F)
<i>Períodos de falha do sensor térmico SE (horas)*:</i> 1000 (F); 2100 (F); 2400 (F); 2500 (F); 10200 (F); 10700 (F); 10850 (F); 10900 (F); 11000 (F); 11100 (F); 11500 (F); 11700 (F); 11800 (F); 12500 (F); 12800 (F)
Componente ATU4: Caixas de engrenagens.
<i>Períodos de falha (horas)*:</i> 8300 (F); 10300 (F); 11500 (F); 11700 (F); 12100 (F); 12800 (F); 13600 (F); 13900 (F); 14200 (F); 14200 (F); 14800 (F); 16200 (F); 17000 (F); 17600 (F); 20100 (F)
(*) Períodos de falha adotados aleatoriamente, ou seja, não são reflexo do comportamento real do robô RPE

Percebe-se que os tempos mostrados acima estão especificados pelo tipo de evento, quer dizer, identificou-se se o evento é uma falha (F) ou suspensão (S), tal como foi estabelecido na MACRoB.

Desta forma, os períodos de falha mostrados para cada componente são usados para calcular o parâmetro de forma  $\beta$  e taxa de falha característica  $\lambda_0$ , os quais identificam a distribuição Weibull biparamétrica utilizada como referência na metodologia proposta. A partir disso, foram analisadas as confiabilidades dos componentes, subsistemas e sistema do RPE. Isso feito no processo de “atributo da confiabilidade”, mostrado a seguir.

## 6.2 ATRIBUTO DA CONFIABILIDADE

A análise de confiabilidade do robô paralelo equivalente foi feita de acordo com a estrutura da MACRoB, ou seja, foram estimadas as probabilidades dos componentes para, posteriormente, usar esses resultados no cálculo da confiabilidade dos subsistemas e sistema como um todo. Esse procedimento é reflexo das três fases mostradas a seguir.

### 6.2.1 Confiabilidade dos componentes no robô paralelo equivalente

Esta fase da MACRoB orienta o caminho a ser percorrido para estimar as probabilidades individuais dos componentes. Para isso ser feito de forma adequada, devem-se ressaltar, com base na descrição do sistema, as seguintes considerações:

- Como os motores elétricos incorporam um sensor de condição térmica, isso se traduz, na abordagem da confiabilidade, no estabelecimento de uma arquitetura adicional para o componente de atuadores, já que um sensor desse tipo é integrado para melhorar a confiabilidade de um item;
- Por outro lado, os motores elétricos apresentam períodos de falha que relacionam eventos de “falha” e “suspensão”. Essa característica exige calcular o incremento na ordem da falha –  $\Delta i_s$  – dos eventos considerados suspensos, tal como foi visto na Seção 4.4.1;
- Finalmente, o subsistema de atuação incorpora elementos de transmissão para fazer o acoplamento entre os atuadores e as juntas do subsistema mecânico. Esse acoplamento é feito especificamente por meio de uma caixa redutora de engrenagens. Tendo em base esta consideração, o subsistema de atuação deve ser analisado conforme a integração de quatro componentes, sendo estes: fonte de potência, módulo de atuação, atuador equivalente e transmissão.

A MACRoB propõe desdobrar os componentes do modelo estrutural proposto para o robô, quando for necessário, por exemplo, quando sejam identificadas redundâncias, itens para monitoramento de condição etc. Nesse contexto, estabeleceu-se um novo arranjo confiabilístico para o atuador do RPE, o qual está baseado na configuração de itens com sensor de condição. Isso significa que um novo modelo de confiabilidade deve ser também definido.

A configuração usada nos atuadores é mostrada na Figura 40, de modo que os motores elétricos (ME) são monitorados pelos sensores térmicos (SE). Pode-se, então, especificar o modelo de confiabilidade para a configuração usada, tal como indicado na Equação 6.1.

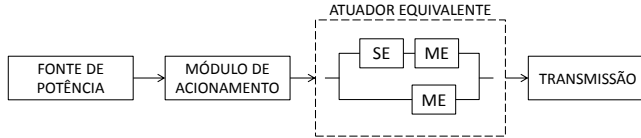


Figura 40 – Desdobramento adicional no atuador do RPE

$$R_{ATU3e} = 1 - [(1 - R_{SE}R_{ME})(1 - R_{ME})] \quad (6.1)$$

Onde

$R_{ATU3e}$  = Confiabilidade dos atuadores equivalente;

$R_{SE}$  = Confiabilidade do sensor de condição térmica;

$R_{ME}$  = Confiabilidade dos motores AC.

Desta forma, a análise de confiabilidade dos componentes do robô paralelo equivalente foi fundamentada nos seguintes itens:

- Subsistema de monitoramento (SMON):
  - Sensores externos (MON1): Equipamento de visão de detecção;
  - Sensores internos (MON2): Encoder óptico incremental;
- Subsistema de controle (SCON):
  - Módulo de comunicação (CON1): Unidades E–S;
  - Módulo de processamento (CON2): Ordenadores e painel de controle;
- Subsistema de atuação (SATU):
  - Fonte de potência (ATU1): Bateria elétrica;
  - Módulo de acionamento (ATU2): Sistema eletrônico de potência;
  - Atuadores equivalente (ATU3e), representados por um configuração de itens com sensor de condição:
    - \* Atuadores (ME): Motores AC;

- \* Sensor (SE): Sensor de condição térmica.
- Transmissão (ATU4): Caixas redutoras de engrenagens;
- Subsistema mecânico (SMEC)
  - Plataforma fixa (MEC1);
  - Juntas (MEC2);
  - Elos (MEC3);
  - Interface mecânica (MEC4);
- Subsistema efetuator (SEFE)
  - Efetuator final (EFE1): sistema de vácuo pneumático.

A partir dessa identificação de componentes e os períodos de falha adotados, foram calculados os parâmetro de taxa de falha característica  $\lambda_0$  e o parâmetro de forma  $\beta$ . Para isso ser feito, aplicou-se o método dos mínimos quadrados (*Least mean squares* – LMS), tal como foi estabelecido na metodologia proposta.

Lembra-se que quando  $\beta$  é igual a 1, o tempo médio até falha (MTTF) é o inverso da taxa de falha característica (Figura 41), assim, para esse valor calculado de MTTF corresponde o 36,8% de confiabilidade.

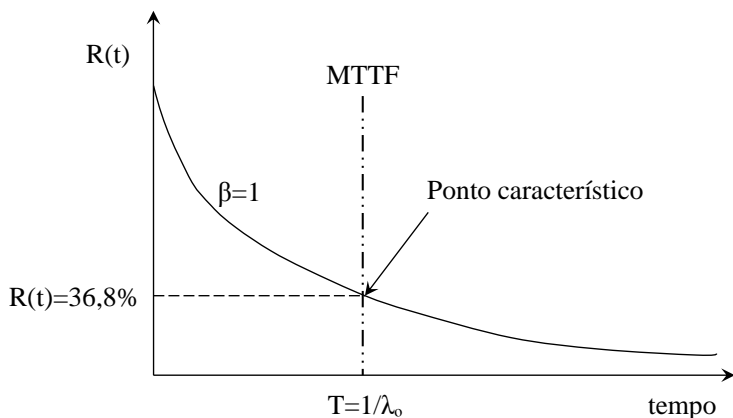


Figura 41 – Valor do MTTF para um  $\beta = 1$

Caso não exista a condição ilustrada na Figura 41 para o parâmetro de forma, a análise mostrada não é válida, portanto, ao MTTF corresponde uma confiabilidade diferente.



A abordagem, anteriormente apresentada, foi fundamental para suportar as ações recomendadas, as quais são detalhadas na análise dos resultados, apresentada na última seção deste capítulo.

Os valores obtidos nos parâmetros  $\lambda_0$ ,  $\beta$  e MTTF são apresentados para os componentes do subsistema de atuação no Quadro 11. Ressalta-se que é mostrada a confiabilidade correspondente ao valor do MTTF. Para os componentes restantes, os valores dos parâmetros poderão ser consultados na planilha de resultados.

Quadro 11 – Parâmetros  $\beta$  e  $\lambda_0$  dos componentes do subsistema de atuação para o robô paralelo equivalente

Componente	$\beta$	$\lambda_0 \times 10^{-5}$	MTTF	$R(MTTF)[\%]$
ATU1	3,7566	12,237	7381,3	50,55
ATU2	2,9422	8,114	10995,3	48,92
ME	3,2648	8,116	10945,2	50,69
SE	1,2152	9,140	10258,9	39,66
ATU4	5,1024	6,639	13865,2	52,17

Observa-se que, o parâmetro de forma do sensor de condição térmica (SE) é 1,2152. Esse valor é próximo a 1, ou seja, a confiabilidade do MTTF (calculado em 10258,9 h) é 39,66%, muito perto do ponto de vida característica. Por outro lado, quanto maior o valor de  $\beta$ , maior se torna a confiabilidade do item no tempo correspondente ao MTTF, tal como é indicado no Quadro 11. Esse fato, eventualmente, suporta o processo de tomada de decisões.

Com os parâmetros característicos de uma distribuição Weibull biparamétrica, já calculados para os componente do RPE, foi usada a função  $R(t)$  correspondente a essa distribuição (Equação 6.2) para analisar o comportamento da confiabilidade ao longo do ciclo de vida de cada item.

$$R(t) = e^{-(\lambda_0 t)^\beta} \quad (6.2)$$

A Figura 52 mostra a confiabilidade para cada componente do subsistema de atuação, analisada para um tempo de 600 h, cujo valor corresponde à meta de confiabilidade estabelecida para o robô paralelo equivalente (RPE).

Já o comportamento ao longo da vida útil de cada componente do robô paralelo equivalente, representado nas curvas  $R(t)$ , é mostrado nas Figuras 50, 51, 52, 53 e 54, as quais podem se encontrar no Apêndice C.

Os resultados, mostrados na Figura 42, indicam que o sensor de condição térmica apresenta a confiabilidade mais baixa no subsistema de atuação

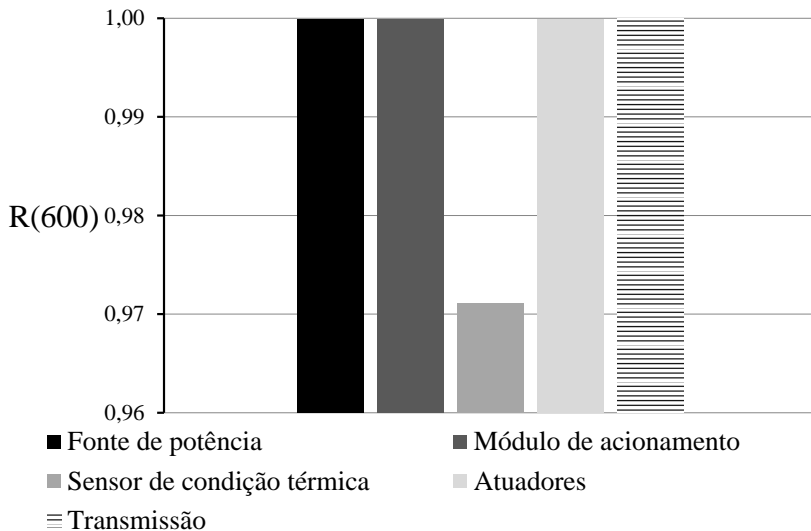


Figura 42 – Confiabilidade para 600 horas nos componentes do subsistema de atuação do RPE

do RPE. Por sua vez, nota-se a tendência exponencial no formato da curva desse componente, isso em consideração da proximidade ao valor de 1 do parâmetro de forma calculado ( $\beta = 1.2152$ ).

Desta forma, foram obtidos os resultados esperados da fase de “confiabilidade de componentes”, ou seja, o tempo médio até falha e confiabilidade, esta última associada aos parâmetros  $\beta$  e  $\lambda_0$  estimados para cada componente.

## 6.2.2 Confiabilidade dos subsistemas no robô paralelo equivalente

Nesta fase da MACRoB são calculadas as confiabilidade dos subsistemas de monitoramento (SMON), controle (SCON), atuação (SATU), mecânico (SMEC) e efetuator (SEFE).

Para isso foram usados os modelos de confiabilidade para configurações em série, os quais estão propostos para cada subsistema na MACRoB. Ainda assim, retomam-se a seguir:

$$\begin{aligned}
 R_{SMON} &= (R_{MON1}) (R_{MON2}) \\
 R_{SCON} &= (R_{CON1}) (R_{CON2}) \\
 R_{SATU} &= (R_{ATU1}) (R_{ATU2}) (R_{ATU3e}) (R_{ATU4})
 \end{aligned}$$

$$R_{SMEC} = (R_{MEC1})(R_{MEC2})(R_{MEC3})(R_{MEC4})$$

$$R_{SEFE} = (R_{EFE1})$$

A equação que representa a confiabilidade do subsistema de atuação inclui um desdobramento adicional, relacionado ao atuador equivalente e cuja confiabilidade ( $R_{ATU3e}$ ) foi calculada conforme a Equação 6.1, apresentada na seção anterior.

Na Figura 43 estão representadas as confiabilidades dos subsistemas do RPE. É interessante ressaltar, com base nessa figura, que os subsistemas efetuator e monitoramento influem negativamente sobre a confiabilidade do robô em análise, isso porque possuem a menor confiabilidade em 600 h de operação entre os cinco subsistemas analisados.

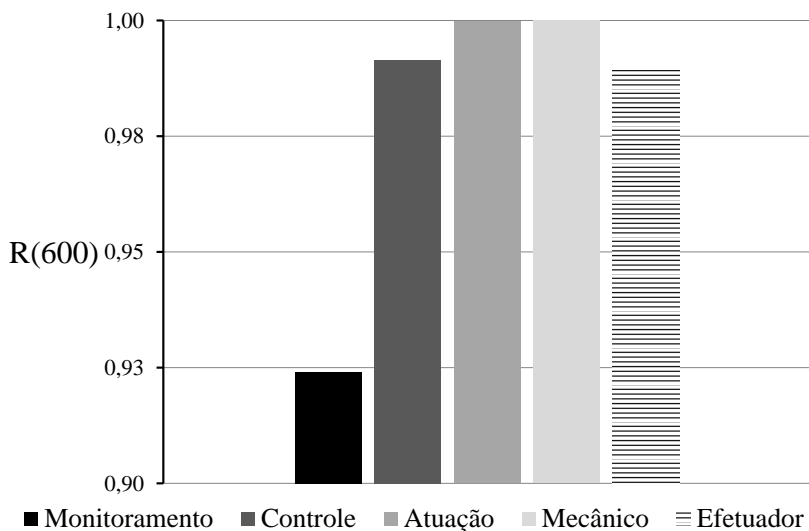


Figura 43 – Confiabilidade para 600 horas nos subsistemas do RPE

O comportamento ao longo do tempo para os subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuator é mostrado na Figura 55 do Apêndice C.

### 6.2.3 Confiabilidade do sistema no robô paralelo equivalente

Nesta fase da metodologia, usou-se as probabilidades individuais dos subsistemas para calcular a confiabilidade total do RPE.

A confiabilidade total do robô paralelo relaciona os subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuator em uma configuração em série. Isso porque, se qualquer desses subsistemas falharem, haverá falha no robô. Assim, o modelo de confiabilidade, proposto dentro da MACRoB, é mostrado a seguir:

$$R_{SIST} = (R_{SMON})(R_{SCON})(R_{SATU})(R_{SMEC})(R_{SEFE})$$

Onde

$R_{SIST}$  = Confiabilidade do sistema RPE;

$R_{SMON}$  = Confiabilidade do subsistema de monitoramento;

$R_{SCON}$  = Confiabilidade do subsistema de controle;

$R_{SATU}$  = Confiabilidade do subsistema de atuação;

$R_{SMEC}$  = Confiabilidade do subsistema mecânico;

$R_{SEFE}$  = Confiabilidade do subsistema efetuator.

O projeto do RPE estabeleceu uma meta de 90% de confiabilidade para 600 horas de operação. Assim, analisou-se o comportamento da confiabilidade total dentro de um período de 0 a 1000 horas de uso, tal como é mostrado no Quadro 12

Quadro 12 – Valores de confiabilidade do robô paralelo equivalente

$(t) \times 10^2 h$	SMON	SCON	SATU	SMEC	SEFE	$R(t)_{sist}$
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,0000
1	0,984	1,000	1,000	1,000	1,000	0,9838
2	0,971	0,999	1,000	1,000	0,999	0,9690
3	0,959	0,997	1,000	1,000	0,997	0,9541
4	0,947	0,996	1,000	1,000	0,995	0,9386
5	0,935	0,994	1,000	1,000	0,993	0,9227
6	0,924	0,992	1,000	1,000	0,989	0,9061
7	0,913	0,989	1,000	1,000	0,985	0,8890
8	0,902	0,986	1,000	1,000	0,980	0,8713
9	0,891	0,983	0,999	1,000	0,975	0,8530
10	0,880	0,979	0,999	1,000	0,969	0,8341

A representação gráfica do comportamento da confiabilidade total do

sistema é mostrado na Figura 44. Destaca-se, então, que a queda rápida na confiabilidade está relacionada à quantidade de itens configurados em série, os quais estão influenciados pela taxa de falha  $\lambda_0$  e parâmetro de forma  $\beta$ .

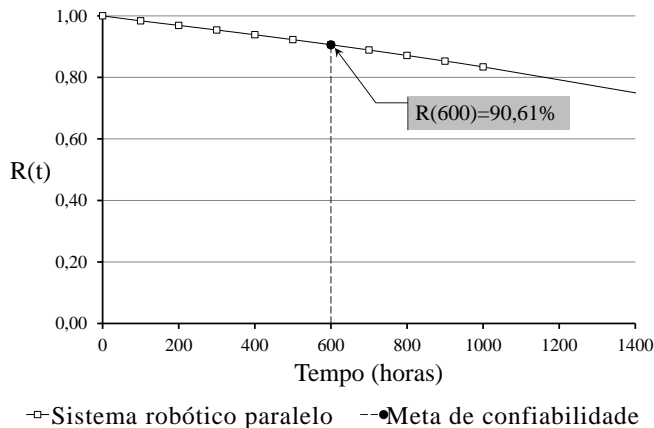


Figura 44 – Confiabilidade total do robô paralelo equivalente

Os resultados indicam que, para um tempo de 600 horas, a confiabilidade total do robô é de 90,61%, de forma que, a meta proposta para o projeto foi alcançada. No entanto, surge a seguinte pergunta: é possível avaliar possíveis pontos de melhora na confiabilidade para, eventualmente, ser utilizando como diferencia do produto (no caso o robô paralelo)?

A resposta está fortemente influenciada pela capacidade de melhorar a confiabilidade dos componentes individuais. Por outro lado, essa visão relaciona, na perspectiva gerencial do projeto, maiores investimentos econômicos nos componentes críticos que podem ser identificados.

É importante ressaltar que os modelos de confiabilidade, propostos dentro da MACRoB, foram adequados nos cálculos das confiabilidades de cada item do modelo estrutural do robô. Isso com base na relevância da informação obtida, por exemplo: confiabilidade do sistema para determinar se as metas do projeto foram alcançadas, confiabilidade dos subsistemas e componentes para identificar itens com possíveis pontos de melhora e suporte de decisões com base na análise confiabilística.

Ao longo da execução dos processos da metodologia proposta, várias foram as informações geradas ao respeito do sistema RPE em desenvolvimento, as quais podem ser resumidas da seguinte forma:

- Descrição do modelo estrutural proposto para um robô paralelo, associando informações do sistema RPE;

- Parâmetro de taxa de falha característica  $\lambda_0$ , parâmetro de forma  $\beta$ , tempo médio até falha MTTF e confiabilidade  $R(t)$  para cada componente;
- Confiabilidade dos subsistemas de monitoramento, controle, atuação, mecânico e efetuator;
- Confiabilidade total do RPE.

Tais informações são os resultados próprios da metodologia proposta, faltando unicamente as ações recomendadas para o sistema em desenvolvimento. Essas ações estão fundamentadas nos resultados já mencionados, além da identificação dos modos de falha, suas causas e efeitos para cada item do sistema RPE. Para isso, foi aplicada a técnica FMEA.

O objetivo da FMEA é identificar as causas que geram as falhas, recomendando ações que levem a evitá-las ou controlá-las. No contexto da MACRoB, usou-se a abordagem funcional da técnica FMEA para analisar quantitativamente a confiabilidade do robô, permitindo, além de recomendar ações, melhorar o entendimento dos eventos falhas do RPE.

A planilha da FMEA inclui diversas colunas para preenchimento de informação, tal como foi mostrado na Seção 3.3.2. No entanto, dessa planilha, somente foram preenchidas as colunas de componente/função, modo de falha, efeito, causa e controles.

Ao longo deste capítulo vêm sendo mostrados, principalmente, os resultados do subsistema de atuação. Nesse contexto, a técnica FMEA é apresentada para esse subsistema no Quadro 13. Entretanto, para os subsistemas de monitoramento, controle, mecânico e efetuator, os resultados desta técnica são detalhados nos Quadros 23, 24, 25 e 26 respectivamente, todos eles incluídos no Apêndice D.

Quadro 13 – FMEA para o subsistema de atuação do robô paralelo equivalente

Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
Fonte de potência / Fornecer tensão de 230 V aos componentes periféricos do subsistema	Não fornece tensão	Robô sem movimento	Unidade queimada por defeitos no transformador	Nenhum
			Cabos de conexão isolados	Nenhum
Módulo de acionamento / Ativar os motores AC sincronizando eletricamente suas três fases U-W-V.	Perda de corrente em uma das fases de alimentação	Queima das fases do enrolamento no motor AC	Curto circuito no circuito principal das unidades de acionamento	Nenhum
			Queima do retificador	Nenhum
	Perda dos sinais pra ativar ou desativar o motor	Falhas nos movimentos do robô	Curto-circuito nas unidades de acionamento	Nenhum

(continua na próxima página)

Quadro 13 – FMEA para o subsistema de atuação do robô paralelo equivalente  
(continuação)

Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
	Desequilíbrio de tensão nas fases U-W-V	Aquecimento e perda de potência nos atuadores elétricos	Circuitos eletrônicos defeituosos	Nenhum
Atuadores / Gerar o movimento do manipulador	Bloqueio do rotor	Robô sem movimento	Enrolamentos do estator danificados ou queimados	Sensor de condição térmica
			Defeitos na desativação do freio eletromecânico	Nenhum
Transmissão / Transmitir a potência mecânica do atuador às juntas ativas do elo superior	Juntas ativas do elo superior sem fornecimento de potência mecânica de rotação	Juntas sem rotação	Ruptura de dentes nos engrenagens	Nenhum
			Engrenagens bloqueadas.	Nenhum

Com base na identificação das falhas no subsistema de atuação, por exemplo, na fonte de potência, percebeu-se que evitar as causas identificadas pode se tornar uma ação inviável, pois a ocorrência dos eventos de falha são difíceis de monitorar. Assim, é recomendável manutenção preventiva com atividades de reposição de componente ou usar o componente até que a falha aconteça. Uma decisão desse tipo pode se fundamentar na análise conjunta do parâmetro de forma, taxa de falha característica e tempo médio até falha.

Por sua vez, o sensor de condição térmica fornece os valores que monitoram a temperatura dos motores AC, visando evitar a queima de seu enrolamento. A principal causa para que isso aconteça, é a queda de corrente em uma das fases de alimentação do motor. Assim, o sensor de condição térmica



foi considerado como “controle” e não como componente.

Em resumo, tem-se já todos os resultados esperados da metodologia proposta para o robô paralelo equivalente (RPE). A análise desses resultados é apresentada na seção a seguir.

### 6.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise de resultados é um processo autônomo da equipe de projetistas, o sucesso desse processo está relacionado à experiência dos engenheiros de confiabilidade, capacidade na tomada de decisões etc. Nesse contexto, as inferências mostradas nesta seção podem, eventualmente, gerar discussões mais amplas.

A MACRoB forneceu resultados para cada item do modelo estrutural do robô paralelo equivalente. No que se refere ao estudo probabilístico, esses resultados estão preenchidos na planilha de resultados, mostrada no Quadro 14.

Além disso, a técnica FMEA permitiu identificar os modos, causas e efeitos das falhas em cada componente do robô paralelo em análise.

Inicialmente, a meta de confiabilidade total para o sistema robótico, estabelecida em 90% para 600 horas de uso, foi alcançada. Nota-se que, o RPE, ao longo da sua fase de desenvolvimento, pode, eventualmente, atingir uma confiabilidade de 90.61%.

No entanto, deve-se analisar cada item do modelo estrutural do robô paralelo. Isso para determinar qual subsistema tem maior impacto sobre a confiabilidade total calculada e, identificar a etapa do ciclo de vida onde acontecem a maioria de eventos de falha em cada componente. Nesse contexto, foram fundamentadas as ações recomendadas no RPE nesta aplicação.

No caso dos subsistemas do RPE as confiabilidades estimadas foram maiores a 90%. Ainda assim, nota-se que o subsistema de monitoramento, cuja confiabilidade foi calculada em 92,4%, representa o item com maior impacto sobre a confiabilidade total do robô, destacando que para 600 horas de operação, os subsistemas restantes possuem confiabilidades maiores a 98,92%.

Quadro 14 – Planilha de resultados do robô paralelo equivalente

ROBÔ		ATRIBUTO DA CONFIABILIDADE			
Item	Descrição	R(600)	Curva	EQUIPE DE PROJETO	
Robô paralelo equivalente (RPE)	Quadro 7	0,9061	Figura 44	.....	
1. Monitoramento	Quadro 8	0,9240	Figura 55	.....	
2. Controle	Quadro 8	0,9915	Figura 55	.....	
3. Atuação	Quadro 8	0,9998	Figura 55	.....	
4. Mecânico	Quadro 8	1,0000	Figura 55	.....	
5. Efetuador	Quadro 8	0,9892	Figura 55	.....	
1.1 Sensores externos	Quadro 15	0,9265	Figura 50	$\lambda_0 \times 10^{-5}$	MTTF
1.2 Sensores internos	Quadro 15	0,9973	Figura 50	0,887	11562,9
2.1 Módulo de comunicação	Quadro 17	0,9922	Figura 51	1,968	10818,4
2.2 Módulo de processamento	Quadro 17	0,9994	Figura 51	1,685	9482,8
3.1 Fonte de potência	Quadro 9	0,9999	Figura 52	2,620	8793,3
3.2 Módulo de acionamento	Quadro 9	0,9999	Figura 52	3,756	12,237
3.3.1 Atuador	Quadro 9	0,999	Figura 52	2,942	10995,4
				3,264	10945,2

(continua na próxima página)

Quadro 14 – Planilha de resultados do robô paralelo equivalente

ROBÔ		ATRIBUTO DA CONFIABILIDADE					(continuação)
Item	Descrição	R(t)	Curva	$\beta$	$\lambda_0 \times 10^{-5}$	MTTF	Ações recomendadas
3.3.2	Sensor de condição	0,9711	Figura 52	1,215	9,1400	10258,9	Incorporar um item de melhor qualidade em relação à $\lambda_0$
3.4	Transmissão	1,0000	Figura 52	5,102	6,6299	13865,3	Revisão periódica cada 13000 h
4.1	Plataforma fixa	1,0000	Figura 53	8,662	4,0254	23483,7	Revisão periódica cada 23000 h
4.2	Juntas	1,0000	Figura 53	8,245	5,3753	17545,4	Revisão periódica cada 17000h
4.3	Elos	1,0000	Figura 53	3,421	5,4687	16433,1	Revisão periódica cada 16000h
4.3	Interface mecânica	1,0000	Figura 53	7,324	4,0395	23211,2	Revisão periódica cada 23000h
4.3	Efetuator final	0,9892	Figura 54	2,113	19,594	4519,9	Desenvolver um efetuator final com robustez em relação a $\lambda_0$

Assim, uma análise mais cuidadosa deve ser feita sobre o subsistema de monitoramento, procurando identificar as causas que encaminham a sua baixa confiabilidade.

Já analisando os resultados dos componentes do RPE, percebeu-se, a partir do parâmetro de forma e taxa de falha característica, três cenários de confiabilidade distintos, sendo estes:

- Cenário A: Componentes com  $\beta < 1$  e  $\lambda_0 > 8 \times 10^{-5} \text{ falhas/h}$  ;
- Cenário B: Componentes com  $\beta \approx 1$  e  $\lambda_0 > 8 \times 10^{-5} \text{ falhas/h}$ ;
- Cenário C: Componentes com  $\beta > 1$ :
  - Cenário C1: Componentes com  $\beta > 1$  e  $\lambda_0 > 8 \times 10^{-5} \text{ falhas/h}$ ;
  - Cenário C2: Componentes com  $\beta > 1$  e  $\lambda_0 < 6 \times 10^{-5} \text{ falhas/h}$ .

Os cenários anteriormente mencionados respondem às fases do ciclo de vida de um item, ou seja, componentes com  $\beta < 1$  apresentam falhas de juventude. Entretanto, componentes com  $\beta \approx 1$  relacionam as falhas aleatórias e, finalmente, componentes com  $\beta > 1$  caracterizam as falhas por desgaste (BERTSCHE, 2008).

**Cenário A:** Os padrões de referência deste cenário ( $\beta < 1$  e  $\lambda_0 > 8 \times 10^{-5} \text{ falhas/h}$ ) são atingidos, unicamente, pelos sensores externos do RPE. Esses componentes apresentam um valor de  $\beta = 0,887$ , isso indica que, tal vez, possam existir falhas precoces, seguramente, por problemas de qualidade no projeto, na fabricação ou na montagem.

A Figura 45 mostra o impacto do valor no parâmetro de forma sobre a confiabilidade dos sensores externos. Note-se como a probabilidade decresce rapidamente nas primeiras 5000 h, de forma que para 600 h a confiabilidade é de 92,65%. Esse valor é a menor probabilidade calculada entre os componentes do RPE.

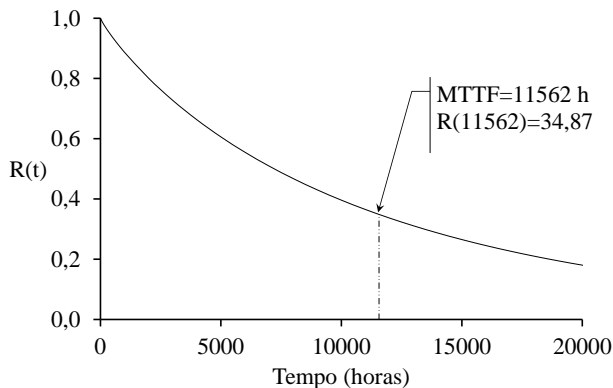


Figura 45 – Comportamento da  $R(t)$  e  $f(t)$  nos sensores externos do RPE

Propõe-se, então, ações de reprojeção – se possível – para os sensores externos, isso com base na sua baixa confiabilidade e a presença de falhas precoces indesejadas.

A proposta de reprojeção dos sensores externos deve mitigar as causas das falhas, identificadas na aplicação da técnica FMEA (Quadro 23). Assim, podem-se projetar novos sensores com melhor qualidade no circuito eletrônico emissor de feixe de luz.

**Cenário B:** Os padrões de referência deste cenário ( $\beta \approx 1$  e  $\lambda_0 > 8 \times 10^{-5}$  falhas/h) se ajustam aos valores calculados no sensor de condição térmica. Assim, para um parâmetro de forma de 1,215, a função  $R(t)$  se torna muito próxima ao formato de uma distribuição exponencial (Figura 46), tal como foi indicado na Seção 4.1.1.

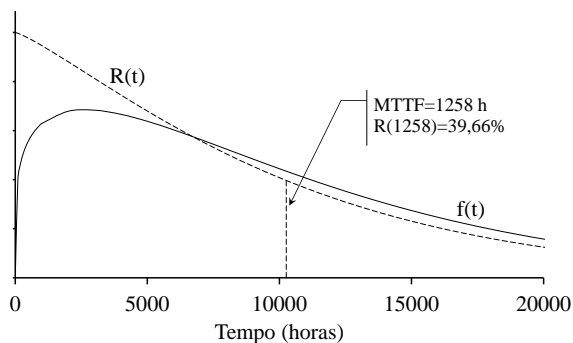


Figura 46 – Comportamento da  $R(t)$  e  $f(t)$  no sensor de condição térmica do RPE

O valor de  $\beta = 1,215$  indica que haverá uma aleatoriedade na ocorrência dos eventos de falha, o que traduz em uma necessidade de atuar diretamente sobre o desenvolvimento do sensor de condição térmica, dando maior robustez em relação à taxa de falha característica, inicialmente calculada em  $9,1400 \times 10^{-5}$  falhas/hora.

Assim, recomendou-se integrar aos sensores de condição térmica de melhor qualidade, de forma a diminuir a  $\lambda_0$ . Isso, eventualmente, pode resultar em uma concentração de falhas distante do início da vida do item.

**Cenário C1:** A maioria dos componentes do robô paralelo equivalente estão neste cenário. Nota-se que, a fonte de potência, módulo de acionamento e atuador, no contexto de valores aleatórios assumidos, apresentam valores de  $\beta_1 = 3,756$ ,  $\beta_2 = 2,942$  e  $\beta_3 = 3,264$  respectivamente. Esses valores se aproximam ao valor de 3,44, o qual representa aproximadamente uma distribuição normal.

Essa tendência é mostrada na Figura 47, a qual representa o comportamento das funções  $R(t)$  e  $f(t)$  para o módulo de acionamento.

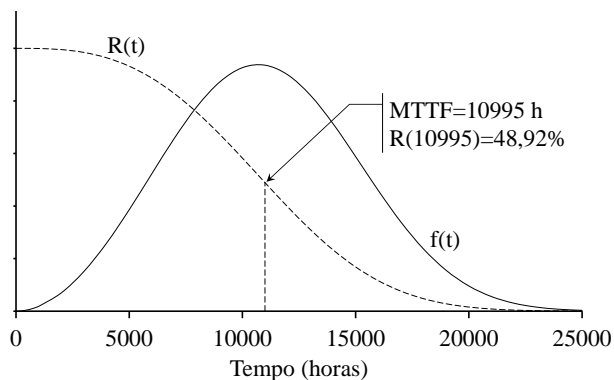


Figura 47 – Comportamento da  $R(t)$  e  $f(t)$  no módulo de acionamento do RPE

A figura anterior mostra um tempo médio até falha (MTTF) de 10995 h, referenciado para uma confiabilidade aproximadamente de 50%. Isso indica que às 10995 h já se registraram a metade dos períodos de falha coletados para o módulo de acionamento.

Ressalta-se, além da fonte de potência, que o módulo de acionamento e os atuadores são itens onde as ações para mitigar as causas de falha podem se tornar inviáveis, isso na maioria das falhas identificadas. Tal consideração parte dos resultados da FMEA (Quadro 13) e a natureza desses itens, pois tratam-se de componentes eletrônicos e elétricos.

Assim, as ações recomendadas para os itens analisados estão orientadas à reposição de componentes, onde, estipulou-se o planejamento dessas atividades em um período correspondente à metade do valor calculado do MTTF, ou seja:

$$t_{mp} = MTTF/2$$

Onde

$t_{mp}$ : tempo para reposição de componentes.

O valor do  $t_{mp}$  visa garantir a confiabilidade da fonte de potência, módulo de acionamento e atuadores ao longo do ciclo de vida do robô, já que para os itens mencionados foi estimada uma confiabilidade de 99,9%, tal como foi preenchido no Quadro 14. Eventualmente, este período de reposição deverá ser avaliado na implementação do lote inicial do robô paralelo equivalente.

Já os sensores internos, módulo de comunicação e módulo de processamento apresentaram parâmetros de forma de 1, 968, 1, 685 e 2, 620 respectivamente. Ainda quando esses valores são maiores do que 1, deve-se notar que existe maior dispersão dos eventos de falha.

A causa mais comum de falha identificada –tanto nos sensores internos, como módulo de comunicação e módulo de processamento– foi a queima de componentes por curto-circuito, tal foi indicado nos resultados da técnica FMEA nos Quadros 23 e 24.

Nesse tipo de falha, a queima por curto-circuito, possivelmente, é mais apropriado esperar a ocorrência do evento de falha do que controlar as suas causas. Assim, recomendou-se manutenção corretiva nos sensores internos, módulo de comunicação e módulo de processamento.

Entretanto, esses tipos de ações implicam, na reposição de partes, planos melhor estruturados para os componentes com projeção de manutenção corretiva. Isso para fornecer ao cliente as partes requeridas de forma oportuna, uma vez o evento de falha aconteça.

Finalmente, o efetuator final é o último componente que se acopla aos padrões de referência do cenário C1. Observou-se, com base nos valores preenchidos no Quadro 14, que este componente apresentou um valor de  $\lambda_0 = 19,594 \times 10^{-5}$  falhas/h, o maior calculado entre os componentes do RPE. De fato, não é adequado integrar um componente com grande taxa de falha, mesmo quando possui um valor de  $\beta$  adequado. Por tal motivo, foi considerado projetar um efetuator final de maior robustez, isso em relação à taxa de falha característica.

**Cenário C2:** O último cenário abrange a transmissão, plataforma fixa, elos, juntas e interface mecânica do robô paralelo equivalente. Esses compo-

nentes apresentaram os maiores parâmetros de forma, assim como as taxas de falha característica mais baixas. Isso em comparação com os componentes restantes do sistema em análise.

O comportamento das curvas  $R(t)$  e  $f(t)$  nas juntas será mostrado como referência (Figura 48), destacando que os restantes componentes do cenário D seguem essa mesma tendência.

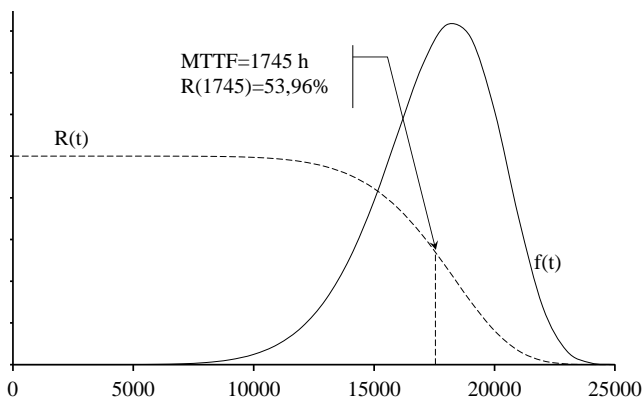


Figura 48 – Comportamento da  $R(t)$  e  $f(t)$  nas juntas do RPE

As ações recomendadas estão orientadas a atividades de manutenção preventiva, baseando-se na pouca dispersão dos eventos de falha que são reflexo dos altos valores no parâmetro de forma. Destaca-se, assim, que, os períodos de manutenção foram estipulados com base no MTTF calculado.

Desta forma, deve-se agir diretamente nas causas das falhas identificadas na transmissão, plataforma fixa, elos, juntas e interface mecânica por meio de revisões periódicas, por exemplo:

- Revisar as engrenagens na caixa redutora a cada 13000 horas;
- Verificar o estado das molas nos elos a cada 16000 horas;
- Inspeccionar os componentes de fixação da interface mecânica a cada 23000 horas;
- Verificar sinais de fratura nas juntas a cada 17000 horas.

A execução das ações recomendadas projetarão, eventualmente, um robô paralelo equivalente com uma confiabilidade maior do que 90%, meta estabelecida para 600 horas de operação. Isso considerando que foi atuado – se possível – nos componentes mais críticos.



As ações de reprojeto nos sensores externos e reprojeto de um efetuator final com maior robustez, devem aumentar a confiabilidade desses componentes, o que se traduz em um incremento da confiabilidade total.

Assim, com base na análise de resultados feita, demonstrou-se que a MACRoB incorpora o atributo da confiabilidade ao RPE, auxiliando igualmente a caracterização da manutenibilidade do robô. Portanto, os diversos resultados da MACRoB se tornam práticos ao longo de um processo de projeto para sistemas robóticos.



## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação de mestrado relacionou os conceitos de confiabilidade para aplicá-los em sistemas robóticos, usando técnicas adequadas para analisar os eventos de falhas do robô. Essa abordagem é estruturada na metodologia –MACRoB, ajudando aos projetistas na inclusão do atributo da confiabilidade nas atividades de desenvolvimento do robô, onde é definida a confiabilidade como um atributo inerente do produto.

Para contextualizar a metodologia proposta neste trabalho, procurou-se, nos capítulos iniciais, abarcar os conceitos de robótica paralela e confiabilidade que fundamentaram a estrutura da metodologia desenvolvida.

Assim, no Capítulo 1 foi apresentado o contexto do trabalho, ressaltando a importância dos robôs industriais como sistemas que vêm evoluindo constantemente, satisfazendo as necessidades operacionais mais diversas da atualidade. Destaca-se, então, que esse desenvolvimento tecnológico pode incrementar as fontes de falha nos robôs, motivando a análise de confiabilidade nesse tipo de sistemas. Igualmente, neste capítulo foram apresentados os objetivos para este trabalho de mestrado.

No Capítulo 2 foram apresentados os conceitos de robótica industrial, centrando a temática nos manipuladores com cadeia cinemática aberta e fechada, principal característica dos robôs seriais e paralelos. De fato, neste capítulo, mostrou-se o modelo estrutural proposto para representar um sistema desse tipo, e sobre o qual foi projetado aplicar as técnicas de confiabilidade definidas dentro da metodologia proposta.

O Capítulo 3, por sua vez, abordou os aspectos fundamentais da confiabilidade, detalhando a técnica de diagrama de blocos (RBD) para orientar a representação confiabilística do robô, sem se preocupar pelas estimativas das probabilidades individuais de cada item. Além disso, foram apresentadas normas técnicas de confiabilidade, as quais orientaram a definição da estrutura na metodologia desenvolvida neste trabalho.

O Capítulo 4 conclui a revisão bibliográfica. Nesse capítulo foi estabelecida a distribuição Weibull biparamétrica como único modelo estatístico de referência, o qual foi usado na metodologia proposta para encaminhar o cálculo das confiabilidades individuais, associadas a cada componentes do modelo estrutural proposto para o robô.

A metodologia para análise de confiabilidade em robôs (MACRoB) foi apresentada no Capítulo 5, mostrando o contexto no qual deve ser aplicada, quer dizer, a MACRoB visa garantir a confiabilidade do robô desde as suas fases de desenvolvimento.

Assim, usou-se o modelo PRODIP para mostrar a relação da MACRoB dentro de um processo de projeto. Isso foi feito para identificar a etapa de desenvolvimento na qual a metodologia desenvolvida propõe se usar, de forma a caracterizar os resultados finais obtidos.

Já uma aplicação da metodologia proposta foi mostrada no Capítulo 6, na qual, com algumas considerações e limitações, foi possível evidenciar as vantagens no uso da metodologia. Assim, na próxima seção será feita uma análise dos resultados obtidos, destacando as contribuições deste trabalho.

## 7.1 RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES

O principal resultado deste trabalho foi uma metodologia para analisar a confiabilidade de sistemas robóticos, tendo como base o modelo estrutural proposto para o sistema em análise, a técnica FMEA, o método de diagrama de blocos e a distribuição Weibull biparamétrica. Os resultados obtidos da metodologia auxiliam o inclusão da confiabilidade, conforme identificado no modelo da MACRoB (Figura32 do Capítulo 5).

Desta forma, a representação do sistema robótico como um modelo estrutural, e posteriormente associado a um modelo funcional, trouxe as seguintes vantagens:

- Apropriado entendimento da relação funcional entre os itens identificados;
- Identificação da lógica de falhas entre os itens do modelo estrutural;
- Flexibilidade para acoplar as informações advindas das fases de desenvolvimento do robô;
- Facilidade na integração das técnicas de confiabilidade usadas na metodologia proposta;
- Obtenção de informações confiabilísticas de relevância, obtidas de maneira individual para cada item.

Nota-se, embora a MACRoB esteja baseada em um modelo estrutural definido, que a metodologia proposta oferece ao projetista a possibilidade de desdobrar ainda mais o sistema robótico, caso as condições do sistema o requeiram.

Destaca-se, também, que a MACRoB fornece os modelos de confiabilidade a serem usados nas estimativas para o robô, facilitando o caminho a ser percorrido pelo projetista na análise do sistema e, em conjunto com a técnica

FMEA, suporta a tomada de decisões que visem o cumprimento das metas de confiabilidade especificadas no requisitos do projeto.

De fato, com base nos resultados obtidos –ou seja, confiabilidade, tempo médio até falha, taxa de falha característica, parâmetro de forma, e levantamento dos modos, causas e efeitos das falhas– é feita a identificação do tipo de ação a ser recomendada.

O processo de tomada de decisões, é um processo autônomo, quer dizer, é resultado da experiência dos projetistas e a equipe de trabalho envolvida no projeto, limitando a metodologia proposta ao fornecimento das informações que fundamentam as decisões.

A metodologia desenvolvida demonstrou, a partir da sua aplicação, que seus resultados tornam-se práticos dentro de um processo de projeto. Assim, com a inclusão do atributo da confiabilidade, desde as fases de desenvolvimento do sistema, pode-se projetar robôs mais atrativos para clientes cada dia mais exigentes e auxilia na caracterização da manutenibilidade do robô.

Portanto, conclui-se que esta dissertação alcançou os objetivos declarados no Capítulo 1. Por outro lado, ainda, limitações foram encontradas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, destacando:

- Os dados de falha são modelados por meio da distribuição Weibull bi-paramétrica. Desta forma, a grande aplicabilidade da distribuição Weibull na área de confiabilidade para itens elétricos, eletrônicos e mecânicos demonstra que é um modelo adequado para analisar estatisticamente as falhas do robô. Caso, deseja-se considerar a melhor distribuição de probabilidade que ajusta os dados coletados, pode-se aplicar o método Kolmogorov–Smirnov (K–S).
- O modelo estrutural proposto integra itens que contextualizam a aplicação do robô, sendo estes os sensores externos e efetuator final. Desta forma, os resultados da metodologia são específicos para o tipo de aplicação que projeta-se para o robô paralelo.

## 7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo desta dissertação foram identificadas algumas linhas de pesquisa para trabalhos futuros, a saber:

- **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional:** A metodologia apresentada neste trabalho, devido a limitações de tempo, foi estruturada para usar métodos matemáticos que encaminham os cálculos da confiabilidade, cujos resultados deverão ser preenchidos manualmente

dentro de uma planilha. Assim, considera-se apropriado integrar todos os conceitos da MACRoB em um *software*, onde o projetista possa se preocupar unicamente pelas entradas requeridas da metodologia, e não como é o modelamento matemático das mesmas para a obtenção de resultados;

- **Considerar a confiabilidade computacional e humana:** No trabalho proposto, não foi abordada as falhas computacionais e erros humanos na operação de um robô. Assim, pesquisas nessa perspectivas podem avaliar o impacto das falhas computacionais e humanas na confiabilidade de sistemas robóticos;
- **Abracar, em base aos princípios da metodologia proposta, a robótica móvel:** O foco principal da metodologia proposta são os sistemas robóticos seriais e paralelos, mas a importância dos robôs móveis na indústria militar sugere novas perspectivas de pesquisa na área de confiabilidade. De fato, o centro de pesquisa de robôs terrestres, criado em 2007 pela Universidade de Michigan, integra os conceitos de confiabilidade na robótica móvel desde as suas fases de desenvolvimento. Assim, podem-se abrir as portas para o intercambio de conhecimento entre NeDIP e o GRRC;
- **Aplicação de outras técnicas de confiabilidade:** A metodologia proposta contempla unicamente as técnicas FMEA, diagrama de blocos RBD e distribuição Weibull. Deste forma, considera-se conveniente explorar outras técnicas como *Causal network event analysis* (CNEA), FTA e redes Bayesianas na análise confiabilística de sistemas robóticos;

## REFERÊNCIAS

ABB GROUP. **Product manual: IRB340**. [S.l.], 2000.

\_\_\_\_\_. **Application manual: DeviceNet**. Suécia, entre 2004 e 2007.

\_\_\_\_\_. **manual del produto: controlador del robot IRC5**. Suécia, entre 2004 e 2010. 342 p.

ALMEIDA, J. C. de. **Uma metodologia de projeto baseada na confiabilidade**: aplicação à redes de distribuição de gás canalizado. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1999.

ANGELES, J. **Fundamentals of Robotic Mechanical Systems**. 3. ed. New York: Springer, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

BACK, N. et al. **Projeto Integrado de Produtos**: planejamento, concepção e modelagem. Barueri, SP: Manole, 2008.

BARABADY, J.; KUMAR, U. Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at jajarm bauxite mine in iran. **Reliability Engineering and System Safety**, Elsevier Science, v. 93, p. 647–653, 2008.

BARRIENTOS, A. **Fundamentos de robótica**. España: Mcgraw–Hill, 1997.

BERTSCHE, B. **Reliability in automotive and mechanical engineering**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 487 p.

BILLINTON, R.; ALLAN, R. **Reliability Evaluation of Engineering Systems**: Concepts and techniques. 2. ed. New York: Plenum press, 1992.

BRANTMARK, H.; HEMMINGSON, E. Flexpicker con pickmaster, una revolucion en las operaciones de toma y dejada. **Revista ABB**, p. 11–19, 2001.

CARLSON, J.; MURPHY, R.; NELSON, A. Follow-up analysis of mobile robot failures. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS & AUTOMATION**. New Orleans: [s.n.], 2004. p. 4987–4994.

DEPARTMENT OF DEFENSE. **definitions of terms for reliability and maintainability**. New York, 1981.

\_\_\_\_\_. **MIL-STD-756B**: Reliability modeling and prediction. New York, 1981.

DHILLON, B. S. **Design reliability**: fundamentals and applications. Boca Raton: CRC Press Llc, 1999.

\_\_\_\_\_. **Reliability, quality, and safety for engineers**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

DIAS, A. **Metodologia para Análise da Confiabilidade em Freios Pneumáticos Automotivos**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 1996.

DIAS, A. **Anotações preliminares sobre fundamentos para estudo de confiabilidade**. Florianópolis, SC: [s.n.], 2010.

DIAS, A. et al. Metodologia para análise de risco: Mitigação da perda de SF6 em disjuntores. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2011. cap. Análise funcional de produtos, p. 99–110.

FERREIRA, V. **Robótica industrial**: Aplicação na indústria de manufatura e de processos. São Paulo: Edgar Blucher, 2002. 280 p.

FLUIPRESS. **Mundo terá 18 milhões de robôs em 2011, diz pesquisa**. 12 nov. 2008.

GAO, J. et al. Fault-tolerant and high reliability space robot design and research. In: **INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS**. Hong Kong: [s.n.], 2008. p. 2413–2417.

HAVIARAS, G. J. **Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais em frotas de caminhões de longa distância**. Dissertação (Mestrado) — Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **STD 1413**: Reliability prediction of hardware. New York, 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: conceitos fundamentais e gerais e termos associados. Rio de Janeiro, 2009.

KAGUEIAMA, H. A. **Sistematização de técnicas de análise de falha no projeto para confiabilidade**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.



KHODABANDEHLOO, K. Analyses of robot systems using fault and event trees: case studies. **Reliability Engineering and System Safety**, Elsevier Science, v. 53, p. 247–267, 1996.

LEUSCHE, M.; WALKER, I.; CAVALLARO, J. Robot reliability through fuzzy markov models. In: **Proc. Annual reliability and maintainability symposium**. [S.l.: s.n.], 1998. p. 209–214.

LOPES, L. F. D. **Análise de componentes principais aplicada à confiabilidade de sistemas complexos**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

LUNA, A. E. **Teoría de confiabilidad**. Fevereiro 2005.

MERLET, J. P. **Parallel Robots**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2006.

PALLEROSI, C. A. **Confiabilidade, os 10 passos para obtê-la**. São Paulo, SP: [s.n.], 2008.

PHUOC, N.; TITUS, J. **Reliability and Failure in Unmanned Ground Vehicle (UGV)**. Michigan: [s.n.], 2009.

SAE. **SAE J1739**: Potential failure mode and effects analysis in design (design fmea), potential failure mode and effects analysis in manufacturing and assembly processes (process fmea), and potential failure mode and effects analysis for machinery (machinery fmea). [S.l.], 2002.

SANTOS, J. V. B. dos. **Contribuições para o projeto de manipuladores paralelos através da síntese do tipo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011.

SHIM, B. et al. A robot fault-tolerance approach based on fault type. In: **International Conference on Quality Software**. Korea: [s.n.], 2009. p. 296–304.

SICILIANO, B. et al. **Robotics: Modeling, planning and control**. London: Springer-verlag, 2009.

TSAI, L.-W. **Robot Analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

WALKER, I.; CAVALLARO, J. Failure mode analysis for hazardous waste clean-up manipulator. **Reliability Engineering and System Safety**, Elsevier Science, v. 56, p. 277–290, 1996.

WEIHMANN, L. **Modelagem e otimização de forças e torques aplicados por robôs com redundância cinemática e de atuação em contato com o meio**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011.

YANG, G. **Life cycle reliability engineering**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 517 p.

ZIO, E. Reliability engineering: Old problems and new challenges. **Reliability Engineering and System Safety**, Elsevier Science, v. 94, p. 125–141, 2009.

## **APÊNDICE A - Distribuições de probabilidade**



## A.1 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

A distribuição que leva o nome de Waloddi Weibull, tem a importante propriedade de não possuir um formato característico (BILLINTON; ALLAN, 1992).

O modelo de Weibull é amplamente utilizado para descrever o tempo de vida de sistemas, os quais estão formados por vários componentes cuja falha ocorre quando um primeiro componente falhar.

De acordo com Haviaras (2006), outro motivo pela preferência por este modelo em aplicações práticas, é o fato da distribuição Weibull ser bastante flexível na descrição de processos aleatórios, permitindo grande variedade de formas. Esta distribuição de probabilidade é a única, entre as analisadas, que pode ser utilizada na descrição de processos que correspondem aos três períodos da curva da banheira.

A função densidade de probabilidade da distribuição Weibull é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{t - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{A.1})$$

Onde

$t$  = Vida, definida na unidade de funcionamento, para  $t > 0$ .

$\beta$  = Parâmetro de forma, para  $\beta > 0$ .

$\alpha$  = Parâmetro de escala ou vida característica, para  $\alpha > 0$ .

$\gamma$  = Parâmetro de localização ou vida inicial, para  $\gamma \geq 0$ .

Nesta forma triparamétrica, a distribuição leva em consideração o período de vida do item, desde a fase unicial de funcionamento (incluindo-se períodos de teste) até o uso efetivo.

Desta forma, o parâmetro de localização caracteriza o período de vida inicial do item, podendo nas aplicações relativas à mecânica ser desconsiderado, ou seja  $\gamma = 0$ , dado que é normalmente muito pequeno quando comparado ao período de vida útil. Para obtê-lo, é preciso muitas vezes dispor de bom senso analítico e um certo grau de experiência em relação ao conhecimento técnico do produto.

Já o parâmetro de escala ou vida característica, indicada na unidade de funcionamento do item em análise, significa o período de vida transcorrido desde o início da atividade até a ocorrência da falha, para itens não reparáveis e o período de vida transcorrido entre falhas, para itens reparáveis. Na prática, é normalmente usada a taxa de falha característica  $\lambda$ , inversamente

relacionado com a vida, assim expresso:  $\lambda = \frac{1}{\alpha}$ .

Por sua vez, o parâmetro de forma é aquele que dá a aparência da distribuição. Assim, quando  $\beta < 1$ , a função densidade de probabilidade da distribuição Weibull diminui muito rapidamente na parte inicial da vida, esse período é chamado de vida inicial ou fase de juventude.

Para  $\beta = 1$ , neste caso a função densidade de probabilidade equivale a função distribuição exponencial. Nessa condição a distribuição Weibull representa o item na fase chamada de vida útil.

No caso de  $1 < \beta < 2$ , tem-se a condição de um rápido aumento da função densidade de probabilidade para curto período de vida. Após, a curva passa a ter uma taxa de crescimento, praticamente constante.

Por último, para valores de  $\beta \geq 2$ , a medida que o parâmetro de forma aumenta a função vai ficando assintótica ao eixo da vida. Isto indica que existem poucas falhas no período inicial da vida e rápido descarte na fase final.

Como pode se perceber, com base no parâmetro  $\beta$ , algumas distribuições de significativa importância para a engenharia, podem ser entendidas como casos particulares da distribuição Weibull. Para o parâmetro de forma  $\beta = 1$ , como já foi mencionado, a distribuição probabilística de Weibull, por exemplo, equivale à distribuição Exponencial; para o caso de  $\beta = 2$ , se aproxima da distribuição de Rayleigh; para  $\beta = 3, 44$ , se aproxima da distribuição Normal ou Gaussiana. No limite, quando  $\beta$  assume valores muito grandes, a função densidade de probabilidade (Equação A.1) tende a concentrar todos os pontos em torno do valor médio. Para esse valor do parâmetro de forma, tem-se perfeitamente definida a posição de descarte dos itens não reparáveis, ou a posição de manutenção para itens reparáveis (DIAS, 1996).

## A.2 DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

A distribuição exponencial se caracteriza por ter uma função de taxa de falha constante, e é a única com esta propriedade. É uma das mais simples em termos matemáticos e extensivamente utilizada como modelo para tempo de vida de produtos eletrônicos (HAVIARAS, 2006)

De acordo com (DIAS, 2010) as justificativas que podem levar ao uso da distribuição exponencial são:

- As técnicas analíticas, particularmente para sistemas grandes, são muito complexas a menos que simplificações sejam feitas. Nesses casos, supor taxa de falha constante e usar a distribuição exponencial, facilita a solução do problema.

- Os dados usados no exercício de avaliação são, frequentemente, muito limitados e insuficientes para verificação correta da distribuição. Diz-se que seria não realístico usar técnicas mais elaboradas dado a pobreza dos dados.

A distribuição exponencial é empregada em casos onde as falhas ocorrem de forma aleatória e sem um considerável mecanismo de desgaste, a função densidade de probabilidade é dada pela Equação A.2

$$f(t) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{t}{\alpha}} \quad (\text{A.2})$$

Sendo

$\alpha$  = Vida característica, para  $\alpha > 0$ ;

$t$  = Variável aleatória para  $t > 0$ .

A vida característica pode representar o tempo médio até a falha. Na prática é mais comum usar a taxa de falha ( $\lambda$ ) no lugar de  $\alpha$ . A conversão de uma para outra é feita pela relação de  $\lambda = \frac{1}{\alpha}$ , ou seja, uma unidade da amostra velha, que ainda não falhou, tem a mesma probabilidade de falhar em um intervalo futuro que uma unidade nova (HAVIARAS, 2006).

Agora, a função densidade de probabilidade, em termos da taxa de falha, é:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{A.3})$$

Desta forma, a função confiabilidade  $R(t)$  está dada pela Equação A.4.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} = e^{-\lambda t} \quad (\text{A.4})$$

Segundo (LUNA, 2005), algumas características da distribuição exponencial são:

- A confiabilidade para um tempo  $t = \frac{1}{\alpha} = \lambda$  é sempre igual a 0,3679. Isso significa que a confiabilidade é relativamente baixa, já que, transcorrido o tempo  $t$ , só o 36,79% dos componentes em análise, por exemplo, vão funcionar.
- A distribuição exponencial tem um único formato de curva, sendo esse, a taxa de falha  $\lambda$ .
- A distribuição começa em  $t = 0$ , onde  $R(t) = 1$ . Quando  $t \approx \infty$ , a função confiabilidade, também, se aproxima a zero.

### A.3 DISTRIBUIÇÃO NORMAL OU GAUSSIANA

Segundo Dias (2010), na confiabilidade, a distribuição normal é usada para analisar a duração de vida de produto na fase de quebra ou no desgaste. Ainda assim, essa distribuição é considerada, de menor importância na análise de confiabilidade. De fato, a função densidade de probabilidade tem uma distribuição perfeitamente simétrica, o que não representa a maioria das distribuições de falha de equipamentos ou sistemas.

Para uma distribuição normal, a forma e a posição da função densidade de probabilidade pode ser especificada somente em termos do valor médio e do desvio padrão. Assim, essa distribuição se independe da função tempo o que gera contradição com a própria definição de confiabilidade.

Na distribuição normal, a função densidade de probabilidade (fdp) é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)} \quad (\text{A.5})$$

Sendo

$\sigma$  = Desvio padrão da população, para  $\sigma > 0$ ;

$t$  = Variável aleatória, para  $-\infty < t < \infty$ ;

$\mu$  = Média da população, para  $-\infty < \mu < \infty$ .

O modelo matemático da Equação A.5 implica que a maioria dos eventos de falha estão ao redor do valor médio ( $\mu$ ) e, o número de falhas diminui simetricamente quando  $x - \mu$  aumenta.

Graficamente, a função densidade de probabilidade de uma distribuição normal tem a forma descrita na Figura 49.

Como a distribuição Normal é simétrica, tem-se que 50% dos valores encontram-se à direita da médio, ou seja,  $\mu$ . Da mesma forma, os restantes 50% estão à esquerda desse parâmetro.

O parâmetro que indica a relação de aspecto da função densidade de probabilidade é a variância (Equação A.6), sendo que quanto maior esse valor, maior será a dispersão da distribuição e mais achatada será a curva fdp.

$$Var[t] = \sigma^2 \quad (\text{A.6})$$

Já a função confiabilidade, definida com base na  $f(t)$ , está dada pela Equação A.7.



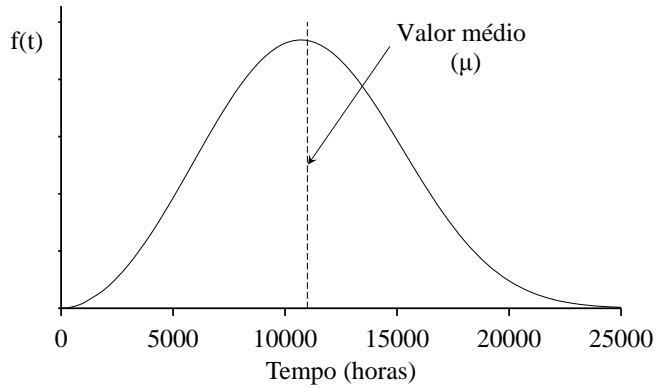


Figura 49 – Função densidade de probabilidade Normal ou Gaussiana

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)} dt \quad (\text{A.7})$$



**APÊNDICE B - Descrição dos componentes do modelo estrutural para  
o robô equivalente**



## B.1 SUBSISTEMA DE MONITORAMENTO DO ROBÔ PARALELO EQUIVALENTE (RPE)

Quadro 15 – Especificações dos componentes no subsistema de monitoramento do RPE

Componentes do subsistema de monitoramento do RPE
<p>Item MON1. Sensores externos</p> <p><b>Função elementar:</b> Fornecer as variáveis do entorno de trabalho, de modo a assegurar a correta interação entre o extremo do robô e superfície de contato, relacionado à aplicação do robô.</p> <p><b>Descrição:</b> Cognex com resolução de 640x480 e uma taxa máxima de aquisição de 60 imagens por segundo. Sensor opto eletrônico de reflexão direta e normalmente aberto, entre suas características mais importantes estão: alcance é de 70 a 300 <i>mm</i>, tensão de funcionamento de 10–36 <i>V</i> DC, frequência máxima de comutação de 1000 <i>Hz</i>, temperatura ambiente de trabalho -25 a + 55 [<i>C</i>], corrente de saída 200 <i>mA</i>, tipo de luz: Vermelha e com possibilidade de ajuste por meio de um potenciômetro</p> <p>Sensor óptico de proximidade:</p>
<p>Item MON2. Sensores internos</p> <p><b>Função elementar:</b> Proporcionar a informação do estado operacional do robô, fundamentalmente os parâmetros de posição, velocidade e torque nas juntas.</p> <p><b>Descrição:</b> Transdutor rotativo, usado para medir a posição das juntas. Requer uma tensão de alimentação de 0-24 <i>V</i>, resolução de 4000 pulsos por revolução.</p>

Quadro 16 – Períodos de falha assumidos para o subsistema de monitoramento do RPE

<p>Componente MON1: Sensores externos.</p> <p><i>Períodos de falha (horas)*:</i> 500 (F); 600 (F); 1500 (F); 2000 (F); 9900 (F); 10021 (F); 10100 (F); 10500 (F); 10773 (F); 11000 (F); 11100 (F); 11500 (F); 11800 (F); 15200 (F); 16000 (F)</p>
<p>Componente MON2: Sensores internos.</p> <p><i>Períodos de falha*:</i> 2100 (F); 3500 (F); 8168 (F); 9320 (F); 9712 (F); 9720 (F); 10056 (F); 10208 (F); 10840 (F); 11632 (F); 12736 (F); 13048 (F); 13520 (F); 14300 (F); 14984 (F)</p> <p>(* Períodos de falha adotados aleatoriamente, ou seja, não são reflexo do comportamento real do RPE)</p>

## B.2 SUBSISTEMA DE CONTROLE DO ROBÔ PARALELO EQUIVALENTE

Quadro 17 – Especificações dos componentes no subsistema de controle do RPE

<p>Especificações dos componentes no subsistema de controle do RPE</p>
<p>Item CON1. Unidades E/S</p>
<p><b>Função elementar:</b> Transferir de forma cíclica os parâmetros do estado operacional e variáveis do entorno de trabalho, parâmetros gerados nos componentes periféricos do robô e processados no hardware de controle.</p>
<p><b>Descrição:</b> A estrutura fundamental deste módulo usa várias unidades de entradas e saídas (E/S) para suportar os sinais digitais e analógicos gerados do manipulador, estas unidades devem ser fornecidas com tensão de 24 V e estão conectadas às placas PCI dos ordenadores no módulo de processamento</p>
<p>Item CON2. Ordenadores e painel de controle</p>
<p><b>Função elementar:</b> Executar as rotinas pré programadas usando as variáveis operacionais, cujas informações obtidas permitem gerenciar o estado operacional do robô.</p>

(continua na próxima página)

Quadro 17 – Especificações dos componentes no subsistema de controle do RPE

(continuação)

---

Componentes do subsistema de controle do RPE

---

**Descrição:** A unidade de ordenadores faz a conexão com os componentes periféricos usando uma placa PCI (*peripheral component interconnect*). A gestão no funcionamento do robô é feita usando o painel de controle e um pacote de software; o painel de controle permite executar programas, realizar movimentos do robô de modo manual e monitorar o funcionamento normal do robô, mas nem todas as funções podem ser estabelecidas desde o painel, a configuração e programação do robô são feitas no produto de software.

---

Quadro 18 – Períodos de falha assumidos para o subsistema de controle do RPE

---

Componente CON1: Módulo de comunicação.

*Períodos de falha (horas)\*:* 1800 (F); 2200 (F); 3500 (F); 7100 (F); 7400 (F); 8000 (F); 8900 (F); 9600 (F); 10200 (F); 10800 (F); 11500 (F); 11600 (F); 13600 (F); 14300 (F); 14500 (F)

---

Componente CON2: Módulo de processamento.

*Períodos de falha (horas)\*:* 2500 (F); 4800 (F); 5500 (F); 7000 (F); 7400 (F); 7700 (F); 8300 (F); 9520 (F); 10010 (F); 10300 (F); 10680 (F); 11000 (F); 11100 (F); 11520 (F); 12240 (F)

(\*) Períodos de falha adotados aleatoriamente, ou seja, não são reflexo do comportamento real do RPE

---

### B.3 SUBSISTEMA MECÂNICO DO ROBÔ PARALELO EQUIVALENTE

Quadro 19 – Especificações dos componentes no subsistema mecânico do RPE

---

Componentes do subsistema mecânico do RPE

---

Item MEC01. Plataforma fixa

**Função elementar:** Fixar a estrutura mecânica do manipulador ao sistemas inercial de referência.

---

(continua na próxima página)

Quadro 19 – Especificações dos componentes no subsistema mecânico do RPE

(continuação)

---

Componentes do subsistema mecânico do RPE

---

**Descrição:** Nenhuma

---

Item MEC02. Juntas

**Função elementar:** Permitir o movimento relativo entre dois elos

**Descrição:** O RPE integra vários tipos de juntas no subsistema mecânico: juntas esféricas dispostas para conectar o elo superior e inferior dos três braços principais e juntas universais conectadas ao braço telescópico ou junta prismática, estas últimas permitem o movimento de rotação do efetuador final

---

Item MEC03. Elos

**Função elementar:** Configurar, a partir do acoplamento com as juntas, as pernas do robô para conectar a plataforma fixa e interface mecânica.

**Descrição:** Três módulos idênticos de braços fabricados de plástico reforçado com fibra de carbono compõem o RPE, os braços estão acoplados de um extremo às caixas de engrenagens do subsistema de atuação e do outro à plataforma fixa. Os dois elementos principais que compõem os braços são: o elo superior e elo inferior, este último usa duas barras seguradas por elementos preensores e a articulação entre os dois elos é feita pelas juntas esféricas.

---

Item MEC04. Interface mecânica

**Função elementar:** Conectar a estrutura mecânica com uma ferramenta final, posicionando-a dentro do espaço de trabalho definido para o robô.

**Descrição:** Nenhuma.

---



---



Quadro 20 – Períodos de falha assumidos para o subsistema de mecânico do RPE

<p>Componente MEC1: Plataforma fixa. <i>Períodos de falha (horas)*</i>:            16900 (F); 18600 (F); 22380 (F); 22488 (F); 23412 (F); 23664 (F);            23820 (F); 23952 (F); 24000 (F); 24048 (F); 24096 (F); 25200 (F);            26280 (F); 26832 (F); 27012 (F)</p>
<p>Componente MEC2: Juntas <i>Períodos de falha*</i>: 13898 (F); 15624 (F);            15750 (F); 15763 (F); 16405 (F); 17086 (F); 17199 (F); 17388 (F);            17615 (F); 17640 (F); 17930 (F); 17980 (F); 18081 (F); 22100 (F);            23000 (F)</p>
<p>Componente MEC3: Elos <i>Períodos de falha (horas)*</i>: 12271 (F);            12526 (F); 12533 (F); 13111 (F); 13252 (F); 13339 (F); 13467 (F);            13494 (F); 14112 (F); 14717 (F); 15000 (F); 21300 (F); 23500 (F);            23500 (F); 27200 (F)</p>
<p>Componente MEC4: Interface mecânica. <i>Períodos de falha*</i>: 19425            (F); 19494 (F); 19800 (F); 19800 (F); 20400 (F); 20500 (F); 21600 (F);            22200 (F); 24100 (F); 25253 (F); 25382 (F); 26270 (F); 27600 (F);            27621 (F); 29008 (F)</p>
<p>(*) Períodos de falha adotados aleatoriamente, ou seja, não são reflexo do comportamento real do RPE</p>

#### B.4 SUBSISTEMA EFETUADOR DO ROBÔ PARALELO EQUIVALENTE

Quadro 21 – Especificações do componente no subsistema de efetuador do RPE

<p>Item–EFE01. Efetuador pneumático</p> <p><b>Função elementar:</b> Executar a tarefa final do robô no seu contexto de aplicação.</p> <p><b>Descrição:</b> O sistema de vácuo pneumático integra ejetor, válvulas e filtros. A pressão do sistema é de 4–6 <i>bar</i>, entanto que pode consumir 270–2380 litros por minuto, o nível de vácuo máximo gerado é de 0.9 <i>bar</i>.</p>
--

## Quadro 22 – Períodos de falha assumidos para o subsistema efetuator do RPE

---

---

Componente EFE1: Efetuator final.

*Períodos de falha (horas)\** : 1250 (F); 1610 (F); 2560 (F); 2640 (F);  
2740 (F); 3830 (F); 4520 (F); 5160 (F); 5200 (F); 5520 (F); 5540 (F);  
5860 (F); 6190 (F); 6450 (F); 7370 (F)

(\*) Períodos de falha adotados aleatoriamente, ou seja, não são reflexo do comportamento real do RPE

---

---

**APÊNDICE C - Confiabilidade dos itens do modelo estrutural do robô  
paralelo equivalente**



## C.1 COMPONENTES DO SUBSISTEMA DE MONITORAMENTO

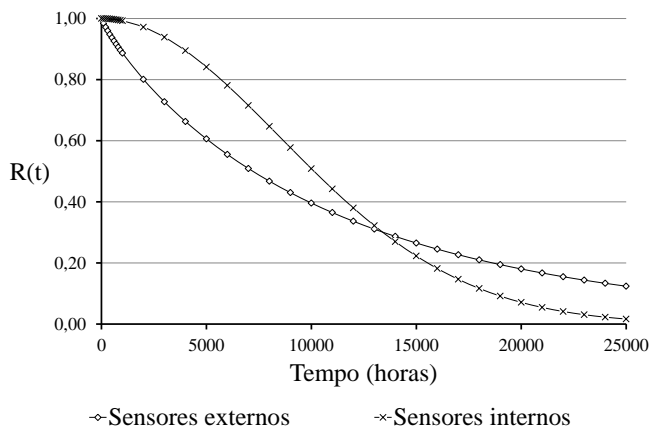


Figura 50 – Confiabilidade dos componentes do subsistema de monitoramento do RPE

## C.2 COMPONENTES DO SUBSISTEMA DE CONTROLE

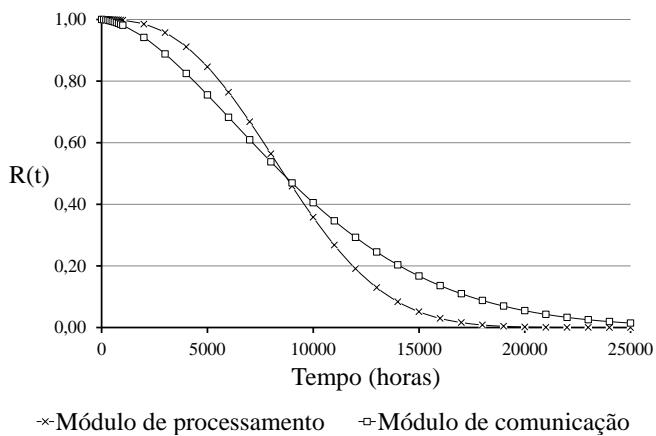


Figura 51 – Confiabilidade dos componentes do subsistema de controle do RPE

### C.3 COMPONENTES DO SUBSISTEMA DE ATUAÇÃO

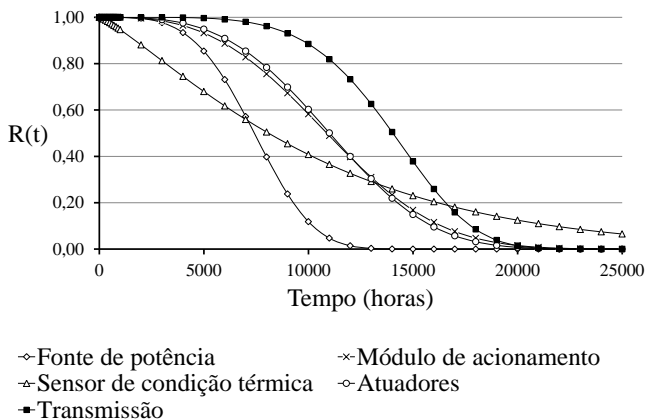


Figura 52 – Confiabilidade dos componentes do subsistema de atuação do RPE

### C.4 COMPONENTES DO SUBSISTEMA MECÂNICO

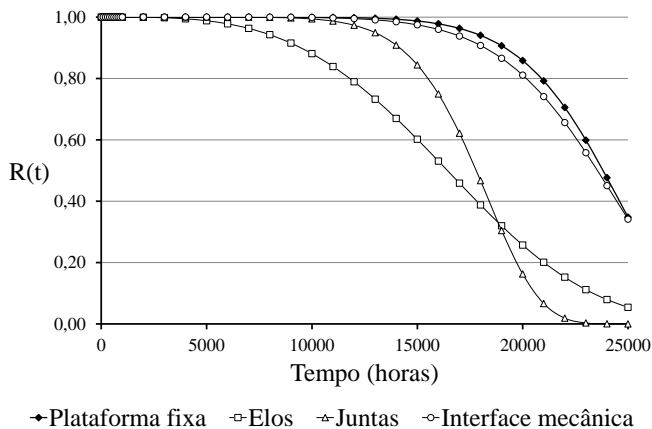


Figura 53 – Confiabilidade dos componentes do subsistema mecânico do RPE

### C.5 COMPONENTES DO SUBSISTEMA EFETUADOR

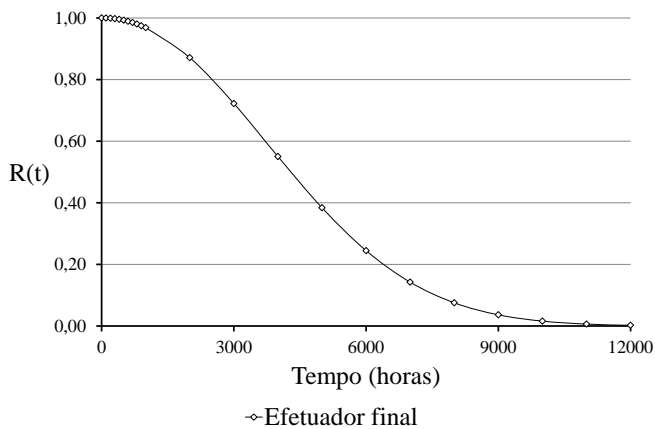


Figura 54 – Confiabilidade dos componentes do subsistema efetuator do RPE

### C.6 SUBSISTEMAS DO ROBÔ PARALELO EQUIVALENTE

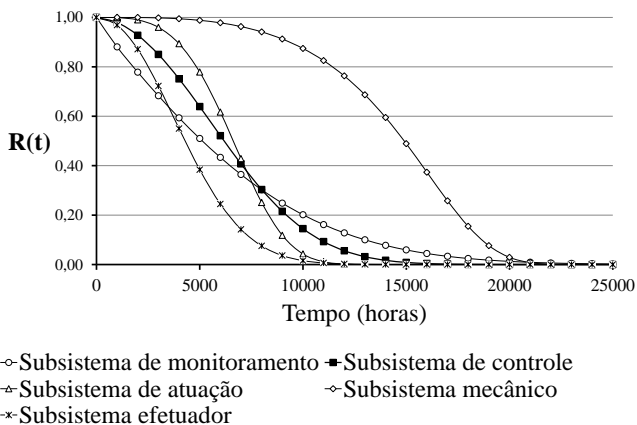


Figura 55 – Confiabilidade dos subsistemas do RPE





**APÊNDICE D - Resultados da técnica FMEA do robô paralelo  
equivalente**



## D.1 SUBSISTEMA DE MONITORAMENTO

Quadro 23 – FMEA para o subsistema de monitoramento do RPE

Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
Sensores internos / Fornecer parâmetros de posição velocidade e torque	Saídas zero	Robô sem movimento	Circuitos eletrônicos da câmara CDC 50 com defeitos.	Nenhum
			Dispositivo sem tensão	Nenhum
	Saídas erradas	Velocidades e torques incorretos	Sensores de velocidade e torque com defeitos	Nenhum
Sensores externos / Detectar as caixas na banda central	Sem detecção de caixas na banda central	Embalagem do produto sem sucesso	Circuito eletrônico emissor do feixe de luz defeituoso	Nenhum
			Sensor sem tensão	

## D.2 SUBSISTEMA DE CONTROLE

Quadro 24 – FMEA para o subsistema de controle do RPE

Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
Módulo de comunicação / Transferir informação entre os componentes de controle	Queda na comunicação do sistema de controle com o RPE	Manipulador não responde à execução de rotinas de movimento estabelecidas	Ruptura dos cabos de sinal ou potência	Nenhum
			Fonte de alimentação das unidades de E/S não fornece tensão.	Nenhum
			Alguma ou todas as unidades E/S danificadas.	Nenhum
Módulo de processamento / Executar as rotinas pré programadas gerenciando os parâmetros do robô	Não é possível executar as rotinas do robô	O manipulador não responde às rotinas estabelecidas	Queima dos ordenadores	Nenhum
			Curto-circuito nas placas PCI	Nenhum

(continua na próxima página)

Quadro 24 – FMEA para o subsistema de controle do RPE

(continuação)				
Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
	Não existe uma interface com o usuário	O painel de controle não responde	Defeitos nos circuitos eletrônicos do painel de controle	Nenhum

## D.3 SUBSISTEMA MECÂNICO

Quadro 25 – FMEA para o subsistema mecânico do RPE

Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
Elos / Conectar a plataformas fixa á interface mecânica	Perda da conexão entre itens	Desacople dos braços	Fratura	Nenhum
			Molas defeituosas	
Juntas / Permitir os movimentos relativos entre os braços	Restrição mecânica de movimento entre o elo superior e inferior dos braços 1-2-3	Braços do RPE estáticos	Deformação	Nenhum
			Fratura	Nenhum
	Restrição mecânica no movimento do braço telescópico	Junta prismática sem movimento	Deformação	Nenhum
			Fratura	Nenhum

(continua na próxima página)

Quadro 25 – FMEA para o subsistema mecânico do RPE

(continuação)				
Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
Interface mecânica / Acoplar e posicionar um efetuador final.	Não acopla um efetuador final	O efetuador final se desprende.	Fratura nos componentes de fixação	Nenhum

## D.4 SUBSISTEMA EFETUADOR

Quadro 26 – FMEA para o subsistema efetuador do RPE

Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
Efetuator final / Gerar a sucção apropriada para reter o produto desde a banda lateral até a caixa de embalagem na banda central	Não gera sucção suficiente	O produto não é deslocado de uma banda transportadora a outra.	Filtro de ar obstruído	Nenhum
			Pressão de vácuo baixa	Nenhum
			Falhas nas válvulas	Nenhum
			Ejetor obstruído	Nenhum

(continua na próxima página)

Quadro 26 – FMEA para o subsistema efetuator do RPE

(continuação)				
Componente / Função	Modo de falha	Efeito	Causa	Controles
	Gera alta sucção	Produto danificado	Pressão de vácuo excessiva	Nenhum