

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 878

**AVALIAÇÃO, POR MEIO DA METODOLOGIA FUZZY, DA CONFIABILIDADE DE
SISTEMAS DE ACIONAMENTO SUBMETIDOS A FATORES DE ESTRESSE
AMBIENTAIS**

Frederico Augusto Lopes Souza

DATA DA DEFESA: 04/08/2015

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**AVALIAÇÃO, POR MEIO DA METODOLOGIA FUZZY, DA
CONFIABILIDADE DE SISTEMAS DE ACIONAMENTO
SUBMETIDOS A FATORES DE ESTRESSE AMBIENTAIS**

Frederico Augusto Lopes Souza

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Helder de Paula

Belo Horizonte - MG

Agosto de 2015

S337a

Souza, Frederico Augusto Lopes.

Avaliação, por meio da Metodologia *Fuzzy*, da confiabilidade de sistemas de acionamento submetidos a fatores de estresse ambientais [manuscrito] / Frederico Augusto Lopes Souza. – 2015.
133 f., enc.: il.

Orientador: Helder de Paula.

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

Apêndices: f. 99-133.

Bibliografia: f.93-98.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Motores – Aspectos ambientais - Teses. 3. Confiabilidade (Engenharia) - Teses. 4. Sistemas difusos - Teses. I. Paula, Helder de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

**"Avaliação, por Meio da Metodologia Fuzzy, da
Confiabilidade de Sistemas de Acionamento Submetidos
a Fatores de Estresse Ambientais"**

Frederico Augusto Lopes Souza

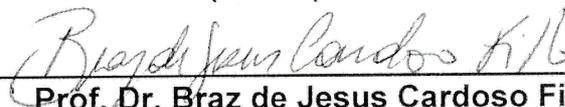
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 04 de agosto de 2015.

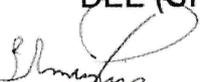
Por:



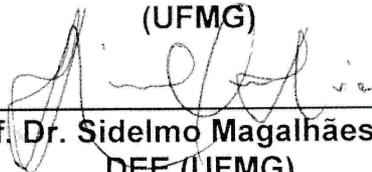
Prof. Dr. Helder de Paula
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Igor Amariz Pires
(UFMG)



Prof. Dr. Sidelmo Magalhães Silva
DEE (UFMG)



Profa. Dra. Lane Maria Rabelo Baccarini
Depto. de Engenharia Elétrica (UFSJ)

Agradecimentos

Quero expressar meu profundo e sincero agradecimento, primeiramente, a Deus, que me permitiu ter a capacidade para fazer este trabalho. E, em seguida, minha eterna gratidão aos meus pais: Raimundo e Beatriz, e irmãos: Marina e Rodrigo pelo amor, respeito, carinho, compreensão e apoio constante em todas as decisões importantes da minha vida.

Ao meu orientador, professor Hélder de Paula, agradeço a grande oportunidade que me deu para realizar este trabalho e a disposição para trabalhar comigo, além de sua confiança, amizade, respeito e preocupação em todo momento.

Agradeço a minha namorada Thaís Cristina, a compreensão, todo o apoio, incentivo e principalmente a paciência nos momentos em que tive que me ausentar para a elaboração deste trabalho.

Ao amigo Samir, os conselhos e incentivos durante a pesquisa.

Agradeço de maneira muito especial à D. Vânia, as muitas atribuições que tem em minha vida: amiga, conselheira, professora; enfim, agradeço-a ter se tornado essa “mãezona”.

A Universidade Federal de Minas Gerais, agradeço sua excelente qualidade acadêmica.

A todos os amigos, professores e funcionários do PPGEE, pela prestatividade e paciência constante em nossas conversas acadêmicas e particulares.

A todas as amigas que tive a oportunidade de fazer em Belo Horizonte durante o período da elaboração desta pesquisa.

RESUMO

Este trabalho apresenta contribuições ao estudo da confiabilidade de sistemas de acionamentos constituídos por motores de indução acionados por conversores de frequência. Considera a influência dos aspectos ambientais nas taxas de falhas de componentes do sistema. Caracteriza os efeitos físico-químicos dos componentes eletrônicos quando expostos a ambientes adversos, tais como: vibração, poeira, umidade, elevadas temperaturas, dentre outros e como esses efeitos podem reduzir a vida útil do componente. Também é apresentada uma compilação dos resultados de uma pesquisa sobre diferentes normas de predição de confiabilidade e normas de classificação ambiental, fazendo-se uma análise crítica e comparativa entre as diferentes técnicas, metodologias e aplicações de cada norma estudada. Um método para corrigir as taxas de falhas de componentes eletrônicos, devido à influência dos aspectos ambientais, também é proposto neste trabalho. Para isso, um Sistema baseado em Regra *Fuzzy* é utilizado, possibilitando, assim, a análise da confiabilidade de forma mais coerente e precisa. Por fim, é apresentado o exemplo de um sistema de acionamento de baixa tensão cujas principais figuras de mérito sobre a confiabilidade são determinadas e discutidas quando o mesmo é submetido a ambientes hostis – mineração, marítimo (extração de petróleo) e siderurgia.

Palavras-chave: Confiabilidade, taxa de falha, influência de fatores ambientais, sistema baseado em regra *fuzzy*, sistema de acionamento de motores.

ABSTRACT

This work presents contributions to the study of the reliability of drive systems constituted by induction motors driven by frequency converters as well as considering the influence from environmental aspects on the failure rates of a system components, therefore characterizing the physical-chemical effects which occur when electronic components are exposed to harsh environment such as vibration, dust, humidity, high temperatures, among others, and how those effects can reduce the component useful life. Herewith it is also presented a compilation of the results of a wide and deep research on the different reliability prediction standards, as well as on of environment classification standards, by means of a critical and comparative analysis of different techniques, methodologies and applications of each standard under study. A method for correcting the failure rates of electronic components, due to environmental aspects influence, is also presented in this work. Aiming at that, a *Fuzzy Rule Based System* is used, therefore making it possible for a reliability analysis by means of a more coherent and precise way. At last, an example is presented of a low-voltage drive system whose main merit figures of reliability are determined and discussed when that system is under harsh environment – mining, maritime (oil extraction), and steel processing.

Keywords: Reliability, Failure Rate, Environment Factor Influence, *Fuzzy Rule Based System*, Motor Drive System.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1: Conversor típico com modulação SV-PWM [31].</i>	34
<i>Figura 2.2: Confiabilidade do conversor – Sem estresse ambiental.</i>	36
<i>Figura 2.3: Confiabilidade do conversor – Temperatura Elevada.</i>	37
<i>Figura 2.4: Confiabilidade do conversor – Umidade.</i>	39
<i>Figura 2.5: Confiabilidade do conversor – Vibração.</i>	40
<i>Figura 2.6: Confiabilidade do conversor – Areia e poeira.</i>	41
<i>Figura 3.1: Esquema da aplicação das normas/lógica fuzzy.</i>	48
<i>Figura 3.2: Sistema Baseado em Regra Fuzzy (SBRF) aplicada ao problema da influência do ambiental sobre os componentes eletrônicos.</i>	52
<i>Figura 3.3: Função de pertinência “médio” da variável Temperatura Alta.</i>	53
<i>Figura 3.4: Função de pertinência - Temperatura Alta.</i>	55
<i>Figura 3.5: Função de pertinência - Fator de Estresse Ambiental.</i>	56
<i>Figura 4.1: Sistema de acionamento do motor.</i>	74
<i>Figura 4.2: Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Ambiente sem estresse.</i>	79
<i>Figura 4.3: Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Mineração.</i>	81
<i>Figura 4.4: Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Marítimo.</i>	81
<i>Figura 4.5: Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Siderurgia.</i>	82
<i>Figura 4.6 Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Todos os ambientes.</i>	82
<i>Figura A.1: Curva da Banheira [46].</i>	110
<i>Figura A 2: Sistema com redundância passiva.</i>	118
<i>Figura B.1: Função de pertinência (1) trapezoidal (2) triangular (3) gaussiano e (4) curva Bell-shaped.</i>	123

<i>Figura B. 2: Função de pertinência, variável linguística e termos linguísticos [50].</i>	125
<i>Figura B.3:Implicação Fuzzy Produto Aplicado a uma Regra [50].</i>	128
<i>Figura B.4:Implicação Fuzzy Mínimo Aplicado a uma Regra [50].</i>	128
<i>Figura B.5:Representação Gráfica do Procedimento de Inferência [50].</i>	130
<i>Figura B.6: Estrutura Fuzzy [55].</i>	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Fatores ambientais típicos [24].	21
Tabela 2-2: Principais efeitos de ambientes adversos [24].	22
Tabela 2-3: Número de componentes eletrônicos	34
Tabela 2-4: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Ambiente sem estresse.	35
Tabela 2-5: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Temperatura Elevada.	37
Tabela 2-6: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Umidade.	38
Tabela 2-7: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Vibração.	39
Tabela 2-8: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Areia e Poeira.	41
Tabela 2-9: Figuras de mérito - Conversor de frequência.	42
Tabela 3-1: Classificação ambiental segundo a IEC 60721 para o estresse mecânico.	54
Tabela 3-2: Fator de Ponderação para o Fator de Estresse Ambiental.	58
Tabela 3-3: Fatores de estresse presentes nos ambientes adversos analisados.	59
Tabela 3-4: Taxa de falhas [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema.	60
Tabela 3-5: Ajuste do ambiente com umidade de forma a aproximá-lo daquele definido pela MIL-HDBK-217F.	65
Tabela 3-6: Figuras de mérito - Conversor de frequência.	69
Tabela 4-1: Taxa de falha utilizada para estimar a confiabilidade do sistema de acionamento do motor – Sem estresse ambiental.	76
Tabela 4-2: Fator de estresse devido aos ambientes adversos.	78
Tabela 4-3: Taxa de falha – Ambiente adverso.	80

Tabela 4-4: Figuras de mérito – Sistema de Acionamento do Motor..... 84

Tabela A-1: Exemplos de distribuições estatísticas utilizadas em confiabilidade 113

TRABALHOS PUBLICADOS

1. SOUZA, F. A. L.; PAULA, H.; ROCHA, A. V.; CARDOSO FILHO, B. J. **Estudo Preliminar da Confiabilidade do Sistema de Acionamento de Motores por Meio de Transmissão CC: Influência de Fatores Ambientais.** In: 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2012, Fortaleza-CE, 2012.
2. SOUZA, F. A. L.; PAULA, H.; CARDOSO FILHO, B. J.; ROCHA, A. V.; LOBATO, G. I.C. **Influence of Environmental Factors on the Reliability of Electronic Components Used in Motor Drive Systems.** In: 12th Brazilian Power Electronics Conference – COBEP 2013, Gramado-RS, 2013.
3. SOUZA, F. A. L.; PAULA, H.; PEREIRA, P. C. T.; ROCHA, A. V.; CARDOSO FILHO, B. J. **Motor Drive Systems Reliability: Impact of the Environment Conditions on the Electronic Component Failure Rates.** In: IEEE Industry Applications Society Annual Meeting – IAS 2014, Vancouver (Canadá), 2014.
4. SOUZA, F. A. L.; PAULA, H.; ROCHA, A. V.; CARDOSO FILHO, B. J. **Estudo da Influência Ambiental na Confiabilidade de Acionamento de Motores por meio de Sistema Baseado em Regra *Fuzzy*.** In: 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2014, Juiz de Fora-MG, 2014.
5. SOUZA, F. A. L.; PAULA, H.; ROCHA, A. V. **Influence of Environmental Aspects upon the Reliability of Motor Drive Systems: Evaluation Based on Fuzzy Rules.** In: 50th Industry Applications Society Annual Meeting – IAS 2015, Dallas-TX (Estados Unidos), 2015.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
TRABALHOS PUBLICADOS	vii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 - OBJETIVOS.....	3
1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
CAPÍTULO 2 - INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS NA CONFIABILIDADE DE COMPONENTES ELETRÔNICOS.....	6
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	6
2.2 - INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS AMBIENTAIS NA TAXA DE FALHA DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS	6
2.2.1 - <i>Temperatura</i>	9
2.2.2 - <i>Vibração e Choques Mecânicos</i>	11
2.2.3 - <i>Umidade e Ambiente Salino</i>	13
2.2.4 - <i>Areia e Poeira</i>	15
2.2.5 - <i>Radiação Eletromagnética e Nuclear</i>	16
2.2.6 - <i>Considerações sobre os Agentes Ambientais e as Normas de Predição de Confiabilidade</i>	17
2.2.7 - <i>Outros fatores ambientais</i>	21
2.3 - NORMAS: PREVISÕES DA TAXA DE FALHA	24
2.3.1 - <i>MIL-HDBK-217F</i>	26
2.3.2 - <i>Telcordia SR332 (Antiga Bellcore TR332)</i>	28
2.3.3 - <i>IEC TR 62380</i>	29
2.3.4 - <i>FIDES</i>	31
2.3.5 - <i>IEC 61709</i>	32

2.4 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO	33
2.4.1 - Exemplo 1: Ambiente sem estresse ambiental	35
2.4.2 - Exemplo 2: Temperatura elevada.....	36
2.4.3 - Exemplo 3: Umidade	38
2.4.4 - Exemplo 4: Vibração	39
2.4.5 - Exemplo 5: Areia e poeira.....	40
2.4.6 - Análise dos Resultados	41
2.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
CAPÍTULO 3 - APLICAÇÃO DA TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY PARA ESTIMAR A	
CONFIABILIDADE	46
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	46
3.2 - MOTIVAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO PARA A ESCOLHA DO MÉTODO FUZZY.....	47
3.3 - SISTEMA BASEADO EM REGRA FUZZY (SBRF)	49
3.4 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO	58
3.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO MÉTODO DESENVOLVIDO	61
3.5.1 - Ambiente sem estresse ambiental	61
3.5.2 - Temperatura elevada.....	62
3.5.3 - Umidade	64
3.5.4 - Vibração.....	66
3.5.5 - Areia e Poeira.....	68
3.5.6 - Considerações Gerais.....	69
3.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
CAPÍTULO 4 - CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DE MOTOR: EXEMPLOS	
DE APLICAÇÃO	72
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	72
4.2 - DETALHAMENTO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO ANALISADO	73
4.3 - AMBIENTE SOB ESTUDO	77
4.4 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	79
4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	93
APÊNDICE A - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE CONFIABILIDADE	99
A.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	99
A.2 - INTRODUÇÃO	99
A.3 - CONCEITOS BÁSICOS SOBRE CONFIABILIDADE.....	100
A.4 - DISCUSSÕES SOBRE OS PRINCIPAIS CONCEITOS BÁSICOS DE CONFIABILIDADE	106
<i>A.4.1 - Confiabilidade e falha.....</i>	<i>107</i>
<i>A.4.2 - Taxa de Falhas e MTBF.....</i>	<i>108</i>
<i>A.4.3 - Curva da banheira e MTTF</i>	<i>109</i>
<i>A.4.4 - Distribuições Estatísticas.....</i>	<i>112</i>
<i>A.4.4.1 - Distribuição Exponencial</i>	<i>114</i>
<i>A.4.4.2 - Distribuição de Weibull</i>	<i>115</i>
A.5 - SISTEMAS REDUNDANTES	116
<i>A.5.1 - Redundância Ativa</i>	<i>117</i>
<i>A.5.2 - Redundância Passiva</i>	<i>118</i>
A.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
APÊNDICE B - TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY	120
B.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	120
B.2 - CONJUNTOS FUZZY	121
<i>B.2.1 - Função Característica.....</i>	<i>122</i>
<i>B.3.2 - Função de Pertinência</i>	<i>122</i>
<i>B.3.3 - Centro e Núcleo do Conjunto Fuzzy.....</i>	<i>123</i>
<i>B.3.4 - União, Intersecção e Complemento de Conjuntos Fuzzy.....</i>	<i>124</i>
B.4 - VARIÁVEL LINGUÍSTICA	124
<i>B.4.1 - Proposições Fuzzy.....</i>	<i>125</i>
<i>B.4.2 - Fuzzificação</i>	<i>126</i>
<i>B.4.3 - Relação Fuzzy</i>	<i>126</i>

B.5 - BASE DE REGRAS FUZZY	126
B.6 - MECANISMOS DE INFERÊNCIA.....	127
<i>B.6.1. Agregação Max-Min.....</i>	<i>129</i>
B.7 - DEFUZZIFICAÇÃO.....	130
B.8 - ESTRUTURA DO MÉTODO FUZZY	131
B.9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	133

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - Considerações Gerais

O acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é um assunto de extrema importância econômica. Segundo [1], o setor industrial brasileiro consome cerca de 40% da energia elétrica do país, sendo que dois terços dessa energia são utilizados por sistemas motrizes. O elevado consumo relacionado a tais sistemas torna a força motriz o principal alvo de atuação dos programas de eficiência energética voltados para o segmento industrial. Além da melhoria da eficiência, os processos industriais requerem investimentos na sua confiabilidade, pois qualquer falha no sistema motriz geralmente ocasiona a paralisação total ou parcial da produção, com consequências econômicas críticas, podendo atingir vários milhões de reais de prejuízo [2- 4].

Devido à crescente complexidade dos sistemas de acionamento de motores empregados atualmente, aliada às elevadas exigências de condições operativas, ao alto grau de automação e ao requisito da continuidade de serviço dos conversores, tem-se que o estudo da confiabilidade desses sistemas deve ser considerado de forma criteriosa. Segundo [5], em termos gerais, a confiabilidade estuda os métodos que devem ser adotados nas fases de planejamento, projeto, fabricação, recepção, transporte e operação de componentes ou sistemas, de modo a assegurar o máximo de eficiência, segurança e economia. Nesse tocante, esta dissertação busca apresentar métodos para a estimação da confiabilidade do sistema de acionamento por meio de conversores de frequência. Em [6], são apresentados dois setores

industriais que ratificam a importância do estudo da confiabilidade: extração de petróleo e mineração. Em tais aplicações, a questão da confiabilidade se mostra especialmente importante, pois, tal como demonstrado em [7, 8] é conveniente manter o inversor o mais próximo possível dos motores de forma a se evitar problemas causados por ondas PWM trafegando em cabos longos.

No setor de óleo e gás, a exploração em águas profundas é realizada distante da costa e com difícil acesso aos equipamentos empregados; dessa maneira, a continuidade de serviço dos conversores precisa ser garantida, por necessidades do processo e dificuldades da manutenção do mesmo. Já na indústria de mineração, grandes transportadores de correia são utilizados, pois é o meio mais eficiente e econômico para o transporte de minerais e cargas pesadas das minas para outros destinos [9]; entretanto, a parada do conversor por uma falha normalmente implica na parada de todo o sistema de transporte.

Seja no setor de extração de petróleo, de mineração ou em qualquer outro importante setor da economia que empregue conversores eletrônicos, a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos são consideradas questões críticas [6]. Além disso, conforme foi discutido em [7, 8], ao se instalar o inversor próximo ao motor, esse fica submetido ao mesmo ambiente desse último, que em muitas situações é hostil e de difícil acesso, o que pode, respectivamente, degradar sua vida útil e dificultar sua manutenção. Desta forma, a confiabilidade deve ser avaliada criteriosamente; em outras palavras, deve-se avaliar qual é a taxa de falhas esperada do inversor quando o mesmo encontra-se submetido a um conjunto de fatores de estresse de natureza ambiental, como salinidade, umidade, vibração, temperatura excessiva e outros.

Em face ao exposto, percebe-se que o estudo da confiabilidade do sistema de acionamento de motores submetido a ambientes hostis mostra-se bastante abrangente ao

envolver diferentes temas, dentre as quais podem-se citar: determinação de taxas de falhas de componentes eletrônicos, conhecimento do potencial de degradação de fatores ambientais, configurações empregadas no conversor de frequência, dentre outros. Neste contexto, pretende-se, ao longo da elaboração deste trabalho, agregar contribuições ao tema em questão.

1.2 - Objetivos

O propósito geral deste trabalho é o de apresentar uma metodologia para estimar a confiabilidade de sistemas de acionamento de motores elétricos, quando o mesmo é submetido a fatores de estresse ambiental.

No âmbito dessa proposta, o presente trabalho apresenta as seguintes contribuições:

- Compilar os resultados de uma pesquisa sobre diferentes normas de confiabilidade (predição e classificação ambiental), comparando técnicas e metodologias dessas e mostrando de forma crítica as aplicações e abrangência de cada norma estudada;
- Apresentar os principais fatores físico-químicos existentes em ambientes industriais e que potencialmente podem degradar os componentes eletrônicos, discutindo como esses interferem em sua vida útil;
- Proporcionar ao leitor um entendimento mais amplo e aplicado dos conceitos de confiabilidade, tornando-os mais compreensíveis à comunidade da eletrônica de potência, máquinas elétricas e acionamentos elétricos. Para isso, são apresentados

exemplos didáticos de aplicação envolvendo conversores, cujas principais figuras de mérito são estimadas por meio de normas de predição de taxas de falhas;

- Normas/manuais de predição de taxas de falhas, de forma geral, não contemplam de maneira adequada os aspectos ambientais, sendo que muitas vezes são necessárias aproximações que podem levar a análises demasiadamente subjetivas ou a erros na determinação das taxas de falhas. Nesse sentido, é proposto um método, por meio de um Sistema Baseado em Regra *Fuzzy* (SBRF), para reduzir tal subjetividade, possibilitando, assim, a análise da confiabilidade de forma mais coerente e exata;
- Modelagem e simulação dos índices de confiabilidade de um sistema de acionamento de motor de indução trifásico quando o mesmo é submetido a ambientes sujeitos a estresses ambientais, mais especificamente, de mineração, marítimo e siderurgia.

1.3 - Organização do Texto

Uma análise dos efeitos que podem prejudicar a vida útil de componentes eletrônicos devido fatores ambientais adversos (temperatura, vibração e umidade, por exemplo) é apresentada no Capítulo 2. As causas potenciais de defeito preliminarmente estabelecidas foram inicialmente discutidas de forma teórica e, num segundo momento, apresentada na forma de uma compilação sobre diferentes normas/manuais de predição de confiabilidade e normas de classificação ambiental, acompanhada de uma análise crítica e comparativa entre as diferentes técnicas, metodologias e aplicações de cada norma. Por fim, é realizada a simulação dos índices de confiabilidade de conversor de frequência, cujas principais figuras de mérito são apresentadas e discutidas.

A aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy* para se estimar confiabilidade é apresentada no Capítulo 3, no qual propõe-se um método para melhor definir o fator de estresse ambiental para ambientes adversos, utilizando um sistema baseado em regra *fuzzy* que contempla não só as normas de predição de taxa de falhas, mas também as normas apropriadas para classificação ambiental e os efeitos físico-químicos que podem provocar a degradação dos componentes eletrônicos utilizados no sistema de acionamento de motores elétricos. A metodologia proposta nesse capítulo se mostra uma boa alternativa, motivo de sua escolha para ser implementada no Capítulo 4.

No Capítulo 4 é apresentado um estudo de casos com o objetivo de avaliar a confiabilidade de um sistema de acionamento de baixa tensão quando aplicado em ambientes hostis (aplicações em sistemas de mineração, marítimo e siderurgia).

No Capítulo 5 são sintetizadas as conclusões apresentadas em cada capítulo, de modo a facilitar uma visão global do trabalho executado, apresentando-se também propostas de trabalhos futuros.

Finalmente, o Apêndice A apresenta uma síntese dos conceitos básicos acerca da confiabilidade, assim como as principais figuras de mérito; já o Apêndice B descreve alguns conceitos sobre a teoria dos conjuntos *fuzzy*.

CAPÍTULO 2

INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS NA CONFIABILIDADE DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

2.1 - Considerações Iniciais

O presente capítulo disserta sobre os efeitos físico-químicos que ocorrem quando componentes eletrônicos são expostos a ambientes adversos em que se encontram: vibração, poeira, umidade, elevadas temperaturas, dentre outros, e como tais efeitos podem reduzir a vida útil do componente.

Uma pesquisa sobre normas de predição de confiabilidade é apresentada nesse capítulo, mostrando as principais características do ponto de vista das metodologias, aplicações e técnicas utilizadas em cada uma destas. Além disso, são utilizados exemplos numéricos para que o leitor tenha um melhor entendimento sobre a metodologia utilizada naquelas normas, fazendo-se comparações entre elas conforme os diferentes aspectos ambientais a que são submetidos os equipamentos.

2.2 - Influência dos Aspectos Ambientais na Taxa de Falha de Equipamentos Eletrônicos

Em termos gerais, a confiabilidade é a capacidade que um sistema ou componente tem de desempenhar as funções exigidas nas condições estabelecidas, por um determinado

período de tempo [4, 10, 11]. Sabe-se que, ao se projetar um equipamento, deve-se levar em conta o ambiente no qual ele estará inserido, com relação às condições operacionais dos elementos nele existentes. Cada item do equipamento possui sua própria taxa de falha baseada em suas condições de operação; entretanto, tais itens apresentam diferenças quando as condições ambientais são modificadas, já que cada componente pode ser mais ou menos influenciado por uma determinada condição ambiental ou operacional adversa [12]. Dessa maneira, todos os aspectos do ambiente de uso a que o item ou equipamento será exposto e que podem influenciar a probabilidade de fracasso devem ser contemplados ao se analisar a confiabilidade. Por exemplo, conversores de frequência devem ser projetados para que as especificações de confiabilidade sejam atendidas [13]. Entretanto, estimar a confiabilidade do conversor e comparar com topologias alternativas não é uma tarefa trivial, devido à complexidade do sistema, tecnologia empregada, qualidade dos componentes, estresses elétricos e ambientais a que os componentes podem estar submetidos, etc.; enfim, são diversos os fatores que interferem nos índices de confiabilidade de um sistema.

É importante destacar que no sistema de acionamento de motores o conversor de frequência se encontra em gabinetes apropriados, construídos em locais cujos fatores ambientais adversos podem ser controlados, ou seja, os componentes eletrônicos são protegidos desses fatores, e o elemento submetido ao estresse ambiental é o gabinete. Entretanto pode haver situações em que a blindagem dos componentes eletrônicos seja apenas parcial, por exemplo, as aplicações mencionadas no Capítulo 1. Nessas situações, deve-se analisar a viabilidade, do ponto de vista da confiabilidade, do sistema inserido em um ambiente hostil. Nesse sentido, normas para previsões da taxa de falha [13-16] são úteis para diversas atividades na fase de concepção de equipamentos eletrônicos, pois permitem avaliar se as metas de confiabilidade podem ser alcançadas; identificar potenciais pontos fracos do projeto;

comparar projetos alternativos; avaliar projetos e analisar seu ciclo de vida; fornecer dados para a confiabilidade do sistema e análise de disponibilidade; planejar estratégias de apoio logístico e estabelecer objetivos para testes de confiabilidade [17].

Existem diversas normas [13-16] para a predição da taxa de confiabilidade de equipamentos eletrônicos. Muitas delas apresentam correções para um número limitado de fatores de estresse ambientais, entretanto, há casos para os quais não se disponibilizam informações sobre as condições ambientais sob as quais os testes para a determinação das taxas de falhas foram realizados. Este fato inviabiliza a utilização de modelos físico-estatísticos para estimar a taxa de falha em situações diferentes, tais como modelo de Arrhenius, de Eyring, da regra da potência inversa, de eletromigração, modelo geral da umidade, dentre outros [18, 19]. Sendo assim, poucos aspectos ambientais são mencionados e, quando citados, são geralmente de difícil quantificação. Os métodos propostos pela IEC 61709 [20] e IEC TR 62380 [15] se apresentam como boas alternativas para uma melhor caracterização de ambientes adversos, pois agrupam em classes diversos fatores ambientais, tais como agente químico, umidade, vibração, poeira, salinidade e radiação, e corrigem a taxa de falha considerando, simultaneamente, os diversos fatores de estresse existentes no ambiente no qual o sistema está inserido. Outra opção é a utilização da norma FIDES [16], visto que dentre as normas estudadas [13-16] é a que apresenta um maior número de fatores para correção devido ao ambiente, como temperatura, ciclo de temperatura, temperatura dos conectores (solda), vibração, umidade e agentes químicos. Por outro lado, as demais normas, frequentemente, apresentam correções apenas para estresse relativo à temperatura.

Assim, torna-se necessário contemplar os diversos fatores que podem degradar os componentes eletrônicos, aumentando a taxa de falha do equipamento, como temperatura, umidade, pressão atmosférica, vibração, poeira, radiação, microrganismos, dentre outros. A

seguir são apresentados os principais fatores com potencial de degradar os componentes eletrônicos, assim como os métodos utilizados para quantificar a taxa de falha em situações adversas.

2.2.1 - Temperatura

Dentre todos os fatores ambientais que influenciam a confiabilidade dos componentes eletrônicos, a temperatura é a que mais acelera sua degradação [21]. Como as propriedades físicas de quase todos os materiais são modificadas por alterações de temperatura, e a velocidade da maior parte das reações químicas também é influenciada pela temperatura dos reagentes, variações de temperatura podem causar falhas catastróficas devido à deterioração do componente. Seguem-se as principais formas pelas quais a temperatura pode interferir na robustez dos componentes [22, 23].

- 1. Elevadas temperaturas:** impõem um estresse sobre a maioria dos componentes eletrônicos, podendo causar não só falhas catastróficas, mas também a deterioração progressiva do seu desempenho, devido principalmente à degradação química do componente. Pode, por exemplo, ativar reações químicas ou acelerar processos de corrosão.
- 2. Baixas temperaturas:** também podem prejudicar a confiabilidade dos componentes eletrônicos que, normalmente, são afetados por estresses mecânicos produzidos por diferenças nos coeficientes de dilatação de materiais metálicos e não metálicos e também por forças mecânicas causadas pela solidificação de componentes líquidos. Exemplos típicos incluem rachaduras, falhas nos acoplamentos mecânicos e viscosidade excessiva de lubrificantes. A redução desses

fenômenos requer a utilização de aquecedores, isolantes térmicos e materiais resistentes a baixas temperaturas.

3. Choque térmico: produz estresses adicionais quando o componente eletrônico é exposto a mudanças súbitas de temperatura ou condições extremas de ciclo de temperatura. Essas condições geram tensões mecânicas internas em elementos estruturais, particularmente quando materiais dissimilares são encapsulados. Seus efeitos são rachaduras, perda das propriedades herméticas, vazamento de gases, separação dos componentes encapsulados e distorção do suporte dos conectores.

Diversos problemas relacionados à temperatura podem ocorrer, tais como: vazamento de gases voláteis corrosivos, quando equipamentos eletrônicos são submetidos ao calor; expansão e contração de materiais podem provocar problemas de vedação e encaixe, além de aumentar tensões internas; estruturas metálicas, quando submetidas a aquecimento e arrefecimento, podem entrar em colapso devido às tensões e à fadiga causadas pela flexão; o efeito termopar entre a junção de dois metais diferentes faz com que uma corrente elétrica possa induzir a corrosão eletrolítica; plásticos e borrachas são particularmente sensíveis a temperaturas extremas, apresentando fragilidade a baixas temperaturas e altas taxas de degradação a elevadas temperaturas.

Todas as normas estudadas [13-16] descrevem métodos para a correção da taxa de falha devido a temperaturas ambientais adversas. As normas MIL-HDBK-217F [14] e Telcordia [13] mostram tabelas e equações que fornecem fatores para a correção apenas da temperatura estática, ou seja, não consideram choques térmicos ou ciclo de temperatura. A MIL-HDBK-217F apresenta em suas tabelas valores de temperatura ambiente entre 0°C e 125°C para a maioria dos componentes eletrônicos, enquanto, para alguns outros componentes, são citados valores de temperatura ambiente diferentes; já na Telcordia, essa

faixa de valores é de 30°C a 65°C. Entretanto, ambas as normas apresentam métodos, mencionados em [18, 19], para extrapolar o valor contido nas tabelas. A MIL-HDBK-217F mostra equações específicas para cada componente, enquanto a Telcordia utiliza um modelo de correção de temperatura baseado no modelo de Arrhenius. Esse modelo é bastante difundido para ensaios de vida acelerados, ou seja, quando se deseja determinar o valor da taxa de falha em uma temperatura diferente da temperatura na qual o teste foi realizado.

O método IEC TR 62380 e FIDES, diferentemente das duas normas supracitadas, apresenta, além da correção de temperatura ambiental estática, a correção devido a ciclo de temperatura, elevação da temperatura de junção dos componentes eletrônicos e também considera a influência da temperatura quando materiais de diferentes coeficientes de dilatação linear são soldadas em uma mesma placa.

Por ser a temperatura o principal fator ambiental responsável pela degradação de componentes eletrônicos, sendo ainda o fator de estresse mais citado na literatura, todas as normas estudadas [13-16] propõem métodos para quantificar sua influência. Todavia, em aplicações onde existam ciclos térmicos ou que necessitem de uma análise mais complexa dos fenômenos térmicos, as normas IEC TR 62380 e FIDES são as mais apropriadas.

2.2.2 - Vibração e Choques Mecânicos

Na ocorrência de choques mecânicos e vibrações ambientais, danos físicos e estruturais aos componentes devido às tensões mecânicas que excedem o funcionamento permissível das partes constituintes poderão ser verificados.

Existem duas abordagens para situações nos quais tais fatores de estresse estejam presentes no ambiente: proteger o equipamento ou construí-lo para suportar choques mecânicos e/ou vibrações. Segundo [24], medidas de proteção contra choques mecânicos e

vibração são geralmente determinadas por uma análise das deflexões e tensões mecânicas produzidas por esses fatores ambientais, a isso geralmente envolve a determinação das frequências naturais bem como uma avaliação do estresse mecânico no interior do componente e/ou equipamento.

As frequências naturais dos componentes são parâmetros importantes, já que uma condição ressonante pode ocorrer se uma frequência natural estiver dentro da gama de frequências de vibração. Nessa situação, a condição de ressonância pode aumentar as tensões internas para além do limite seguro.

O ambiente de vibração pode ser particularmente lesivo para os conectores elétricos, devido ao movimento relativo entre esses. Esse movimento, em combinação com outros estresses ambientais, como, por exemplo, umidade, pode acelerar o processo de corrosão levando a variações da resistência de contato. Técnicas para a atenuação desses efeitos incluem o uso de materiais que aumentem a robustez do componente, associado a controle de ressonância e redução da liberdade de movimento.

Vibração e choque mecânico nem sempre são contemplados de forma direta pelas normas [13, 14, 20, 25-27], ou seja, um grande número delas não apresenta um fator de estresse específico para ambientes sob ação desses elementos ambientais. Dentre todas as normas estudadas [13-16, 20, 25-27] a FIDES é a única que apresenta um fator de estresse para contemplar a amplitude da vibração do componente eletrônico. As demais normas utilizam métodos baseados em classificação do ambiente em grupos, com características semelhantes, para quantificar a interferência desses fatores ambientais na confiabilidade dos equipamentos. A seção 2.2.7 apresenta as técnicas utilizadas por diversas normas quando se consideram os estresses causados por: vibração, choques mecânicos, umidade, ambiente salino, areia, poeira e radiação tanto eletromagnética quanto nuclear.

2.2.3 - Umidade e Ambiente Salino

A umidade é encontrada em quase todos os ambientes sendo, provavelmente, o fator químico que mais causa deterioração de diferentes tipos de materiais [24]. São as impurezas contidas na umidade que provocam diversos problemas químicos, como a corrosão de muitos metais. Pode-se citar, ainda, que a umidade condensada atua como um agente físico, pois muitos materiais, normalmente flexíveis a baixas temperaturas, podem tornar-se rígidos e quebradiços devido à umidade condensada. Além disso, a maioria dos gases facilmente se dissolve em umidade podendo originar outros agentes químicos prejudiciais à confiabilidade dos componentes como, por exemplo, o cloro libertado por plástico de PVC (cloreto de polivinila) que forma o ácido clorídrico quando combinado com a umidade.

Embora a presença de umidade possa provocar a deterioração de componentes eletrônicos, sua ausência também pode causar problemas. As propriedades de muitos materiais não metálicos, por exemplo, dependem de um nível ótimo de umidade. Pode-se citar que couro e papel tornam-se frágeis quando submetidos a ambientes secos, e que a falta de umidade pode potencializar desgaste, fricção e obstrução de filtros decorrentes da existência de poeira no ambiente.

Umidade e ambientes salinos degradam o desempenho do equipamento, pois, em muitas situações, promovem corrosão dos componentes metálicos. Tais ambientes também podem propiciar o fenômeno da eletrólise, quando metais dissimilares entram em contato. Outro efeito danoso de umidade e atmosferas salinas é a formação de películas salinas em partes não metálicas, podendo provocar vazamento e/ou degradação do isolamento e das propriedades dielétricas desses materiais [23].

Geralmente os dispositivos eletrônicos têm especificações de umidade, por exemplo, de 5% a 95%. No topo da variação, a umidade pode aumentar a condutividade de

isolantes elétricos permeáveis, levando a uma possível avaria. Com a umidade muito baixa, os materiais podem se tornar quebradiços. Entre os perigos potenciais aos eletrônicos, independentemente da faixa de umidade de operação mencionada acima, existe a condensação. Há também problemas relacionados à locomoção do equipamento, como, por exemplo, quando um item eletrônico é movido de um local frio (garagem, carro, armazém/galpão ou um espaço climatizado, dentre outros) para um lugar quente e úmido, a condensação pode revestir as placas de circuito e outros isoladores, levando ao curto-circuito no interior do equipamento. Esses curtos-circuitos podem causar danos permanentes e substanciais se o equipamento é ligado antes de a condensação se evaporar. É aconselhável que o equipamento eletrônico se aclimate por várias horas, depois de ter sido trazido do frio, antes de se energizar. O inverso também é verdadeiro. Em situações onde o tempo é esguio, com o aumento do fluxo de ar através de passagens internas do dispositivo, pode-se reduzir drasticamente o tempo necessário para a aclimação ao novo ambiente. Por exemplo, ao remover o painel lateral de um CPU (*Central Processing Unit*), direcionando-se um ventilador ao interior do gabinete, a condensação de umidade pode ser evitada.

A baixa umidade também favorece o acúmulo de eletricidade estática, que pode resultar em desligamento espontâneo de computadores quando ocorrem as descargas. Descargas eletrostáticas podem causar ruptura dielétrica em dispositivos de estado sólido, resultando em danos irreversíveis. Centros de processamento de dados muitas vezes controlam os níveis de umidade relativa por essas razões.

A absorção de umidade pelo encapsulamento do componente pode aumentar significativamente o volume do mesmo; e também pode prejudicar a dissipação de calor. A melhoria da confiabilidade em ambientes que apresentam umidade e salinidade pode ser

obtida com o uso de materiais resistentes à umidade, desumidificadores, coberturas protetoras e uso reduzido de metais dissimilares.

Assim como a vibração e o choque mecânico, a umidade também não é considerada de forma direta pela maioria das normas [13-16], com exceção da FIDES que utiliza a umidade relativa do ambiente no cálculo da taxa de falha dos componentes eletrônicos.

2.2.4 - Areia e Poeira

Areia e poeira podem degradar os componentes eletrônicos principalmente por:

- 1. Abrasão:** proporciona um maior desgaste do componente.
- 2. Fricção:** causa maior desgaste e aquecimento.
- 3. Entupimento:** ocorre principalmente em filtros, pequenas aberturas, e em equipamentos frágeis.

Equipamentos com partes móveis requerem uma atenção especial na concepção de proteção contra areia e poeira, já que esses agentes causam o desgaste da superfície dos componentes, seja pelo impacto, ao serem transportados pelo ar, ou por abrasão física, quando a superfície não se encontra devidamente limpa. Outro efeito adverso ocorre em ambientes que combinam poeira e umidade, que conduzem à corrosão ou ao crescimento de fungos [24].

Em regiões relativamente secas, tais como desertos, as partículas finas de poeira e areia estão presentes em suspensão no ar, onde podem persistir durante muitas horas e atingir níveis elevados. Assim, mesmo que não existam nuvens de poeira, o funcionamento e o transporte de equipamentos nessas regiões podem causar abrasão da superfície, além de outros efeitos adversos.

Embora o pó normalmente seja considerado como pequenas partículas secas de terra, a poeira também pode incluir minúsculas partículas de metais, produtos combustíveis, contaminantes químicos e outras impurezas, que pode provocar corrosão nos equipamentos, já que essa poeira pode ser alcalina, ácida ou microbiológica.

Uma vez que a maioria dos equipamentos requer circulação de ar para refrigeração, a questão principal sobre a proteção dos equipamentos contra poeira não é se deve permitir ou não a entrada de poeira, mas, sim, o tamanho das partículas de poeira que pode ser tolerado pelo equipamento. Dessa forma, uma solução pode ser a filtragem do ar para remoção das partículas de pó acima do tamanho tolerado. No entanto, ao aumentar a capacidade do filtro, ou seja, barrar partículas de poeira menores, também se reduz o fluxo de ar, o que pode prejudicar a refrigeração. Deve-se, portanto, buscar um equilíbrio entre o fluxo de ar e o tamanho de partícula permissível.

2.2.5 - Radiação Eletromagnética e Nuclear

Radiações eletromagnéticas e nucleares podem prejudicar o desempenho dos componentes eletrônicos e, em algumas situações, podem causar dano permanente ao equipamento exposto. Logo, é importante que tais efeitos sejam considerados [23].

A radiação eletromagnética frequentemente produz interferência e ruído em circuitos eletrônicos, podendo prejudicar o desempenho funcional do sistema. Fontes desses efeitos incluem: descarga por efeito corona, descarga atmosférica e fenômenos de arco elétricos que podem ser associados à transmissão de alta tensão, sistemas de ignição, motores de corrente contínua e até mesmo o próprio equipamento. Geralmente, a redução de efeitos de interferência requer a incorporação de filtros e utilização de blindagem, ou, ainda, a especificação de componentes menos suscetíveis a essa radiação.

A radiação nuclear pode causar danos permanentes por alterações da estrutura atômica ou molecular de materiais dielétricos e semicondutores. Também pode causar efeitos de ionização que degradam os níveis de isolamento de materiais dielétricos. A mitigação da radiação nuclear tipicamente envolve o uso de materiais e partes que possuem um grau mais alto de resistência à radiação.

2.2.6 - Considerações sobre os Agentes Ambientais e as Normas de Predição de Confiabilidade

Apesar de serem fatores de estresse relevantes, as normas MIL-HDBK-217F e Telcordia não contemplam fatores de estresse específicos para vibração, choques mecânicos, umidade, ambiente salino, areia, poeira e radiação eletromagnética e nuclear. Além disso, essas normas não informam os níveis desses fatores nas condições em que os testes foram realizados, o que impede que modelos físico-estatísticos, como modelo da regra da potência inversa e modelo geral da umidade, possam ser utilizados para a correção da taxa de falha do componente em condições ambientais adversas. Dessa forma, não há como considerar os demais fatores de uma forma precisa. As normas/manuais [13-16] apresentam poucos fatores de correção além da temperatura. Dentre as normas estudadas, a que apresenta um maior número de fatores de correção é a FIDES com correções para: temperatura, ciclo de temperatura, temperatura dos conectores (solda), vibração, umidade e agentes químicos; correções essas baseadas no modelo de Arrhenius (temperatura) e potência inversa (vibração e umidade).

Uma solução alternativa apresentada pelas normas/manuais é considerar os fatores ambientais de forma qualitativa, elegendo um dos ambientes propostos pela norma (a MIL-HDBK-217F define quatorze ambientes; já a Telcordia, cinco). Nesses ambientes, esses

fatores são considerados, porém, não é apresentado um valor numérico associado ao nível de cada fator ambiental de estresse, o que torna a análise, utilizando o método proposto por essas normas, bastante subjetivo. Um método semelhante também é utilizado pela norma FIDES para os aspectos ambientais que não possuem os fatores de correções.

De uma forma geral, os ambientes propostos pelas normas contemplam diversos fatores de estresse de uma forma conjunta e unificada. Por exemplo, o ambiente “Fixo em solo, não controlado” da norma Telcordia é definido como um ambiente que contém choques, vibração, temperatura elevadas e variações atmosféricas; para essas condições, segundo a norma, os espaços típicos são terminais remotos, áreas externas e subterrâneas. Os componentes eletrônicos expostos a essa situação devem utilizar um fator de estresse igual a dois, logo, nessas situações, a taxa de falha é duas vezes maior do que quando o mesmo componente é exposto a um ambiente sem estresse ambiental. É importante observar que, ainda segundo a norma, em tal ambiente estão presentes choques, vibração, temperatura elevadas e variações atmosféricas, conforme citado. Porém essa informação é apenas literal, a norma não apresenta um valor numérico para quantificar esses fatores de estresse ambiental. Isso pode tornar a análise subjetiva, visto que não se pode definir com clareza se um ambiente realmente pode ser enquadrado nessa classificação ambiental. Outra desvantagem diz respeito aos próprios ambientes propostos, pois a norma MIL-HDBK-217F apresenta ambientes militares e a Telcordia, que são voltados para a área de telecomunicações. Dessa forma, diversas aplicações podem não possuir espaços semelhantes aos ambientes industriais ou outros, o que pode inviabilizar a utilização dessa norma ou levar a erros significativos. Um exemplo disso é a inexistência de ambientes marítimos/submarinos dentre as cinco situações contemplados pela Telcordia.

A norma IEC TR 62380 não utiliza o fator de correção devido a estresses ambientais, como as normas anteriores (MIL-HDBK-217F e Telcordia), mas considera a influência do meio ambiente de forma direta. Sendo assim, o componente eletrônico deve se enquadrar em um dos doze casos definidos na norma, ou seja, não é feita uma correção da taxa de falha do componente, mas esse componente deverá ser capaz de suportar o ambiente adverso para o qual foi definido e projetado, e essa informação deve ser fornecida pelo fabricante do equipamento eletrônico. Diferentemente das normas supracitadas, os ambientes são definidos segundo normas reconhecidas para classificação ambiental, IEC 60721-3 e a ETS 300 019, que ponderam os ambientes em classes, considerando de forma conjunta e simultânea os seguintes fatores: temperatura do ar, umidade, chuva, ventos, neve, pressão atmosférica, radiação solar, agentes biológicos, agentes químicos, areia, poeira e vibração; e as classes são atribuídas segundo a faixa de valores de cada um desses fatores. Portanto, os fatores de estresse e seus respectivos valores são apresentados, fazendo com que a análise deixe de ser subjetiva. A IEC TR 62380 quantifica a vibração por meio da aceleração e frequência; choques mecânicos por meio da amplitude e duração; considera areia e poeira em condições de precipitação e/ou em suspensão, além de considerar que os seguintes agentes químicos podem estar presentes: SO₂, H₂S, Cl, NO₂ e ainda, umidade relativa e absoluta, e radiação solar.

O modelo de estresse ambiental apresentado pela norma IEC 61709 considera fatores de correções que devem ser usados para converter as taxas de falha de referência para as taxas operacionais de campo com modelos empíricos e que permitam ajuste dos dados observados. Segundo essa norma, a conversão de taxas de falha só é possível dentro dos limites especificados dos componentes. As vantagens dessa norma é que esses fatores podem ser aplicados a outras normas, como MIL-HDBK-217F e Telcordia, pois os ambientes são

definidos segundo normas reconhecidas internacionalmente para classificação ambiental, IEC 60721-3 e a ETS 300 019, assim como a norma IEC TR 62380. Assim, essa norma permite a correção das taxas de falhas para diversos fatores ambientais adversos contemplados pelas normas de classificação ambiental. A desvantagem em se utilizar essa norma é o fato de ser uma correção simples, pois essa norma fornece apenas três fatores para a correção da taxa de falha para componentes eletrônicos submetidos a locais hostis. Logo, em apenas um número limitado de situações essa norma pode ser aplicada.

Também é importante ressaltar que, em aplicações industriais convencionais, por exemplo, no sistema de acionamento de motores, o conversor de frequência se encontra em gabinetes apropriados construídos em locais cujos fatores ambientais adversos podem ser controlados, ou seja, os componentes eletrônicos são protegidos desses fatores, e o elemento submetido ao estresse ambiental é o gabinete. Entretanto, mesmo com a existência dos gabinetes para a blindagem dos efeitos maléficos do ambiente, os componentes eletrônicos ainda podem estar expostos a esses fatores adversos, porém, em uma proporção menor do que no caso de sua inexistência. Exemplo disso são as aplicações em minerações, em que o interior dos painéis construídos próximo às minas apresenta temperaturas e níveis de poeira mais elevados quando comparados aos gabinetes localizados distante das minas.

Outro fator de extrema importância é a manutenção, pois, quanto mais próximo o gabinete estiver do motor, maior será a dificuldade de acesso para manutenção, o que dificultará a manutenção devido às situações adversas nos quais o conversor será inserido. O sistema de extração marítima de petróleo é um exemplo crítico dessa situação, pois, em uma aplicação proposta em [7, 8], por exemplo, parte do sistema de acionamento deverá ficar submersa, o que tornaria a manutenção extremamente complexa e onerosa, prejudicando a manutenibilidade e disponibilidade de todo o sistema.

2.2.7 - Outros fatores ambientais

A confiabilidade depende das condições de operação durante toda a vida útil do equipamento. É importante que essas condições sejam identificadas com precisão, no início do processo de concepção do projeto. Além dos fatores ambientais citados neste capítulo, diversos outros também influenciam a confiabilidade dos equipamentos. A Tabela 2-1 apresenta alguns desses fatores.

Tabela 2-1: Fatores ambientais típicos [24].

Efeitos Naturais			
Areia e poeira;	Gases ionizados;	Poluição do ar;	Salinidade
Baixa gravidade	Geomagnetismo	Pressão (alta e baixa)	Temperatura (alta e baixa)
Chuva	Neve, geada e granizo	Radiação: Eletromagnética e Cósmica (Solar)	Umidade (alta e baixa)
Fungo	Nuvens, nevoeiro	Relâmpago	Vento
Efeitos Induzidos			
Aceleração	Efeitos Eletromagnéticos (laser)	Radiação: Eletromagnética e Nuclear	Vapor
Choque	Efeitos eletrostáticos	Temperatura (Aquecimento e resfriamento)	Vibração (Acústica e Mecânica)
Congelamento	Explosão	Turbulência	

Fatores combinados ou simultâneos são geralmente mais prejudiciais para a confiabilidade quando se comparam os efeitos da situação que contenha um único fator de estresse. Podem incluir uma combinação de diferentes fatores, tais como: temperatura, umidade, poeira, choque e vibração. Critérios de projeto e testes devem considerar tanto os fatores isolados como os combinados. Frequentemente as normas de predição apresentam os ambientes combinados por meio de classes, o que traz as diversas dificuldades já comentadas neste capítulo.

No estudo da confiabilidade devem-se considerar os fatores ambientais associados a todos os intervalos de vida do equipamento. Incluindo não só os ambientes operacionais e

de manutenção, mas também os ambientes pré-operacionais, pois os estresses impostos sobre as peças durante a montagem, inspeção, ensaios, transporte e instalação podem ter um impacto significativo sobre a confiabilidade do equipamento. Muitas vezes os ambientes a que um sistema é exposto durante o transporte e instalação são mais hostis do que os encontrados em condições de funcionamento normais. Dentre as diversas normas estudadas, a FIDES e a IEC 61709 são as que apresentam correções nas taxas de falha devido à fase pré-operacional, especialmente no que se refere à estocagem.

Estresses ambientais afetam diferentes partes de diferentes maneiras. A Tabela 2-2 ilustra os principais efeitos de ambientes típicos de peças do sistema e materiais.

Tabela 2-2: Principais efeitos de ambientes adversos [24].

Ambiente	Principais efeitos	Falhas típicas
Altas temperaturas	Envelhecimento térmico	Falha de isolamento Alteração de propriedades elétricas Perda de propriedades de lubrificação Falha estrutural Aumentado de tensões mecânicas Maior desgaste em partes móveis
	Oxidação	
	Mudança estrutural	
	Reação química	
	Derretimento	
	Sublimação	
	Redução de viscosidade	
	Evaporação	
Baixas temperaturas	Expansão física	Perda de propriedades de lubrificação Alteração de propriedades elétricas Perda de resistência mecânica Fissuração, fratura estrutural, desgaste maior em partes móveis
	Aumento da viscosidade	
	Solidificação	
	Formação de gelo	
Choque térmico	Fragilização	Colapso estrutural e/ou enfraquecimento.
	Contração física	
Alta umidade relativa	Estresse mecânico	Ruptura, inchaço do recipiente Perdas da resistência/propriedades elétrica Perda de resistência mecânica Aumento da condutividade de isoladores.
	Absorção de umidade	
	Reação química	
	Corrosão	
Baixa umidade relativa	Eletrólise	A perda de resistência mecânica Colapso estrutural Alteração de propriedades elétricas
	Dessecação	
	Fragilização	
Areia e Poeira	Granulação	Aumento do desgaste Alteração de propriedades elétricas
	Abrasão	
Radiação Solar	Entupimento	Deterioração da superfície Alteração de propriedades elétricas Descoloração de materiais Formação de ozônio
	Reações físicas e químicas	
	Fragilização	

Tabela 2 2: Principais efeitos de ambientes adversos [24].

Ambiente	Principais efeitos	Falhas típicas
Alta Pressão	Compressão	Colapso estrutural Penetração na vedação Interferências mecânicas
Baixa Pressão	Expansão Vazamento de gases Redução dielétrica	Fratura do recipiente Alteração de propriedades elétricas Perda de resistência mecânica Isolação Arco elétrico Efeito corona Formação de ozônio.
Sal	Reações químicas: Corrosão Eletrolise	Redução da resistência mecânica Deterioração Enfraquecimento estrutural Aumento da condutividade.
Vento	Aplicação de força Deposição de materiais Variação da temperatura	Colapso estrutural Perda de resistência mecânica Interferência mecânica e entupimento Abrasão acelerada. Acelera efeitos da temperatura
Chuva	Estresse físico Absorção de água e Imersão Erosão Corrosão	Colapso estrutural Aumento de peso Falha elétrica Enfraquecimento estrutural. Remove os revestimentos de proteção Deterioração da superfície
Partículas de alta velocidade (irradiação nuclear)	Aquecimento Transmutação e ionização	Envelhecimento térmico Oxidação Alteração das propriedades: físicas, químicas e elétricas Produção de gases e partículas secundárias
Gravidade zero	Estresse mecânico Ausência de refrigeração por convecção	Interrupção de gravidade Acelera efeitos da alta temperatura
Ozônio	Reações químicas: Rachaduras, granulação Rigidez dielétrica do ar reduzida	Oxidação rápida Alteração das propriedades elétricas Perda de força
Descompressão explosiva	Estresse mecânico grave	Ruptura e quebra Colapso Estrutural
Gases	Reações químicas: contaminação Rigidez dielétrica reduzida	Alteração de propriedades físicas e elétricas Isolação e arco-elétrico
Aceleração	Tensões mecânicas	Colapso estrutural
Vibração	Tensões mecânicas Fadiga	A perda de resistência mecânica Aumento do desgaste Colapso estrutural
Campos Magnéticos	Magnetização induzida	Alteração das propriedades elétricas Aquecimento induzido

2.3 - Normas: Previsões da Taxa de Falha

No decorrer deste capítulo observa-se que diversos fatores ambientais interferem no desempenho dos equipamentos eletrônicos e, conseqüentemente, nos índices de confiabilidade dos mesmos. Sendo assim, as figuras de mérito de confiabilidade, tais como taxa de falha, tempo médio até a falha (MTBF), quantis e demais, devem ser quantificados para que o nível de confiabilidade do sistema seja apropriado para a função desejada e o ambiente especificado. Por isso, diversas normas para predição de taxa de falha [13-16] apresentam métodos para quantificar os estresses provocados nos componentes devido às interferências ambientais mais relevantes.

A taxa de falha do sistema é calculada somando-se as taxas de falhas de cada componente eletrônico presente em cada item do sistema, tendo como base a teoria de probabilidade [19, 28] devido ao pressuposto de que a falha de um componente leva a uma falha do sistema, ou seja, o sistema de confiabilidade opera em série.

A taxa de falhas do sistema nas condições de referência é calculada como em (2.1):

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n (\lambda_{ref})_i \quad (2.1)$$

Em que:

λ_S = taxa de falha do sistema;

λ_{ref} = taxa de falha na condição de referência;

n = número de componentes.

A taxa de falha na condição de referência é específica para cada componente, ou seja, inclui a tecnologia do encapsulamento, modo de operação do componente (por exemplo: contínuo ou intermitente), processo de fabricação, complexidade do componente, etc.

Entretanto, os componentes eletrônicos nem sempre operam sob as condições de referência. Em tais situações, as condições reais de funcionamento resultam em taxas de falhas diferentes das apresentadas para tais condições. Torna-se necessário, portanto, para a correção dos fatores de estresse, modelos por meio dos quais as taxas de falhas (dadas nas condições de referência) podem ser convertidas em valores aplicáveis para as condições reais de funcionamento.

A taxa de falhas de um equipamento é calculada como se segue:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n (\lambda_{ref} \cdot \pi_U \cdot \pi_I \cdot \pi_T \cdot \pi_E)_i \quad (2.2)$$

Em que:

π_U = fator de estresse devido à tensão;

π_I = fator de estresse devido à corrente elétrica;

π_T = fator de estresse devido à temperatura;

π_E = fator de estresse devido ao ambiente.

Essa metodologia é uma forma genérica de como os manuais/normas calculam a taxa de falha dos componentes eletrônicos. Como cada um deles possui a sua própria metodologia para a previsão de taxa de falhas, o usuário deve se atentar às técnicas, métodos e fatores empregados no manual utilizado. A seguir será apresentada uma descrição das principais normas para predição [13-16, 20], além de métodos segundo as quais essas normas abordam os fatores ambientais.

2.3.1 - MIL-HDBK-217F

MIL-HDBK-217F é a norma militar desenvolvida em 1961 e publicada pelo Departamento de Defesa, Washington DC, EUA, para a predição de confiabilidade de equipamentos eletrônicos. O propósito da MIL-HDBK-217F é estabelecer e manter métodos consistentes e uniformes para estimar a confiabilidade inerente de equipamentos eletrônicos e sistemas militares. Ela fornece uma base comum para previsões de confiabilidade durante os programas de aquisição de sistemas eletrônicos militares e equipamentos. Também estabelece uma base comum para comparar e avaliar as previsões de confiabilidade de projetos competitivos. A norma se destina a ser utilizada como uma ferramenta para aumentar a confiabilidade do equipamento que está sendo projetado [29].

Existem, na norma, dois métodos de predição de confiabilidade: *Parts Count* e *Parts Stress*. Em *Parts Count* o valor MTBF é determinado pelo valor do inverso da soma das taxas de falha (a partir de tabelas genéricas) para cada componente do dispositivo eletrônico. Essas taxas de falhas básicas podem então ser corrigidas. Considerando o aumento na taxa de falha causada por operação sob condições ambientais adversas, tais como ambiente naval, aéreo, submarino, etc. A MIL-HDBK-217F contempla quatorze condições ambientais, que vão desde equipamentos fixos em terra até equipamentos em satélites. O método *Parts Stress* considera fatores de degradação da confiabilidade devido a efeitos do uso do equipamento. Nesse sentido, tem-se como fator de estresse a potência, tensão elétrica e temperatura a que o componente é submetido [12].

Essa é uma norma amplamente aceita em ambiente militar e aplicações comerciais [17], entretanto diversos trabalhos [12, 29, 30] a criticam como a seguir:

- 1) As previsões de confiabilidade estão baseadas unicamente em constantes taxas de falha que se destinam a modelar apenas as falhas aleatórias. Taxas de falhas constantes são usadas para simplificar a coleta de dados de falha e cálculos, que eram uma necessidade da década de 1950 e 1960, quando estes métodos de previsão foram inicialmente desenvolvidos. Entretanto nem sempre a taxa de falha é constante, o que pode levar a resultados pessimistas. Outra consequência disso são os erros que podem ocorrer nos primeiros meses de funcionamento e de envelhecimento durante a vida útil do equipamento (curva da banheira).
- 2) Considera-se que as falhas sejam exclusivamente devidas aos componentes eletrônicos, não levando em conta outras fontes de falhas, tais como erro de projeto, falhas humanas, falhas de software, falhas de soldas e conexões, etc.
- 3) A última atualização da norma ocorreu em 1995. Contudo, novos componentes, o avanço tecnológico e a melhoria da qualidade dos componentes eletrônicos não são contemplados pela norma. A MIL-HDBK-217F precisa ser mantida atualizada com lançamentos regulares de novos dados. Esta é uma tarefa enorme que se complica ainda mais devido à criação de novos dispositivos e famílias de componentes que devem ser considerados.
- 4) Dentre os fatores de estresses ambientais, a temperatura é apresentada como o principal fator de fracasso dos componentes eletrônicos, conquanto essa variável possa ser corrigida para o nível desejado por meio do modelo físico de Arrhenius. No entanto, outros fatores de estresse importantes, tais como ciclos de temperatura, umidade, vibração e choque não são modelados.

Como a norma não informa os níveis de outros fatores ambientais nas condições em que os testes foram realizados, isso impede que modelos físicos, como modelo de potência

inversa, possam ser utilizados para correção da taxa de falha do componente em condições ambientais adversas. Dessa forma, não há como considerar os demais fatores de maneira mais precisa.

A alternativa é considerar os fatores ambientais de forma qualitativa, elegendo um dos 14 ambientes proposto pela norma. Nesses ambientes, alguns fatores como vibração, choques mecânicos, poeira, pressão, umidade e salinidade são considerados. Porém, não é apresentado um valor numérico do nível da variável de estresse, o que torna a análise, utilizando-se o método proposto pela norma MIL-HDBK-217F, subjetiva. Em especial quando se deseja classificar um determinado ambiente real segundo um dos ambientes indicados pela norma. Essa análise requer do usuário experiência e conhecimento que, em muitas situações, pode não existir, ocasionando erros significativos na determinação da confiabilidade do projeto/equipamento/item em estudo.

2.3.2 - Telcordia SR332 (Antiga Bellcore TR332)

A Telcordia SR 332 é um documento para predição de confiabilidade de equipamentos eletrônicos publicado em maio de 2001 pela empresa Telcordia Technologies¹, que complementa e atualiza a antiga Bellcore TR 332. O documento apresenta três métodos de cálculo de taxas de falhas: i) Caixa Preta: presumindo que não haja dados disponíveis a partir de laboratório ou campo, a predição é baseada somente em dados genéricos; ii) Caixa preta integrada com dados de laboratório: considera que os dados relevantes de laboratório sobre o dispositivo estejam disponíveis, produzindo uma previsão refinada da taxa de falha; iii) Caixa preta integrada com dados de campo: método semelhante ao anterior, porém aplicado quando estão disponíveis os dados de campo pertinentes sobre o dispositivo. Além

¹ Antiga empresa Bell Communications Research, Inc. (Bellcore) que em junho de 2011 foi adquirida pela Ericsson e fechada em janeiro de 2012.

disso, fornece várias tabelas para facilitar o cálculo das previsões de confiabilidade de diversos componentes eletrônicos.

A Telcordia SR 332 apresenta algumas melhorias em relação à MIL-HDBK-217F no que se refere à modelagem da predição da taxa de falhas, em especial no primeiro ano de vida dos componentes eletrônicos, e apresenta componentes eletrônicos com uma tecnologia mais recente. Entretanto os aspectos ambientais ainda não são contemplados de forma satisfatória. Destacam-se:

- 1) As tabelas apresentam uma faixa de temperatura ambiente pequena, 30 °C a 65 °C, porém esses valores podem ser extrapolados utilizando o modelo físico de Arrhenius para temperatura. Tal modelo é apresentado nessa norma de predição.
- 2) Assim como a MIL-HDBK-217F, dentre os diversos fatores de estresse ambientais apenas o fator temperatura pode ser quantificado. Logo, caso exista um ambiente adverso, ele deve ser enquadrado segundo um dos cinco ambientes contemplados pela norma, o que torna a análise subjetiva. No entanto, nessa norma, não existem ambientes marítimos/submarinos. Os cinco ambientes são voltados para a área de telecomunicações. E já que diversas aplicações podem não possuir ambientes semelhantes aos propostos, a utilização dessa norma pode ser inviabilizada ou levar a erros significativos.

2.3.3 - IEC TR 62380

A IEC TR 62380: “Manual de confiabilidade - Modelo universal para a predição de confiabilidade de componentes eletrônicos, placas de circuito impresso e equipamentos” é um manual publicado em 2004 pela IEC (*International Electrotechnical Commission*), que cobre a maior parte dos componentes apresentados pela MIL-HDBK-217. Todavia, os

modelos são mais realistas, pois consideram o ciclo de operação, bem como ciclos de temperatura complexos. Por exemplo: para predição da taxa de falha de circuitos integrados é necessário informar sobre os equipamentos a ele conectados, as temperaturas das placas dos circuitos, tipo de tecnologia, temperatura da junção, tempo de operação, tempo de armazenamento, características de expansão térmica, dentre outros.

Esse manual de cálculo da confiabilidade para componentes eletrônicos apresenta progressos importantes em relação às normas mais antigas [13, 14], principalmente devido à influência das condições ambientais e conquanto não utilize o fator de correção devido a estresses ambientais, como nas normas anteriores, considera a influência do meio ambiente de forma direta. Sendo assim, o componente eletrônico deve se enquadrar em um dos doze ambientes existentes na norma, ou seja, não é feita uma correção da taxa de falha do componente, que supostamente deverá ser capaz de suportar o ambiente adverso, informação que deve ser fornecida pelo fabricante do equipamento eletrônico. Diferentemente de outras normas, os ambientes são definidos segundo normas reconhecidas para classificação ambiental, IEC 60721-3 e a ETS 300 019. Dessa forma, os fatores de estresse e seus respectivos valores são apresentados, fazendo com que a análise deixe de ser subjetiva. Os principais fatores ambientais contemplados pela IEC TR 62380 são: vibração (aceleração e frequência), choques mecânicos (amplitude e duração), areia e poeira (precipitada e em suspensão), agentes químicos (SO_2 , H_2S , Cl , NO_2), umidade e temperatura média. Entretanto, mesmo sendo realizada uma quantificação melhor dos aspectos ambientais, esses ainda devem ser enquadrados em classes ou grupos ambientais para determinação de um fator de estresse ambiental.

A temperatura, fator melhor descrito em outras normas, também apresenta melhorias. Além de considerar o valor estacionário da temperatura também pondera o ciclo

térmico sofrido pelos componentes eletrônicos, seja pelo número de ciclos térmicos ou por variação da amplitude térmica. Portanto, esse fator é modelado de uma forma mais realista para aplicações que apresentam variações de temperatura.

2.3.4 - FIDES

FIDES é uma norma de confiabilidade, disponível desde janeiro de 2004 e atualizada em 2009, desenvolvida por um consórcio da indústria francesa, sob a supervisão do departamento de defesa francês. As empresas participantes são: AIRBUS France, Eurocopter, Nexter Electronics, MBDA France, Thales Systèmes Aéroportes SA, Thales Avionics, Thales Corporate Services SAS e Thales Underwater Systems.

A metodologia FIDES é baseada na física de falhas e é validada pela análise de dados de teste, retorno de campo e de modelos físico-químicos existente. Tem como objetivo permitir uma avaliação realista de confiabilidade de equipamentos eletrônicos, incluindo sistemas operacionais em ambientes extremos (por exemplo, sistemas de defesa, aeronáutica, eletrônica, industrial e de transporte).

O método de predição dessa norma pondera três aspectos relevantes para o cálculo da taxa de falha: efeitos físicos, características relacionadas à fabricação e características do processo. Com relação aos efeitos físicos são considerados: temperatura, ciclo de temperatura, temperatura dos conectores (solda), vibração, umidade e agentes químicos; características relacionadas à fabricação: qualidade dos componentes, experiência do fabricante, tipo de encapsulamento, certificação do fabricante (exemplo: ISO 9000), etc.; e características do processo que se referem aos aspectos ambientais e condições de uso dos equipamentos. Dessa forma, as principais características dessa norma são:

- A existência de modelos para componentes eletrônicos, eletromagnéticos, placas eletrônicas e subconjuntos eletrônicos.
- Compilação teórica de diversos fatores tecnológicos e físicos significativos na determinação da confiabilidade de componentes eletrônicos.
- Modelagem da vida do componente (curva da banheira) e metodologias para análise das influências provocadas por estocagem e transporte dos componentes eletrônicos.
- Metodologia para avaliar estresses elétricos, mecânicos e térmicos.
- Avaliação de falhas relacionadas ao desenvolvimento, produção, operação e processos de manutenção.

2.3.5 - IEC 61709

Diferentemente de outras normas [13, 14, 16] a IEC 61709 não apresenta taxas de falha mas descreve como as taxas podem ser recalculadas e utilizadas em situações diferentes da situação original. Utilizando os modelos de estresse, permite extrapolação das taxas de falha de referência, taxa de falha obtida em campo ou por meio de normas de predição, para outras condições de operação. Sendo assim a IEC 61709 possibilita a previsão da taxa de falhas em situações de estresse, permitindo estimativa do efeito de alterações nas condições ambientais sobre confiabilidade dos componentes. Os modelos de estresse apresentados nessa norma são genéricos e simples quanto comparados com as equações mais complexas contidas em outros modelos como Telcordia SR332, IEC TR 62380, MIL-HDBK-217F e FIDES.

A IEC 61709 apresenta correções para componentes eletrônicos com tensão elétrica, corrente elétrica, temperatura e fatores ambientais. Assim como outras normas já apresentadas [13-16], essa também utiliza modelos baseados em classificação de ambientes por classes ou grupos. Porém, apresenta apenas três classificações, o que torna a análise

simplista. A própria norma aconselha a utilização de normas mais específicas para a classificação ambiental, visto suas limitações para aplicação referente a correções devido a estresses ambientais.

2.4 - Exemplo de Aplicação

Nesta seção são apresentados exemplos de aplicações que contemplam a metodologia para determinação da taxa de falhas dos componentes eletrônicos utilizada nas normas: Telcordia SR332, IEC TR 62380, MIL-HDBK-217F e FIDES, e também ambientes com diversos fatores ambientais adversos para que os métodos e aspectos ambientais possam ser confrontados.

Como exemplo será utilizado um conversor típico com modulação SV-PWM (injeção de sequência zero) com uma frequência de chaveamento de 4800 Hz, cuja topologia é apresentada na Figura 2.1. Para esse conversor de 230 Volts, foram considerados os seguintes componentes: capacitores eletrolíticos de 400 Volts, IGBTs e diodos de 600 Volts. A premissa da análise desenvolvida é a de que a falha de qualquer componente irá interromper o funcionamento normal do circuito.

Nesse momento, o objetivo é a familiarização do leitor com as técnicas e metodologias utilizadas para determinação das taxas de falhas dos componentes eletrônicos especialmente quando expostos a ambientes adversos. Por esse motivo são analisados apenas alguns componentes eletrônicos do conversor: diodo retificador, capacitor eletrolítico, IGBT e diodo de “roda livre”, veja Figura 2.1 e Tabela 2-3. No Capítulo 4 será analisado um sistema de acionamento de motores complexo, contendo diversos componentes eletrônicos do

conversor de frequência, além de outros elementos relevantes ao sistema como: sistema de proteção, transformador, motor de indução trifásico e cabos.

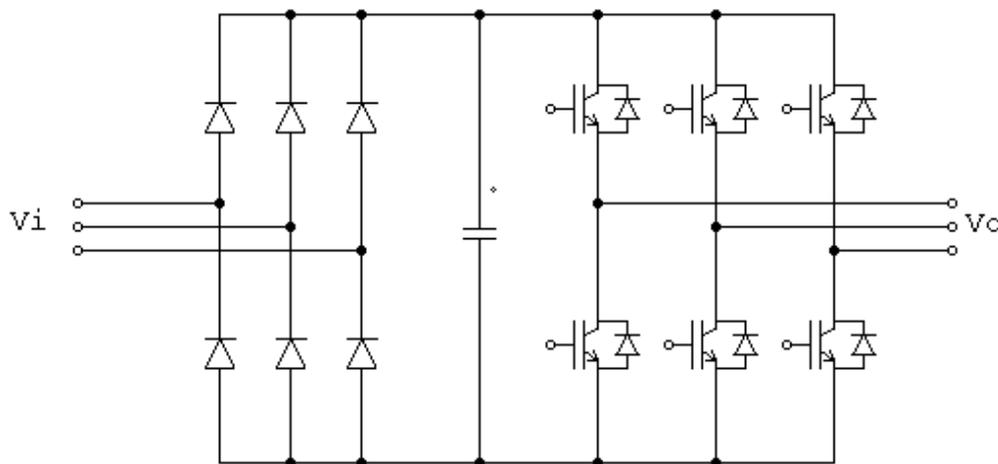


Figura 2.1: Conversor típico com modulação SV-PWM [31].

Tabela 2-3: Número de componentes eletrônicos

Componente eletrônico	Número de itens
Diodo retificador	6
Capacitor eletrolítico	14
IGBT	6
Diodo de “roda livre”	6

A seguir são apresentadas cinco situações utilizando esse conversor típico (modulação SV-PWM), Figura 2.1, sob diferentes fatores de estresse ambiental: (i) ambiente sem estresse, (ii) temperatura elevada, (iii) umidade, (iv) vibração e (v) areia e poeira.

Para as normas Telcordia SR332, IEC TR 62380, MIL-HDBK-217F a taxa de falha do conversor foi calculada segundo a equação (2.3), visto que fatores de correção devidos a estresse ambiental são necessários para converter a taxa de falha em valores aplicáveis para as condições de funcionamento (condições de estresse ambiental). Dessa maneira utiliza-se uma simplificação da equação (2.2), pois este exemplo considera apenas o estresse devido a influências ambientais.

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n (\lambda_{ref} \cdot \pi_T \cdot \pi_E)_i \quad (2.3)$$

Conforme citado no decorrer deste capítulo, a norma FIDES apresenta uma metodologia diferenciada para a determinação da taxa de falha. Por esse motivo a determinação da taxa de falha de acordo com essa norma foi realizada segundo as prescrições nela contidas.

2.4.1 - Exemplo 1: Ambiente sem estresse ambiental

Neste primeiro exemplo considera-se um ambiente sem estresse, cuja temperatura é de 30°C, umidade relativa igual a 70% e isento de areia, poeira, vibração e demais fatores adversos. Os resultados para a taxa de falha são apresentados na Tabela 2-4, e a função da confiabilidade é mostrada na Figura 2.2.

Como esse ambiente não apresenta estresse ambiental, a taxa de falha de cada componente é a própria taxa de falha de referência, ou seja, o fator de estresse ambiental (π_E) é igual a 1 para todos os componentes.

É importante verificar que as taxas de falhas desse ambiente são próximas, independente da norma utilizada, tal característica também pode ser observada ao analisar a proximidade das curvas de confiabilidade apresentadas na Figura 2.2.

Tabela 2-4: Taxa de falha [10⁻⁹ horas] estimada para cada item do sistema – Ambiente sem estresse.

Estresse Ambiental	Item	Telcordia SR332	MIL-HDBK-217F	FIDES	IEC TR 62380
Sem Estresse	Diodo	39,312	48,010	43,181	43,755
	Capacitor Eletrolítico	45,000	31,172	39,351	49,843
	IGBT	40,560	41,169	45,795	51,981
	Diodo de roda livre	21,600	23,260	17,542	22,598
	Conversor	1238,832	1111,042	1190,019	1407,816

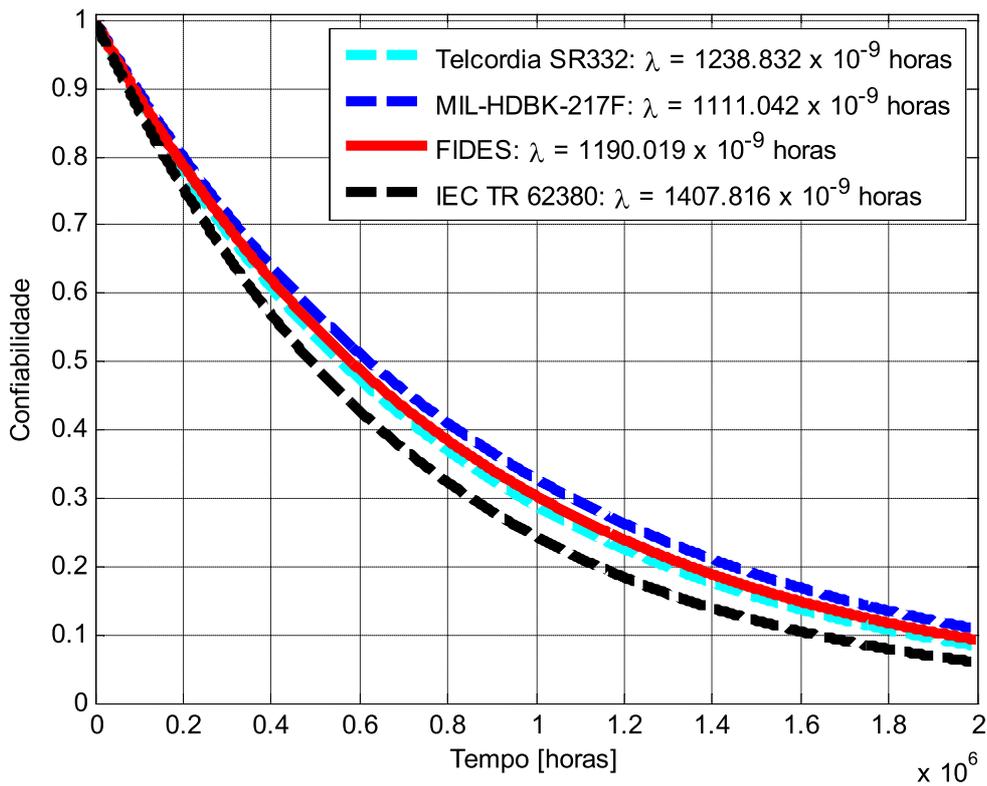


Figura 2.2: Confiabilidade do conversor – Sem estresse ambiental.

2.4.2 - Exemplo 2: Temperatura elevada

O segundo exemplo é um ambiente similar ao primeiro, exceto pela temperatura no qual se encontra o conversor, que, nesse exemplo, será de 60°C (temperatura elevada). Os resultados para a taxa de falha são apresentados na Tabela 2-5, e a função da confiabilidade é mostrada na Figura 2.3.

Conforme foi amplamente discutido no decorrer deste capítulo, a temperatura é o fator melhor caracterizado pelas normas de predição de confiabilidade. Por esse motivo todas as normas em estudo apresentam métodos para sua correção. Como as taxas de falha para ambientes sem estresse são próximas, e como os métodos para correção devido à temperatura são bem conhecidos, seria esperado que os valores das taxas de falha fossem praticamente os mesmos, independentemente da norma utilizada (análogo ao caso sem estresse). Essa

suposição foi verificada, pois as taxas de falhas foram praticamente as mesmas, independentemente da norma utilizada, as curvas da confiabilidade também foram semelhantes, o que ratifica essa constatação. O que difere do caso anterior, sem estresse ambiental, é o fato de a taxa de falha ser maior devido ao estresse provocado pela temperatura elevada, efeito também esperado visto que o conversor opera em um ambiente hostil (temperatura elevada).

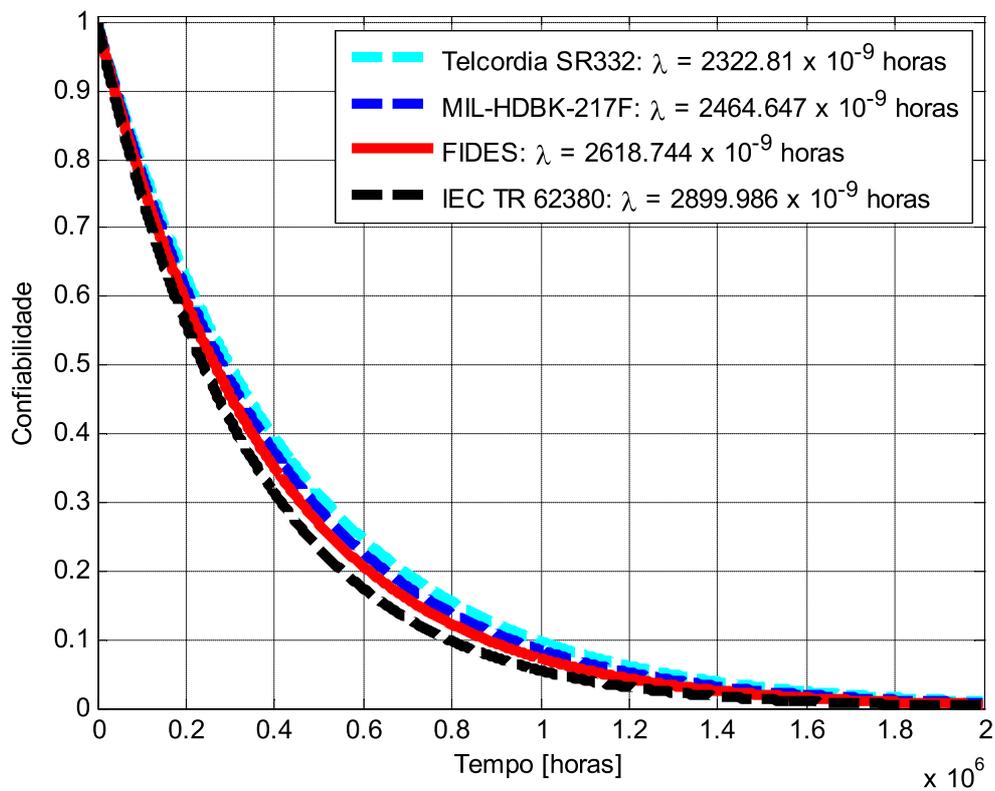


Figura 2.3: Confiabilidade do conversor – Temperatura Elevada.

Tabela 2-5: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Temperatura Elevada.

Estresse Ambiental	Item	Telcordia SR332	MIL-HDBK-217F	FIDES	IEC TR 62380
Temperatura elevada	Diodo	73,710	76,816	87,201	50,514
	Capacitor Eletrolítico	84,375	100,709	92,667	143,417
	IGBT	76,050	61,754	95,705	63,995
	Diodo de roda livre	40,500	37,216	37,329	34,182
	Conversor	2322,810	2464,647	2618,744	2899,986

2.4.3 - Exemplo 3: Umidade

Diferentemente do primeiro exemplo, o terceiro considera a umidade relativa igual a 90%, conquanto os demais fatores continuem os mesmos. Os resultados para a taxa de falha são apresentados na Tabela 2-6 e a função da confiabilidade é mostrada na Figura 2.4.

Como esse ambiente apresenta estresse ambiental, a taxa de falha de cada componente é a taxa de falha de referência multiplicada pelo fator de estresse ambiental, equação (2.3), com exceção da norma FIDES que propõe uma metodologia diferente das outras.

Conforme foi discutido no decorrer deste capítulo, a norma IEC TR 62380 não apresenta fatores para correção ambiental, por esse motivo todas as correções para as taxas de falhas dessa norma foram efetuadas segundo a IEC 61709, norma também proposta pela IEC.

Nesse exemplo é observada uma maior discrepância entre as taxas de falha, em especial com relação à norma militar (MIL-HDBK-217F). Essa característica, que também será observada nos dois próximos exemplos, se deve principalmente à utilização do fator de correção por meio das classes ambientais que tendem a ser imprecisas e subjetivas, pois não apresentam uma caracterização consistente do ambiente. No subitem 2.4.6 será feita uma análise mais detalhada sobre a discrepância quando se utiliza a correção por meio de classificações ambientais.

Tabela 2-6: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Umidade.

Estresse Ambiental	Item	Telcordia SR332	MIL-HDBK-217F	FIDES	IEC TR 62380
Umidade	Diodo	78,624	432,090	79,299	87,510
	Capacitor Eletrolítico	90,000	280,548	75,946	99,687
	IGBT	81,120	247,014	81,913	103,963
	Diodo de roda Livre	43,200	209,340	53,659	45,197
	Conversor	2477,664	9258,336	2352,475	2815,633

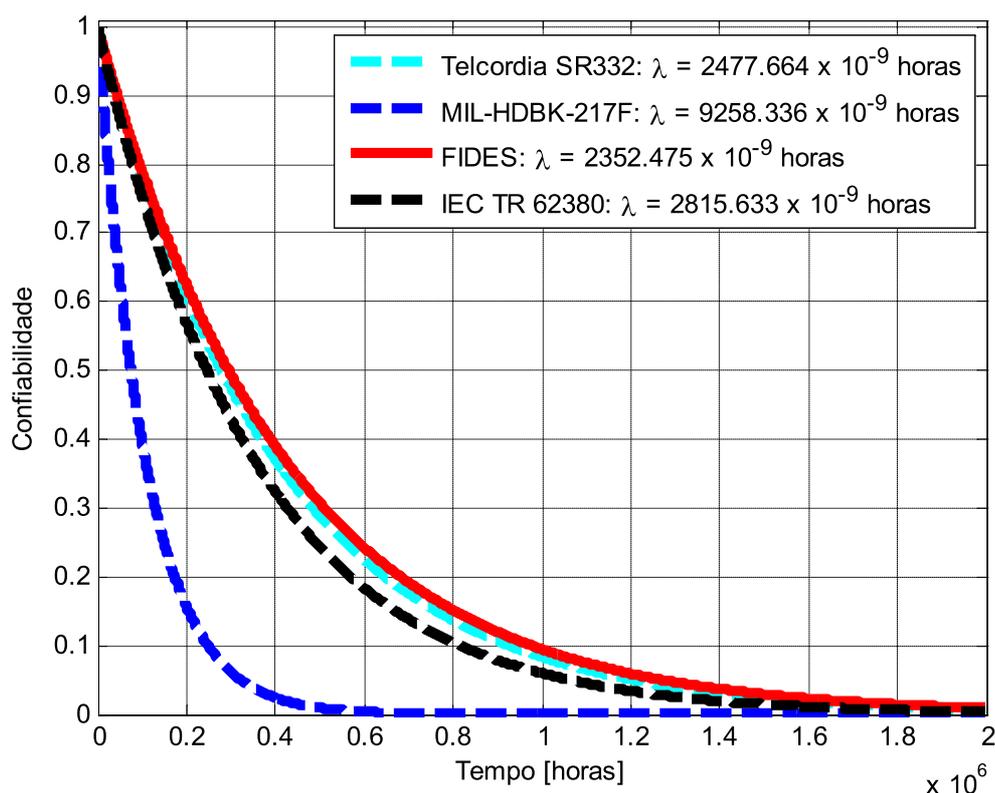


Figura 2.4: Confiabilidade do conversor – Umidade.

2.4.4 - Exemplo 4: Vibração

Como fator de estresse, o quarto exemplo considera a vibração de 100 m/s^2 e a amplitude igual a 10 mm. Os resultados para a taxa de falha são apresentados na Tabela 2-7, e a função da confiabilidade é apresentada na Figura 2.5.

Assim com o exemplo anterior, nessa aplicação a taxa de falha de cada componente é obtida pelo fator de estresse ambiental.

Tabela 2-7: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Vibração.

Estresse Ambiental	Item	Telcordia SR332	MIL-HDBK-217F	FIDES	IEC TR 62380
Vibração	Diodo	78,624	288,060	66,421	87,510
	Capacitor Eletrolítico	90,000	311,720	146,661	99,687
	IGBT	81,120	247,014	69,034	103,963
	Diodo de roda Livre	43,200	139,560	40,781	45,197
	Conversor	2477,664	8411,884	3110,665	2815,633

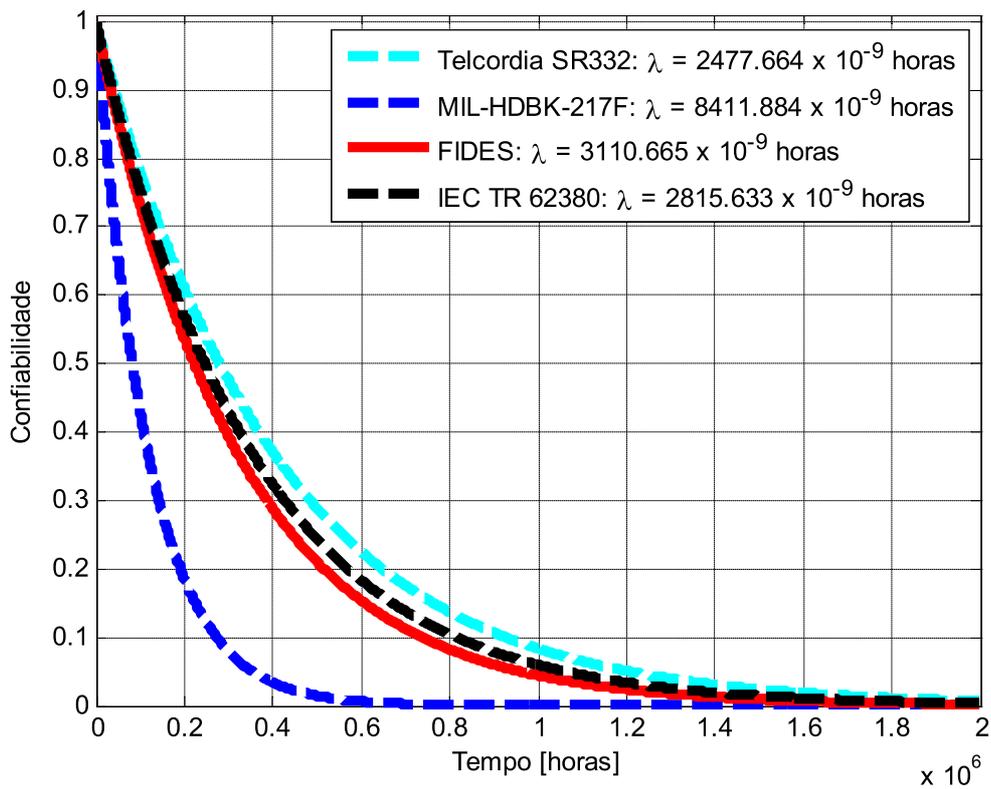


Figura 2.5: Confiabilidade do conversor – Vibração.

2.4.5 - Exemplo 5: Areia e poeira

O quinto exemplo considera o ambiente com níveis de presença de areia e poeira de 400 mg/m^3 e 2 mg/m^3 , respectivamente. Os resultados para a taxa de falha são apresentados na Tabela 2-8, e a função da confiabilidade é mostrada na Figura 2.6.

Assim como no exemplo anterior, neste ambiente a taxa de falha de cada componente é obtida pelo fator de estresse ambiental. Porém este ambiente apresenta uma particularidade: todas as normas (incluindo a FIDES) utilizaram para correção o fator de estresse ambiental segundo as classes ambientais. Também é observado que este exemplo apresenta a maior discrepância entre as taxas de falha do conversor.

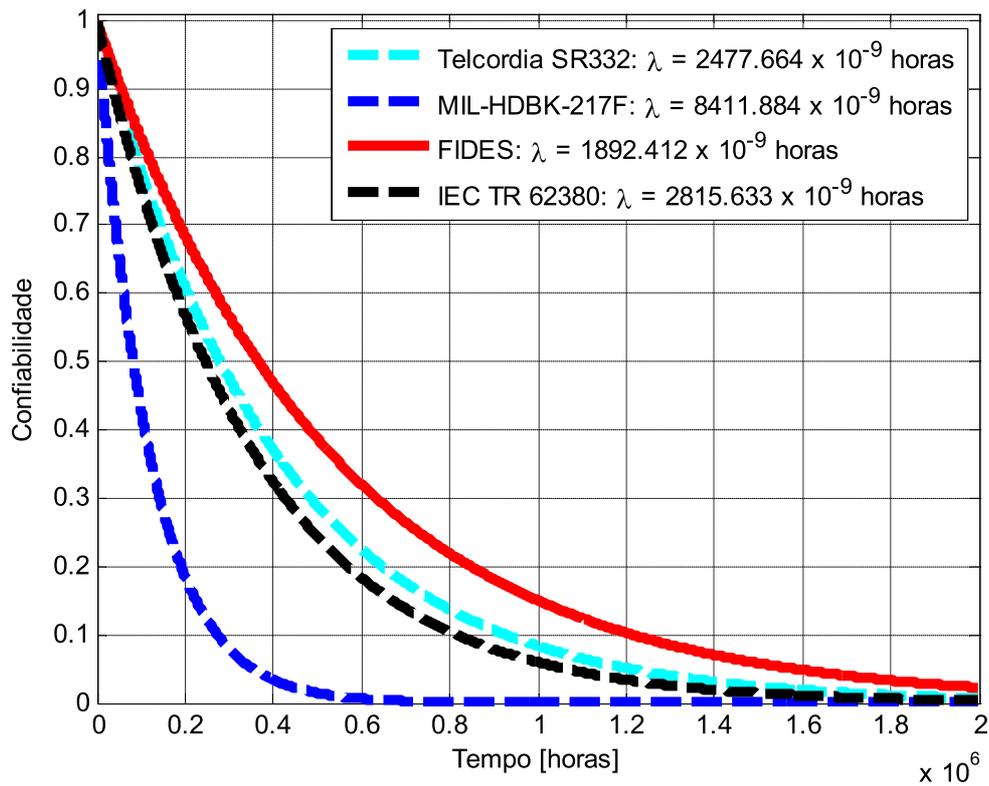


Figura 2.6: Confiabilidade do conversor – Areia e poeira.

Tabela 2-8: Taxa de falha [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema – Areia e Poeira.

Estresse Ambiental	Item	Telcordia SR332	MIL-HDBK-217F	FIDES	IEC TR 62380
Areia e Poeira	Diodo	78,624	288,060	66,911	87,510
	Capacitor Eletrolítico	90,000	311,720	64,435	99,687
	IGBT	81,120	247,014	70,961	103,963
	Diodo de roda Livre	43,200	139,560	27,182	45,197
	Conversor	2477,664	8411,884	1892,412	2815,633

2.4.6 - Análise dos Resultados

No primeiro exemplo, quando o ambiente não possui estresse ambiental, se observa que as taxas de falha estimadas para o conversor são praticamente as mesmas segundo todas as normas em estudo. Como consequência as curvas da função de confiabilidade também são semelhantes. Logo, apesar de utilizarem diferentes técnicas e metodologias, as normas de predição de taxa de falhas resultam em valores semelhantes

quando o conversor não está exposto a nenhum tipo de estresse ambiental. Para ratificar essa conclusão, a Tabela 2-9 apresenta as seguintes figuras de mérito: tempo médio até a falha (MTTF), percentual esperado de falhas nos dois primeiros anos de uso e tempo no qual 10% e 50% dos mecanismos estarão fora de operação (percentil 10% e tempo mediano, respectivamente), para que outros índices de confiabilidade também possam ser confrontados. Essa semelhança é principalmente entendida ao confrontar o percentual de falhas nos dois primeiros anos das quatro normas utilizadas, que são semelhantes apesar das diferenças das normas (metodologia, ano de publicação, ambiente proposto, tecnologia dos componentes, banco de dados para predição da taxa de falha, etc.).

Tabela 2-9: Figuras de mérito - Conversor de frequência.

Estresse Ambiental	Figura de Mérito	Telcordia SR332	MIL-HDBK-217F	FIDES	IEC TR 62380
Sem Estresse	MTTF [horas]	807211,95	900055,98	840322,72	710320,10
	Falhas - Dois anos ¹	1,79%	1,61%	1,72%	2,03%
	Percentil 10% [horas]	85048,27	94830,36	88536,83	74839,69
	Tempo mediano [horas]	559516,69	623871,27	582467,32	492356,37
Temperatura Elevada	MTTF [horas]	430513,04	405737,62	381862,45	344829,25
	Falhas - Dois anos ¹	3,33%	3,53%	3,75%	4,15%
	Percentil 10% [horas]	45359,08	42748,72	40233,22	36331,39
	Tempo mediano [horas]	298408,90	281235,89	264686,88	239017,42
Umidade	MTTF [horas]	403605,98	108010,77	425084,22	355159,92
	Falhas - Dois anos ¹	3,55%	12,64%	3,38%	4,03%
	Percentil 10% [horas]	42524,13	11380,07	44787,09	37419,83
	Tempo mediano [horas]	279758,35	74867,36	294645,93	246178,10
Vibração	MTTF [horas]	403605,98	118879,43	321474,67	355159,92
	Falhas - Dois anos ¹	3,55%	11,56%	4,44%	4,03%
	Percentil 10% [horas]	42524,13	12525,20	33870,74	37419,83
	Tempo mediano [horas]	279758,35	82400,94	222829,26	246178,10
Areia e Poeira	MTTF [horas]	403605,98	118879,43	528426,16	355159,92
	Falhas - Dois anos ¹	3,55%	11,56%	2,73%	4,03%
	Percentil 10% [horas]	42524,13	12525,20	55675,25	37419,83
	Tempo mediano [horas]	279758,35	82400,94	366277,10	246178,10

¹ Falhas nos primeiros dois anos considerando uma jornada de trabalho de vinte horas diárias.

Observação: **Azul** norma mais otimista e **Vermelho** norma mais conservadora.

Como todas as normas utilizam o modelo de Arrhenius para a quantificação do estresse devido a temperatura, as taxas de falha também são pouco modificadas quando esse fator é aplicado. O que demonstra que esse fator é bem conhecido e que pode ser facilmente quantificado, qualquer que seja a norma utilizada. Entretanto quando os demais aspectos de estresse ambiental são analisados, observa-se uma discrepância entre as normas, especialmente com relação à MIL-HDBK-217F que se mostra bastante conservadora com relação à taxa de falha estimada. Isso se deve principalmente a três aspectos: i) dentre todas as normas, essa é a mais antiga (última revisão 1995). Sendo assim, as outras normas tiveram uma base de dados maior durante sua elaboração, o que proporciona uma melhor caracterização de aspectos ambientais; ii) a aplicação dessa norma é militar, diferente das demais que têm ambientes industriais e de telecomunicações, sua aplicação sendo para um ambiente mais danoso; e iii) a tecnologia dos componentes utilizados pela norma também é mais antiga, quando comparado às outras normas, o que pode provocar uma falha prematura dos componentes quando comparado a componentes com tecnologia mais recente, os quais se utilizam de materiais mais robustos.

O ambiente que apresentou maior discrepância entre as normas foi o que continha areia e poeira. Este ambiente foi o único em que todas as normas corrigiram o fator de estresse segundo as classes ambientais. O que demonstra que a utilização de classes pode ser subjetiva e levar a erros, principalmente quando normas diferentes são utilizadas.

Por meio das figuras de mérito apresentadas, conclui-se que a norma mais otimista é a MIL HDBK-217F e a mais conservadora é a IEC TR 62380 para o ambiente que não apresenta estresse ambiental. Para o ambiente com temperatura elevada a norma mais otimista é a Telcordia SR332, e a mais conservadora é a IEC TR 62380. Para os ambientes contendo umidade, vibração e areia e poeira (ambientes que utilizam a classificação

ambiental) a norma mais conservadora é a MIL HDBK-217F para todas as três situações, enquanto as mais otimistas são FIDES (umidade; areia e poeira) e Telcordia SR332 (vibração).

Ao comparar os ambientes em estudo, observa-se que houve um aumento significativo da taxa de falha dos componentes quando submetidos a ambientes adversos e, como consequência, uma piora dos níveis de confiabilidade do conversor (figuras de mérito). Fica, portanto, demonstrado que esses ambientes influenciam negativamente a confiabilidade do sistema de acionamento de motores, o que já era esperado. Logo, a análise do ambiente no qual o conversor está inserido não pode ser desprezada.

2.5 - Considerações Finais

Neste capítulo foram analisadas diferentes situações relativas à influência das condições ambientais na confiabilidade dos componentes eletrônicos do sistema de acionamento de motores de indução trifásicos, esclarecendo-se aspectos pouco explorados na literatura. Como principais conclusões, citam-se: i) diversos fatores ambientais podem interferir na taxa de falha de componentes eletrônicos, sendo que alguns componentes são mais susceptíveis a uma determinada condição ambiental do que outros e, dentre todos os fatores ambientais, a temperatura é a mais abordada na literatura; ii) previsões da taxa de falha são úteis para diversas atividades na fase de concepção de equipamentos eletrônicos, e diversos manuais são encontrados na literatura com esse propósito; iii) manuais, de uma forma geral, não contemplam de maneira adequada os estresses ambientais, sendo que muitas vezes são necessárias aproximações que podem levar a análises subjetivas ou a erros na determinação das taxas de falha; iv) diversas figuras de mérito podem ser determinadas a

partir da taxa de falha, que são importantes para conhecimento das características operacionais do sistema, tais como o tempo médio até a falha e percentual esperado de falhas nos n primeiros anos de uso do equipamento; v) mesmo quando sob estudo, o mesmo fator ambiental as normas de predição podem levar a resultados diferentes, o que se deve principalmente ao item em estudo, ao ambiente para o qual a norma é proposta, a tecnologia empregada pelo componente e a metodologia utilizada pela norma.

CAPÍTULO 3

APLICAÇÃO DA TEORIA DOS CONJUNTOS *FUZZY* PARA ESTIMAR A CONFIABILIDADE

3.1 - Considerações Iniciais

Conforme visto no capítulo anterior, diversos agentes físico/químicos devem ser ponderados, segundo as normas para a determinação dos fatores de estresse ambiental. Entretanto, de forma geral, muitos não são precisamente quantificados, apesar de, potencialmente, poderem vir a causar mau funcionamento de diversos equipamentos. Além disso, algumas variáveis não podem ser tratadas pela álgebra tradicional por apresentarem características incertas ou por serem dificilmente quantificadas. Mesmo assim, tais agentes ambientais, sendo fundamentais para o estudo do sistema, não podem ser ignorados.

Essa relação entre conceitos subjetivos e números pode ser realizada através de uma modelagem matemática, específica, utilizando-se a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Essa teoria mostra-se mais adequada à manipulação de variáveis incertas e subjetivas do que a matemática clássica por meio de conjuntos *crisp*.

Para o entendimento do método a ser utilizado para a manipulação das variáveis *fuzzy*, é necessário o conhecimento de algumas definições pertinentes, as quais foram apresentadas no Apêndice B. No item a seguir, discute-se sobre a forma como essa modelagem foi utilizada neste trabalho, para o propósito de determinação das taxas de falhas dos componentes de um sistema de acionamento e de sua confiabilidade.

3.2 - Motivação e Fundamentação para a Escolha do Método *Fuzzy*

Conforme foi visto no Capítulo 2, diversos fatores ambientais interferem no desempenho dos equipamentos eletrônicos e, conseqüentemente, nos índices de confiabilidade dos mesmos. Assim, diferentes normas para predição de taxa de falha [13-16] apresentam métodos para quantificar/corrigir os estresses provocados aos componentes devido às interferências ambientais mais relevantes. Neste aspecto, cada norma possui a sua própria metodologia para a previsão de taxa de falhas; dessa maneira, o usuário deve se atentar às técnicas, métodos e fatores empregados na norma/manual utilizado.

Quando as normas são utilizadas para prever taxas de falhas em ambientes hostís, essas mostram subjetivas e imprecisas, pois não descrevem de maneira adequada cada ambiente específico com potencial de degradação para os componentes eletrônicos, ou seja, as normas propõem taxas de falhas e também correções devido ao estresse ambiental, mas não caracterizam precisamente o ambiente ao qual o item é exposto.

Todavia, existe outro conjunto de normas [20, 25-27] - normas de classificação ambiental - que são apropriadas para descrever de forma precisa o ambiente, apesar de não apresentarem valores numéricos para taxas de falhas e/ou correções. Tais normas têm como finalidade caracterizar, qualitativamente, ambientes para diversas aplicações, como: setores industriais, telecomunicações, mineração, marítimo, etc.; porém, o objetivo dessas não é apresentar modelos para correção de taxa de falha, mas sim, apenas caracterizar o ambiente.

Observam-se, então, duas classes de normas: para predição/correção das taxas de falhas e para caracterização do ambiente. Pode-se unir esses dois tipos de normas por meio de uma metodologia baseada na teoria *fuzzy*, aperfeiçoando a análise do estresse ambiental e

minimizando a subjetividade quando se utiliza meramente normas/manuais de predição de taxa de falhas.

A filosofia deste método, que foi desenvolvido no âmbito dessa dissertação, encontra-se detalhado na sequência. A Figura 3.1 apresenta um esquemático da ideia que foi concebida. Uma vez caracterizado o ambiente (por meio das normas ambientais) é possível estimar o fator de correção das taxas de falha (normas de predição), sendo que, essa correlação é realizada por meio de regras *fuzzy*. As próximas seções apresentam detalhadamente como esse método foi elaborado.

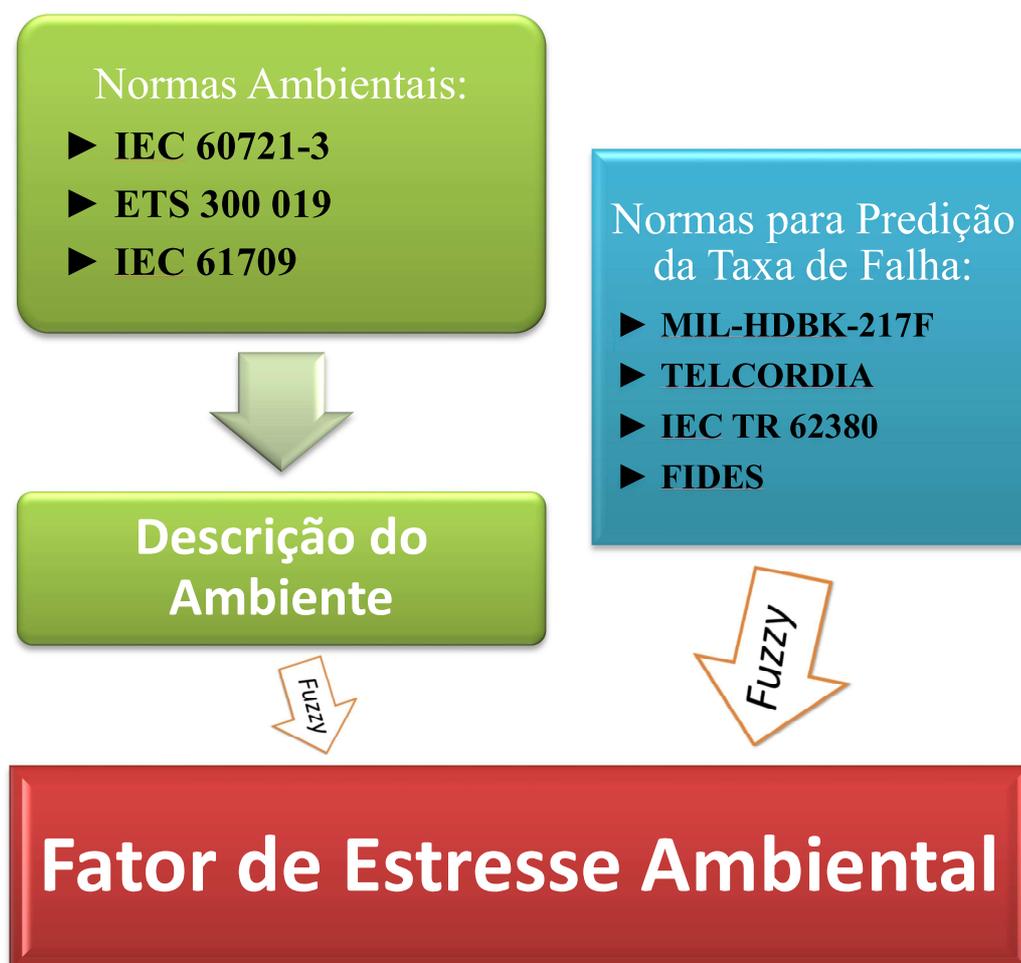


Figura 3.1: Esquema da aplicação das normas/lógica fuzzy.

3.3 - Sistema Baseado em Regra *Fuzzy* (SBRF)

A degradação de componentes eletrônicos e, conseqüentemente, o aumento da taxa de falhas dos componentes, é um parâmetro essencial na modelagem da sua confiabilidade. Depende de fatores como a temperatura, umidade relativa, vibração, pressão, choque mecânico, agente químico e poeira, sendo, portanto, considerados no modelo da taxa de falha como funções dessas variáveis. Sabe-se que pode haver mais fatores ambientais que influenciam na deterioração dos componentes eletrônicos; todavia, o aumento na quantidade de variáveis em um problema ocasiona um aumento da sua complexidade, tornando-o mais difícil de ser resolvido matematicamente. Além disso, os valores de outros fatores podem não ser conhecidos e, em diversas situações, podem nem mesmo ser monitorados em ambientes industriais, o que acarretaria um aumento da complexidade sem sua devida aplicação.

As variáveis Temperatura Alta (TA), Temperatura Baixa (TB), Umidade Relativa (UR), Variação de Temperatura (VT), Vibração - Amplitude (VA), Areia (AR), Pressão (PR), Choque Mecânico - aceleração (CM), Agente Químico – Salinidade (Cl, NO, etc. - AQ) e Poeira (PO), apesar de poderem ser representadas numericamente, neste trabalho optou-se por tratá-las como variáveis *fuzzy*, pelos seguintes motivos:

- i) Conforme foi apresentado no capítulo anterior, para se estimar a taxa de falha dos componentes eletrônicos, pode-se utilizar normas para a sua predição. Entretanto, apesar de os fatores de estresse supracitados serem relevantes, são diversas as normas [13, 14] que não contemplam especificamente os agentes supracitados de uma forma precisa e independente, sendo considerados de forma apenas qualitativa ao se eleger um dos ambientes propostos pelas normas. Assim, uma vez que não é apresentado um valor numérico associado ao nível de cada fator ambiental de estresse, o método proposto por

essas normas implica em uma análise bastante subjetiva, necessitando da experiência de um especialista para atribuir o valor mais indicado frente ao ambiente sob estudo. Fica claro que essa subjetividade pode ser mais bem analisada utilizando-se as variáveis *fuzzy*.

ii) Apesar das normas tradicionais de predição da taxa de falha [13-16] não apresentarem valores precisos de diversos fatores ambientais, tais como vibração, umidade, poeira, dentre outros, outras normas são específicas para caracterização dos ambientes [25-27], sendo que, as condições ambientais especificadas pelas mesmas limitam-se aos fatores que podem afetar diretamente o desempenho dos componente eletrônicos, sem apresentar, no entanto, os efeitos dessas condições. Dessa maneira, tais normas apenas classificam o ambiente, informando a existência de agentes ambientais que potencialmente podem prejudicar os componentes eletrônicos, sem apresentar como esses influenciam a deterioração dos mesmos, sob os aspectos físicos e/ou químicos. Entretanto, conforme foi discutido no Capítulo 2, a literatura [22, 23, 32, 33] apresenta os processos físico-químicos de como cada fator ambiental interfere na degradação dos componentes eletrônicos, sendo alguns potencialmente mais prejudiciais que outros, principalmente quando coexistem. Logo, a ferramenta *fuzzy* se torna uma boa alternativa, visto que, por meio do conhecimento das normas de predição de confiabilidade, das normas ambientais e do processo de degradação dos componentes, é possível analisar de forma conjunta e mais precisa todos os fatores ambientais em estudo.

iii) Alguns dos valores quantitativos dos fatores não são conhecidos com exatidão, visto que em ambientes industriais nem todos esses parâmetros são monitorados e, como se

deseja que o método seja extrapolado para diversas aplicações, em se sabendo dos efeitos de tais fatores, eles podem ser considerados como estimativas. Neste trabalho, os valores são previsões ou estimativas e são rotulados linguisticamente como “alto”, “alto-médio”, “médio”, “médio-baixo” ou “baixo”. Acredita-se que o tratamento por meio de SBRF seja mais apropriado por se considerar as incertezas inerentes às variáveis em questão.

Apesar da variedade de possibilidades de estruturas para o sistema baseado em regra *fuzzy*, a forma básica de todos os tipos comuns consiste em *Fuzzificação*, Base de regras *fuzzy*, Mecanismo de Inferência e *Defuzzificação* [34, 35]. A Figura 3.2 faz uma representação gráfica da estrutura *fuzzy* aplicada ao problema da influência do ambiental sobre os componentes eletrônicos, e, nessa representação, mostram-se os principais conhecimentos necessários (normas/manuais utilizadas) para a determinação do SBRF em cada uma das etapas supracitadas.

Tendo-se em mãos estimativas para os fatores ambientais (temperatura e vibração, por exemplo), é possível inferir valores para o parâmetro de estresse ambiental. Especialistas são capazes de informar verbalmente como as variações supracitadas influenciam na degradação dos componentes eletrônicos. Por exemplo, altas temperaturas podem provocar envelhecimento térmico, mudança estrutural, aceleração de reações químicas, derretimento de componentes, dentre outras implicações, o que pode provocar falha de isolamento, alteração de propriedades elétricas, perda de propriedades de lubrificação, falha estrutural, aumento de tensões mecânicas e maior desgaste em partes móveis. É, portanto, um fator com alto impacto no aumento da taxa de falha. Já baixas temperaturas podem provocar aumento da viscosidade, solidificação, formação de gelo, fragilização, contração física e pode ocasionar falhas como: fissuração, fratura estrutural, desgaste maior em partes móveis, alteração de propriedades

elétricas e perda de resistência mecânica. Logo, baixa temperatura é um fator que tem um menor impacto no aumento da taxa de falha quando comparado aos efeitos ocasionados por altas temperaturas em componentes eletrônicos. Ou seja, podem-se modelar as informações no formato de regras *fuzzy* e construir um Sistema Baseado em Regras Fuzzy (SBRF) para inferir os valores dos parâmetros desejados.

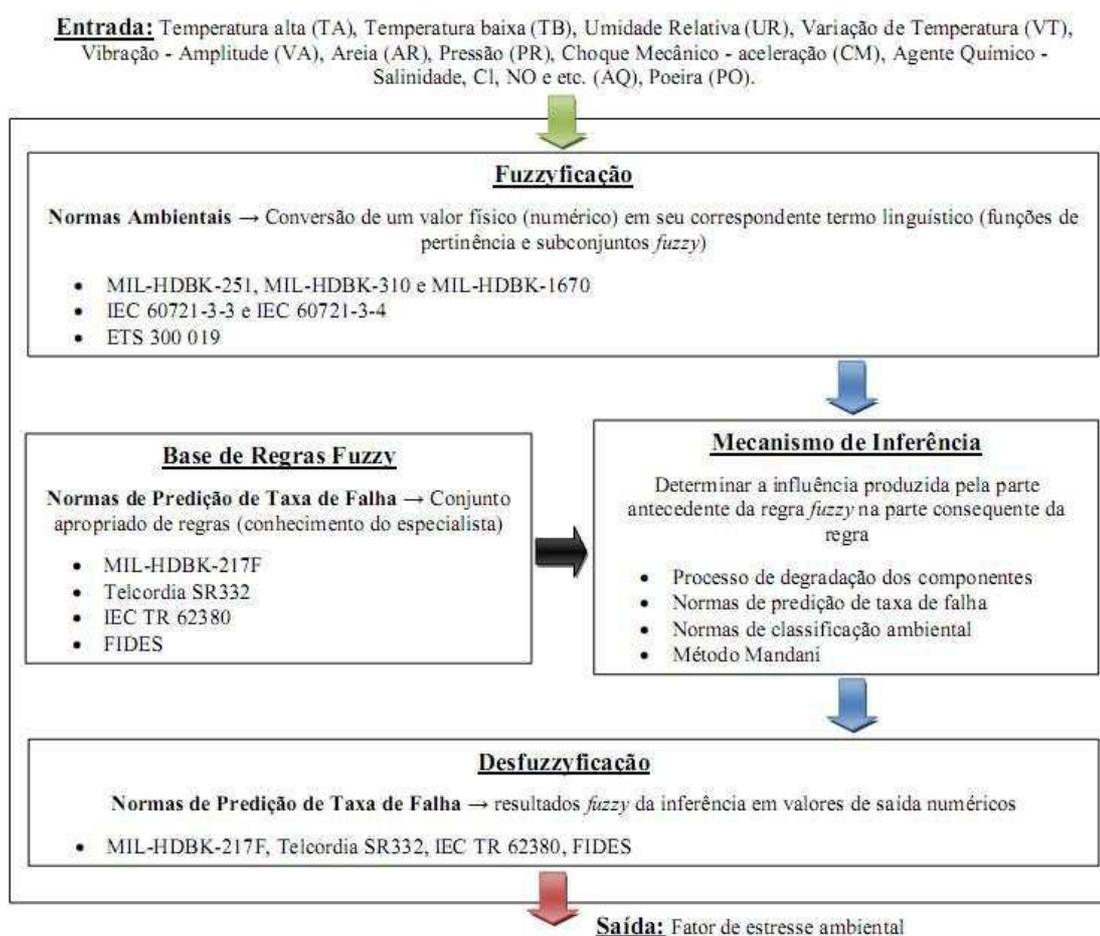


Figura 3.2: Sistema Baseado em Regra Fuzzy (SBRF) aplicada ao problema da influência do ambiental sobre os componentes eletrônicos

Em geral, o método de inferência fuzzy que apresenta os melhores resultados é o de Mamdani. O KTS (Kang-Takagi-Sugeno), apesar de também ser bastante popular, é mais analítico, exigindo que se tenha um conhecimento mais apurado do problema em termos

matemáticos, de maneira a tornar possível uma boa modelagem das funções representativas do sistema. Por não se ter tal conhecimento e uma vez que se considera o primeiro método satisfatório, a opção neste trabalho será pelo método de inferência de Mamdani.

As funções de pertinência dos fatores ambientais podem ter diferentes formas, tais como trapezoidal, triangular, gaussiana, entre outras. Devido ao fato das normas ambientais [20, 22, 25-27, 32, 33] classificarem os ambientes por faixas de valores, neste trabalho foi adotada a forma trapezoidal; dessa maneira, a transição das faixas de valores ocorre suavemente. A título de ilustração, a Figura 3.3, por exemplo, apresenta a função de pertinência “médio” da variável Temperatura Alta (função de pertinência trapezoidal).

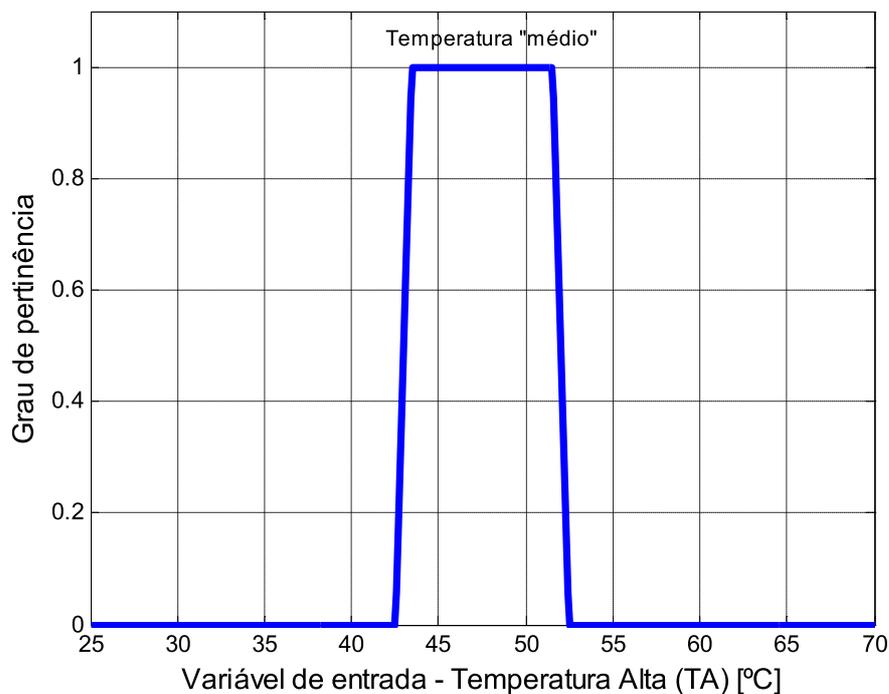


Figura 3.3: Função de pertinência “médio” da variável Temperatura Alta.

Para ratificar a escolha das funções de pertinência trapezoidais para as variáveis de entrada cita-se, como exemplo, a norma IEC 60721-3-3 [25], que classifica o ambiente segundo as condições climáticas normais e especiais (temperatura, umidade, pressão, etc.),

condições biológicas (fauna e flora), condições físico-químicas ativas (substâncias químicas, areia e poeira) e condições mecânicas (vibração e choque mecânico), ou seja, classifica todas as variáveis ambientais que são utilizadas neste trabalho. Essa norma também se torna uma base para definir a classificação ambiental em outras normas, como a IEC TR 62380 e a ETS 300 019, por exemplo. A Tabela 3-1 apresenta o estresse mecânico (choque e vibração) para os principais tipos de ambiente, e podendo-se observar que essa classificação é feita por meio de faixas de valores. Tal característica também é utilizada nos outros fatores ambientais; portanto, devido a essa abordagem, foi escolhida a função de pertinência trapezoidal para as variáveis ambientais de entrada.

Tabela 3-1: Classificação ambiental segundo a IEC 60721 para o estresse mecânico.

Vibração											Choques	
Aceleração m/s ²	Frequência Hz	50	100	200	200	300	300	500	1000	2000	Pico da aceleração m/s ²	Duração ms
↓	↓	22	11	6	11	6	11	2,3	6	0,5	←	←
1	200	A										
10	200			B								
20	200		←	C		→						
20	500		←	D		→						
20	2000		E									
30	500						←	F		→		
30	2000		G									
50	200		← H →									
80	2000				I							
150	2000				J							L
Classificação ambiental: A: Estacionário em terra (ambiente protegido) B: Estacionário em terra (ambiente não protegido) C: Naval D: Não estacionário em terra E: Transporte Aéreo F: Estacionário em terra (ambiente não protegido) – Grave G: Transporte Aéreo - Moderado H: Naval – Grave I: Transporte Aéreo – Grave J: Transporte Aéreo - Extremamente grave L: Lançamento de Satélite												

Neste trabalho são utilizadas dez variáveis de entrada para o SBRF, quais sejam: Temperatura Alta (TA), Temperatura Baixa (TB), Umidade Relativa (UR), Variação de

Temperatura (VT), Vibração - Amplitude (VA), Areia (AR), Pressão (PR), Choque Mecânico - aceleração (CM), Agente Químico – Salinidade (Cl, NO, etc. - AQ) e Poeira (PO). Ainda que essas variáveis possam assumir valores clássicos, elas passam por um processo de fuzzyficação, recebendo valores como “alto”, “médio-alto”, “médio”, “médio-baixo” e “baixo”. Com a finalidade de ilustrar essas funções de pertinência, a Figura 3.4 apresenta a variável Temperatura Alta (TA); analogamente para as demais variáveis de entrada também foram utilizadas funções de pertinência trapezoidais.

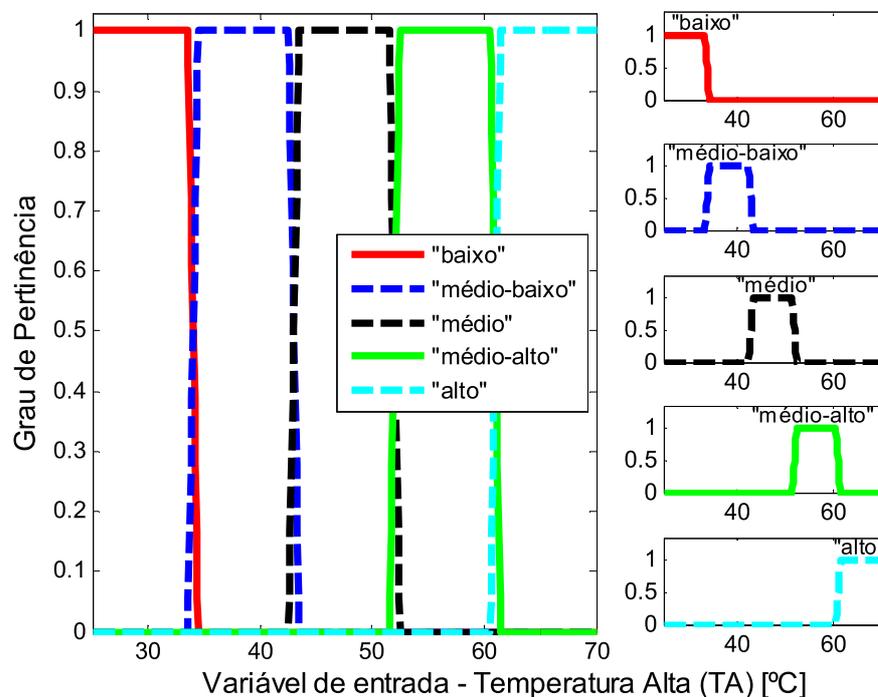


Figura 3.4: Função de pertinência - Temperatura Alta.

No exemplo ilustrado pela Figura 3.4, a variável Temperatura Alta (TA) recebe o valor “baixo” com pertinência igual a 1 em pontos nos quais a temperatura for baixa (apresentando valores menores que 33,55°C). Para temperaturas maiores entre, 33,55 e 34,45°C, a temperatura passa a pertencer simultaneamente aos subconjuntos *fuzzy* “baixo” e “baixo-médio”, embora com um grau de pertinência menor para ambos os subconjuntos. Já

entre 34,45°C e 42,55°C, a variável pertencerá exclusivamente ao subconjunto *fuzzy* “baixo-médio” (grau de pertinência igual a 1). Dessa forma, a variável pode mudar de subconjuntos *fuzzy*, dependendo do seu valor, o que implicará em um determinado grau de pertinência a cada subconjunto.

A variável de saída é o fator de estresse ambiental, que, por ser dependente das variáveis ambientais, também é considerada *fuzzy*. Sua função de pertinência também foi considerada trapezoidal, conforme mostra a Figura 3.5, devido à classificação segundo as normas de predição [13-16] que utilizam faixas de valores para tal fator.

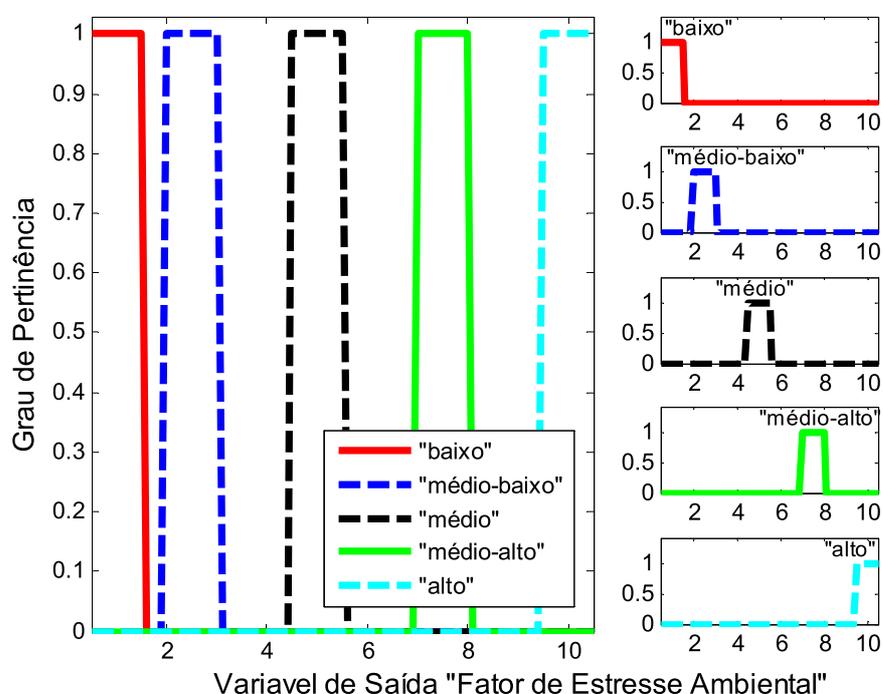


Figura 3.5: Função de pertinência - Fator de Estresse Ambiental.

A base de regras, neste trabalho, foi construída de acordo com as informações dos fenômenos físico-químicos que potencialmente degradam os componentes eletrônicos, obtidos por meio de extensa revisão bibliográfica sobre as formas como o ambiente pode influenciar a deterioração de componentes eletrônicos. Essa revisão foi apresentada no

Capítulo 2, e compreendeu a consulta a fontes como livros/artigos [12, 22-24, 28-30, 31-33], normas/manuais de predição de taxa de falha [13-16] e normas/manuais de classificação ambiental [25-27]. As proposições da base de regras são descritas na forma linguística, sendo as variáveis e suas classificações linguísticas modeladas por conjuntos *fuzzy*. Na base de regras são definidas as funções de pertinência e regras de inferência a serem utilizadas para se obter a relação *fuzzy* que leva à linguagem matemática as regras anteriormente escritas de forma linguística.

Com o objetivo de reduzir o número de regras *fuzzy* resultante do elevado número de entradas (dez fatores de estresse ambiental) e subconjuntos (cinco funções de pertinência), neste trabalho foram utilizados fatores de ponderação (pesos) [35] para cada regra do sistema *fuzzy*. O fator de ponderação dependerá do potencial de degradação de cada agente de estresse.

A Tabela 3-2 apresenta as regras utilizadas na composição da base de regras *fuzzy* para o fator de estresse ambiental “baixo” (variável de saída), utilizado aqui como exemplo. As regras para os demais fatores de estresse ambiental (“alto”, “médio-alto”, “médio” e “médio-baixo”) são elaboradas de forma análoga.

Neste trabalho, utilizou-se o *Toolbox Fuzzy* do *software* MATLAB [36] para a elaboração do SBRF; nele são definidas as variáveis entrada TA, TB, UR, VT, VA, AR, PR, CM, AQ, PO, sendo que a variável de saída é o próprio fator de estresse e os valores que eles podem assumir (os subconjuntos *fuzzy* “baixa”, “baixa-média”, “média”, “média-alta” ou “alta”). São inseridas regras como as citadas na Tabela 3-2 e selecionado o método de inferência de Mamdani, sendo a *defuzzificação* realizada através do método do centro de gravidade, que é muito difundido no meio acadêmico [34, 35].

Tabela 3-2: Fator de Ponderação para o Fator de Estresse Ambiental.

Fator de Estresse	Variável de Entrada	Variável Linguística da Entrada	Fator de Ponderação
"baixo"	TB	"alto"	0,0200
	TA	"baixo"	0,1733
	VT	"baixo"	0,0467
	PR	"baixo"	0,0133
	UR	"médio-alto"	0,1000
	VA	"baixo"	0,1600
	CM	"baixo"	0,1600
	AR	"baixo"	0,1400
	PO	"baixo"	0,1400
	AQ	"baixo"	0,0467

Na próxima seção, a fim de proporcionar ao leitor um maior entendimento sobre a metodologia utilizada, e para fins de comparação com o método utilizado em normas de predição de taxas de falhas, será apresentado um exemplo de aplicação do método proposto a um sistema de acionamento de motores para algumas situações de estresse ambiental.

3.4 - Exemplo de Aplicação

Nesta seção, são apresentados os mesmos exemplos de aplicação utilizados no Capítulo 2 para a determinação da taxa de falhas dos componentes eletrônicos, segundo as normas Telcordia SR332, IEC TR 62380, MIL-HDBK-217F e FIDES; contudo, na presente análise, a metodologia para a correção da taxa de falhas será por meio do SBRF. Como exemplo, utilizou-se o mesmo conversor com modulação SV-PWM e frequência de chaveamento de 4,8 kHz, já apresentado na Figura 2.1.

Neste momento, o objetivo é comparar as metodologias (normas e SBRF) utilizadas para a determinação das taxas de falhas dos componentes eletrônicos quando expostos a ambientes adversos. De forma a simplificar o estudo, são analisados apenas alguns componentes eletrônicos do conversor: diodo retificador, capacitor eletrolítico, IGBT e diodo

de “roda livre”, tal como feito no exemplo do Capítulo 2. No Capítulo 4 será apresentado um exemplo mais complexo, representando-se o sistema de acionamento do motor com maior nível de detalhamento.

Utilizando o método SBRF, a taxa de falhas do conversor foi calculada segundo a equação (4.1), na qual em que λ_{ref} é o valor de referência da taxa de falha (para a condição sem estresse ambiental) e π_E é o fator de correção obtido por meio do SBRF.

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n (\lambda_{ref} \cdot \pi_E)_i \quad (4.1)$$

A seguir são apresentadas cinco situações de estresse ambiental envolvendo o conversor em análise. Os resultados para cada fator de estresse ambiental e as taxas de falhas são apresentados nas Tabela 3-3 e 3-4, respectivamente.

Tabela 3-3: Fatores de estresse presentes nos ambientes adversos analisados.

Fator Ambiental	Ambientes				
	Sem estresse	Temperatura Elevada	Umidade	Vibração	Areia e Poeira
TB	15° C	15° C	15° C	15° C	15° C
TA	30° C	60° C	30° C	30° C	30° C
VT	0,1° C/min	0,1° C/min	0,1° C/min	0,1° C/min	0,1° C/min
PR	101 kPa	101 kPa	101 kPa	101 kPa	101 kPa
UR	70 %	70 %	90 %	70 %	70 %
VA	0,3 mm	0,3 mm	0,3 mm	10 mm	0,3 mm
CM	1 m/s ²	1 m/s ²	1 m/s ²	100 m/s²	1 m/s ²
AR	0 mg/m ³	0 mg/m ³	0 mg/m ³	0 mg/m ³	400 mg/m³
PO	0,01 mg/m ³	0,01 mg/m ³	0,01 mg/m ³	0,01 mg/m ³	2 mg/m³
PQ	0 mg/m ³	0 mg/m ³	0 mg/m ³	0 mg/m ³	0 mg/m ³
Fator de Estresse	1	2,1267	1,9	2,16	1,56

Tabela 3-4: Taxa de falhas [10^{-9} horas] estimada para cada item do sistema.

Estresse Ambiental	Item	Telcordia SR332	MIL-HDBK-217F	FIDES	IEC TR 62380
Sem Estresse	Diodo	39,312	48,010	43,181	43,755
	Cap. Eletrolítico	45,000	31,172	39,351	49,843
	IGBT	40,560	41,169	45,795	51,981
	Diodo de roda	21,600	23,260	17,542	22,598
Conversor	SBRF	1238,832	1111,042	1190,019	1407,816
	Normas	1238,832	1111,042	1190,019	1407,816
Diferença percentual¹		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Temperatura Elevada	Diodo	83,605	102,103	91,833	93,054
	Cap. Eletrolítico	95,702	66,293	83,688	106,001
	IGBT	86,259	87,554	97,392	110,548
	Diodo de roda	45,937	49,467	37,307	48,059
Conversor	SBRF	2634,624	2362,853	2530,813	2994,002
	Normas	2322,810	2464,647	2618,744	2899,986
Diferença percentual		13,42%	-4,13%	-3,36%	3,24%
Umidade	Diodo	74,693	91,219	82,044	83,135
	Cap. Eletrolítico	85,500	59,227	74,767	94,702
	IGBT	77,064	78,221	87,011	98,764
	Diodo de roda	41,040	44,194	33,330	42,936
Conversor	SBRF	2353,781	2110,980	2261,036	2674,850
	Normas	2477,664	9258,336	2352,475	2815,633
Diferença percentual		-5,00%	-77,20%	-3,89%	-5,00%
Vibração	Diodo	84,914	103,702	93,271	94,511
	Cap. Eletrolítico	97,200	67,332	84,998	107,661
	IGBT	87,610	88,925	98,917	112,279
	Diodo de roda	46,656	50,242	37,891	48,812
Conversor	SBRF	2675,877	2399,851	2570,441	3040,883
	Normas	2477,664	8411,884	3110,665	2815,633
Diferença percentual		8,00%	-71,47%	-17,37%	8,00%
Areia e Poeira	Diodo	61,327	74,896	67,362	68,258
	Cap. Eletrolítico	70,200	48,628	61,388	77,755
	IGBT	63,274	64,224	71,440	81,090
	Diodo de roda	33,696	36,286	27,366	35,253
Conversor	SBRF	1932,578	1733,226	1856,430	2196,193
	Normas	2477,664	8411,884	1892,412	2815,633
Diferença percentual		-22,00%	-79,40%	-1,90%	-22,00%

¹Diferença percentual considerando como referência a norma sob estudo

1. **Ambiente sem estresse ambiental** – ambiente sem estresse, com temperatura de 30°C, umidade relativa igual a 70% e com mínima presença de areia, poeira, vibração e demais fatores adversos (ver Tabela 3-3).

2. **Temperatura elevada** – condições semelhantes ao primeiro caso, exceto pela temperatura do ambiente no qual se encontra o conversor que agora é de 60°C (temperatura elevada).
3. **Umidade** – umidade relativa igual a 90%, sendo que os demais fatores continuam os mesmos.
4. **Vibração** – vibração de 100 m/s² e amplitude igual a 10 mm, os demais fatores são idênticos ao ambiente sem estresse.
5. **Areia e poeira** – presença de areia e poeira, em níveis de 400 mg/m³ e 2 mg/m³, respectivamente. Não há a presença de outros agentes ambientais.

3.5 - Análise dos Resultados e Validação do Método Desenvolvido

A seguir é feita uma análise para todos os ambientes utilizados nesse exemplo, comparando-se os valores encontrados pelo método SBRF e aqueles gerados pelos métodos tradicionais (utilizados pelas normas de predição).

3.5.1 - Ambiente sem estresse ambiental

No primeiro caso, relativo a um ambiente que não impõe nenhum estresse ambiental adicional, observa-se que as taxas de falha obtidas pela metodologia das normas/manuais e pelo SBRF foram idênticas. Esse resultado já era esperado, pois o SBRF não propõe valores para a taxa de falhas, apenas os corrige devido à presença de fatores de estresse ambientais. Como o primeiro exemplo é um ambiente sem estresse, não existem correções a serem realizadas, de forma que a taxa de falha deve ser a mesma (original). Também é importante observar que, apesar das normas utilizarem diferentes técnicas e

metodologias para a determinação da taxa de falhas, elas resultam em valores semelhantes quando o conversor não está exposto a nenhum tipo de estresse ambiental, característica já discutida no Capítulo 2.

3.5.2 - Temperatura elevada

Pode-se observar que houve pouca variação no valor da taxa de falhas para o ambiente que apresenta temperatura elevada (diferença percentual entre 3 e 4%, aproximadamente), exceto ao comparar o resultado obtido pela norma Telcordia SR332 (diferença de 13,42%). Ou seja, para a maioria das metodologias utilizadas, a taxa de falhas é praticamente a mesma para o caso de temperatura elevada, resultado também já observado no Capítulo 2.

A maior diferença percentual apresentada pela norma Telcordia SR332 frente às demais se deve, principalmente, pela metodologia utilizada pela mesma para a caracterização do estresse do capacitor eletrolítico. As demais normas utilizam fatores de correções diferentes para capacitores em relação aos outros dispositivos, já que estes apresentam um processo de degradação diferenciado dos outros componentes eletrônicos; a norma Telcordia SR332, entretanto, considera a mesma correção, independentemente do componente utilizado, o que resulta em diferenças entre os valores obtidos por outras normas. Uma maneira de reduzir essa diferença seria utilizar uma metodologia *fuzzy* do tipo 2, pois essa lógica trata as incertezas associadas aos conjuntos *fuzzy*, o que não é contemplado na lógica *fuzzy* tradicional, viabilizando, portanto, a manipulação de termos imprecisos em toda sua extensão, como, por exemplo, essa característica da degradação dos componentes eletrônicos. Dessa maneira, a lógica *fuzzy* do tipo 2 poderia ser usada em situações onde existe incerteza a

respeito dos graus de pertinência, incerteza do formato das funções de pertinência ou incerteza em alguns dos parâmetros das funções de pertinência [37].

Também é importante reiterar que para se determinar a taxa de falha do conversor não são analisados apenas os quatro componentes em estudo (diodo, capacitor, IGBT e diodos de “roda livre”), mas sim vários desses elementos (no mínimo seis de cada); logo, a diferença do resultado numérico proveniente da análise de cada componente é propagada sucessivamente para o conversor inteiro, aumentando-se a diferença percentual obtida no resultado final. Entretanto, mesmo considerando tal propagação do erro, a diferença entre as taxas de falha mostrou-se pequena, independentemente da metodologia utilizada.

Outra questão que explica as diferenças encontradas entre os métodos é o fato da correção feita pelas normas considerar apenas o fator de estresse da temperatura elevada, isoladamente, enquanto o método SBRF considera conjuntos que contém todos os dez fatores ambientais (ainda que os outros nove estejam em seu valor mais baixo). Por meio do SBRF, utilizado nesse trabalho, para que o fator de estresse apresente um valor elevado é necessário que os demais fatores também apresentem níveis elevados do estresse, ou seja, para que o nível do fator seja extremo é necessário um conjunto de fatores desfavoráveis aplicados ao meio. Sendo assim, é necessário que mais de um agente apresente níveis agressivos para o ambiente cujo componente é exposto. Essa característica faz com que o fator de estresse seja reduzido, pois esse só será elevado se houver a contribuição de outros agentes ambientais agindo simultaneamente (vibração ou poeira, por exemplo); por essa razão, a diferença percentual das normas MIL HDBK 217F e FIDES foram negativas, o que significa que os valores obtidos por meio das normas são maiores que os valores encontrados pelo método SBRF. Entretanto, a diferença da norma IEC TR 62380 é positiva (valor de +3,24%), isso significa que o fator aplicado para o estresse provocado pela temperatura elevada é menor que

o valor proposto pelo SBRF, isso ocorre porque o fator que essa norma atribui é inferior ao comparar com as demais normas (diferenças relacionadas à qualidade dos componentes, ambiente o qual a norma se aplica e metodologia para correção); porém, apesar de apresentar um valor positivo, a diferença percentual nesse caso foi o mínimo dentre todas as normas estudadas.

3.5.3 - Umidade

Ao considerar um ambiente contendo umidade relativa elevada, também se verificou uma pequena diferença entre os valores obtidos por três das quatro normas empregadas (diferença percentual inferior a 5%). Contudo, a norma MIL HDBK 217F destacou-se por apresentar uma grande discrepância, de -77,20%. O que explica tamanha diferença é que a norma militar não apresenta uma correção exclusiva para a umidade, ou seja, diversos fatores de estresse, além da umidade, são combinados em um determinado grupo (grupo de classificação). Nesse grupo se encontram os seguintes fatores: umidade, baixa temperatura, ciclo de temperatura, radiação solar, choque mecânico, choque provocado por explosão, presença de fungos, salinidade, umidade, vibração (constante e periódica) e interferência eletromagnética. Vale ressaltar que muitos fatores não são contemplados pelo método *fuzzy* proposto, e além disso, a intensidade dos fatores utilizados por essa norma são elevados por representarem ambientes militares, ou seja, ambientes mais críticos e, portanto, com elevado potencial de degradação.

De forma a se investigar tal aspecto, foi feita uma nova simulação empregando-se o método proposto, mas utilizando-se no mesmo valores mais próximos para os agentes ambientais daqueles considerados pela norma MIL HDBK 217F, apresentados na Tabela 3-5. Ou seja, tentou-se aproximar, no SBRF, o ambiente definido pela norma militar; tornando a

comparação entre esses dois métodos mais coerente. Após tal ajuste, é encontrado um fator de estresse ambiental igual a 5,59, o que reduz a diferença para -32,92%. Apesar do decréscimo considerável na diferença percentual entre os resultados, tem-se que os mesmos ainda mostram-se muito discrepantes, o que pode ser explicado pelos seguintes fatores:

Tabela 3-5: Ajuste do ambiente com umidade de forma a aproximá-lo daquele definido pela MIL-HDBK-217F.

Fator Ambiental	Umidade Militar
TB	-45° C
TA	70° C
VT	5° C/min
PR	101 kPa
UR	100 %
VA	100 mm
CM	30 m/s ²
AR	500 mg/m ³
PO	0,01 mg/m ³
PQ (Salinidade)	80 mg/m ³
Fator de Estresse	5,59

- Não foram contabilizados todos os fatores hostis, ou seja, a norma RADC-TR-80-299 [38] (norma que caracteriza a MIL-HDBK-217F) considera mais fatores que aqueles utilizados no método proposto (tal como mencionado previamente). É possível incluí-los no método proposto, mas isso aumentaria a complexidade do sistema, sem necessariamente incrementar a exatidão do método. Isso porque em muitas situações os valores a serem utilizados para esses outros agentes ambientais são desconhecidos, o que acabaria resultando em incertezas nos cálculos realizados.
- Sabe-se que a ação conjunta de diversos fatores pode causar uma degradação nos componentes proporcionalmente maior do que aquela obtida pela soma da influência de cada fator calculada isoladamente. Ou seja, na prática, o dano causado pela ação conjunta dos fatores pode ser proporcionalmente maior que a superposição da soma do estresse causado por cada um dos fatores hostis. E tal questão não é contabilizada pelo

método proposto, mas é contemplada naturalmente pelo método proposto pela norma militar, que utiliza resultados de observação de campo, obtidos ao longo do tempo.

3.5.4 – Vibração

No caso do ambiente com vibração, ao se comparar os resultados obtidos, houve uma discrepância significativa entre os valores provenientes da metodologia SBRF e os apresentados pelas normas/manuais, especialmente quando se analisa as normas MIL HDBK 217F e FIDES. No caso da primeira, os motivos de tamanha diferença (-71,47%) são os mesmos apresentados quando se analisou o ambiente contendo umidade (utilização de classes ambientais e ação conjunta de diversos agentes ambientais, por exemplo). Já na norma FIDES a discrepância (diferença de -17,37%) se deve a metodologia aplicada, que nessa situação, considera equações para a correção da vibração, porém somente contempla a amplitude, sem considerar choques mecânicos (que podem ser avaliados, por essa norma, por meio da classificação ambiental).

Observou-se que, para a determinação da taxa de falhas, as normas militar e FIDES mostraram-se mais conservadoras, pois um certo ambiente pode conter níveis apenas baixos ou moderados desses fatores adversos, mas, como em geral as normas/manuais não fornecem com exatidão o nível de estresse ao qual o componente é exposto, essas duas normas, em especial, acabam considerando níveis mais críticos, principalmente por caracterizarem ambientes militares (principalmente a MIL HDBK 217F, mas, indiretamente, também a FIDES, que é fruto de uma associação dos setores industrial e militar francês). Assim, sempre que a uma determinada classe for atribuído um fator adverso, esse tende a ser tratado por essas duas normas com um valor mais extremo. Contudo, ao se utilizar a metodologia SBRF, é possível especificar melhor o ambiente, atribuindo níveis mais

adequados aos fatores de estresse. Assim, essa metodologia é mais realista (não necessita ser tão conservadora), uma vez que os níveis utilizados são melhor caracterizados.

Além disso, o método SBRF, apesar de utilizar todos os fatores atuando de forma conjunta, pode considerar de forma mais acentuada a influência individual dos agentes ambientais (nesse caso, em especial, a vibração), o que não é possível quando se utiliza as normas. Enquanto no sistema proposto os níveis podem ser modificados (por meio das funções de pertinência), no método tradicional (por classes) isso não é tão simples, visto que os níveis das classes ou grupos já são definidos e sem valor numérico exato/conhecido, o que transforma a análise muito subjetiva.

Outra vantagem de se utilizar a metodologia SBRF é que, ao contrário das técnicas das normas de predição, não é necessário saber em que classe se deve enquadrar o ambiente a que o componente está exposto. Com o método proposto, baseado em SBRF, apenas se informam os valores das grandezas físicas e/ou químicas presentes, o que é suficiente para se obter o valor do estresse ambiental. Assim, elimina-se toda a subjetividade da classificação ambiental, pois a composição da base de regras do sistema *fuzzy* já realiza essa tarefa.

Por fim é importante reiterar que as normas, de uma forma geral, propõem as correções utilizando classes pré-definidas como parâmetro, representando assim diversos ambientes. Todavia, as mesmas tendem a limitar-se em apenas informar se o ambiente contém ou não o agente desfavorável (nesse caso específico, a vibração), cuja obtenção dos valores de referência é muito difícil. Além disso, geralmente, as normas não disponibilizam os valores os quais os testes foram realizados, isso dificulta a análise em ambientes com condições agressivas, tornando essa caracterização subjetiva e para a maioria dos casos imprecisa.

3.5.5 – *Areia e Poeira*

No último ambiente analisado, observa-se uma discrepância entre os valores calculados por todas as normas, com exceção da norma FIDES, tal como já havia sido observado no Capítulo 2. Dessa maneira, o método SBRF também tende a reproduzir tais diferenças, visto que o método não faz a correção em função de apenas uma norma; sua correção é consubstanciada nas características de degradação e de como o ambiente interfere na deterioração do componente tomando-se como base as informações de todas as normas estudadas, a literatura pesquisada e a experiência do especialista, conjuntamente. Dessa forma, o método proposto não tem por objetivo gerar resultados coincidentes com aqueles advindos de nenhuma norma especificada, mas sim aproximar, de forma ponderada, as correções propostas por todas elas em um ponto razoável ou intermediário (considerando a degradação dos componentes eletrônicos). Tal característica foi observada nesse último exemplo.

É interessante observar que, no caso de areia e poeira, o método SBRF se aproximou mais da norma FIDES (diferença de -1,90%), o que também já era esperado, pois, de todas as normas estudadas, essa é que faz a melhor caracterização do ambiente hostis, em razão dos seguintes fatores:

- Essa norma é mais atual (2009) e, portanto, contém um maior banco de dados, tanto em termos de diversidade de componentes contemplados quanto no que diz respeito ao período de observação.
- Considera componentes eletrônicos com tecnologia mais atual.
- Não é uma norma limitada a um ramo específico da indústria, mas sim elaborada por uma associação contendo membros da indústria de mineração, telecomunicações e militar, dentre outras.

3.5.6 – Considerações Gerais

Assim como mostrado no Capítulo 2, a Tabela 3-6 apresenta as figuras de mérito mais relevantes: tempo médio até a falha (MTTF), percentual esperado de falhas nos dois primeiros anos de uso e tempo no qual 10% e 50% dos mecanismos estarão fora de operação (percentil 10% e tempo mediano, respectivamente), para que esses índices de confiabilidade também possam ser confrontados. É importante ressaltar que todas as figuras de mérito apresentadas foram calculadas a partir das taxas de falha corrigidas pelo método SBRF proposto, mas utilizando os valores de referência (sem estresse) fornecidos pelas diferentes normas. Em outras palavras, o estresse ambiental em todos os casos foi calculado pela metodologia proposta; as normas foram utilizadas apenas para fornecer os valores originais das taxas de falha.

Tabela 3-6: Figuras de mérito - Conversor de frequência.

Estresse Ambiental	Figura de Mérito	Telcordia SR332	MIL-HDBK-217F	FIDES	IEC TR 62380
Sem Estresse	MTTF [horas]	807211,95	900055,98	840322,72	710320,10
	Falhas - Dois anos ¹	1,79%	1,61%	1,72%	2,03%
	Percentil 10% [horas]	85048,27	94830,36	88536,83	74839,69
	Tempo mediano [horas]	559516,69	623871,27	582467,32	492356,37
Temperatura Elevada	MTTF [horas]	379560,80	423217,19	395129,94	334001,11
	Falhas - Dois anos ¹	3,77%	3,39%	3,63%	4,28%
	Percentil 10% [horas]	39990,72	44590,38	41631,09	35190,53
	Tempo mediano [horas]	263091,50	293351,80	273883,21	231511,93
Umidade	MTTF [horas]	424848,36	473713,63	442275,13	373852,74
	Falhas - Dois anos ¹	3,38%	3,04%	3,25%	3,83%
	Percentil 10% [horas]	44762,24	49910,71	46598,34	39389,32
	Tempo mediano [horas]	294482,44	328353,27	306561,76	259134,97
Vibração	MTTF [horas]	373709,25	416692,54	389038,30	328851,85
	Falhas - Dois anos ¹	3,83%	3,44%	3,68%	4,34%
	Percentil 10% [horas]	39374,20	43902,94	40989,28	34648,00
	Tempo mediano [horas]	259035,52	288829,26	269660,80	227942,73
Areia e Poeira	MTTF [horas]	517443,54	576958,80	538668,30	455333,39
	Falhas - Dois anos ¹	2,78%	2,50%	2,67%	3,16%
	Percentil 10% [horas]	54518,12	60788,68	56754,37	47974,16
	Tempo mediano [horas]	358664,53	399917,37	373376,42	315613,05

¹ Falhas nos primeiros dois anos considerando uma jornada de trabalho de vinte horas diárias.

Uma semelhança entre os resultados obtidos é observada ao se analisar todas as figuras de mérito apresentadas na Tabela 3-6, o que já era esperado, visto que os valores de referência para as taxas de falha dos componentes não variam muito de uma norma para a outra. O ponto onde as normas de fato se divergem é na sua metodologia de correção devido ao estresse ambiental; contudo, como tal ajuste foi feito pelo SBRF proposto, tendo sido as normas utilizadas apenas para a obtenção do valor original da taxa de falhas, os resultados finais foram semelhantes. Por exemplo, ao se confrontar o percentual de falhas nos dois primeiros anos, há uma pequena discrepância entre os valores obtidos. Dessa maneira, ao se utilizar a metodologia SBRF para a correção das taxas de falha, os resultados serão semelhantes, independentemente da norma utilizada.

3.6 - Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentada uma metodologia para a predição de taxa de falhas de componentes eletrônicos, utilizando a teoria dos conjuntos *fuzzy*. O método desenvolvido se mostrou adequado para a manipulação de variáveis incertas e subjetivas, pois: i) diversos fatores ambientais puderam ser modelados para a correção da taxa de falha de componentes eletrônicos quando expostos a ambientes com alto poder de degradação; ii) conforme foi discutido no Capítulo 2, manuais, de forma geral, não contemplam de maneira adequada os aspectos ambientais, sendo que muitas vezes são necessárias aproximações que podem levar a análises subjetivas ou a erros na determinação das taxas de falha, enquanto a metodologia *fuzzy* reduziu tal subjetividade; iii) a subjetividade do problema residiu na elaboração da base de regras *fuzzy* e, uma vez que tal problema é solucionado (por um especialista com conhecimento da influência dos fatores ambientais sobre os componentes eletrônicos),

qualquer usuário pode efetuar as correções sem ter que se preocupar com a classe normatizada a qual deve ser atribuído o ambiente; iv) diversas figuras de mérito podem ser determinadas a partir da taxa de falha; logo, a análise de situações e/ou projetos pode ser realizada de uma forma mais coerente e precisa; v) por fim, é importante reafirmar que o método SBRF proposto, faz a correção para a taxa de falhas corrigindo o fator de estresse ambiental para um valor ponderado entre as correções propostas por cada normas de predição analisada e também considera as características físicoquímicas de degradação dos dispositivos eletrônicos, determinando, assim, o fator que deve ser aplicado para corrigir a taxa de falha para a condição ambiental adversa.

CAPÍTULO 4

CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DE MOTOR: EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 - Considerações Iniciais

Nos capítulos anteriores foram apresentados os efeitos prejudiciais à confiabilidade dos dispositivos eletrônicos quando os mesmos são expostos a condições adversas, tais como: vibração, poeira, umidade, elevadas temperaturas, dentre outros; e como esses podem reduzir a vida útil dos itens eletrônicos. Nesse tocante, foram discutidas como as principais normas/manuais para a predição da taxa de falhas dos componentes eletrônicos contemplam os ambientes hostis. Observou-se que, de uma maneira geral, essas não conseguem caracterizar o ambiente de uma forma apropriada, devido a diversos aspectos; cita-se, por exemplo, a subjetividade apresentada pela classificação ambiental, tão usual nas normas de predição. Nesse sentido, foi proposto um método, por meio de um Sistema Baseado em Regras *Fuzzy* (SBRF), para melhor caracterizar o ambiente e, conseqüentemente, determinar com mais exatidão o fator de estresse ambiental.

Os métodos apresentados (normas/manuais e SBRF) no decorrer desse trabalho (Capítulos 2 e 3) foram utilizados apenas para um conversor simples, em ambientes que continham apenas um ou dois fatores de estresse ambiental. Logo, faz-se necessário a aplicação do método proposto para um sistema de acionamento de motores mais complexo e para ambientes mais próximos daqueles encontrados no setor industrial; sob esse aspecto, este

capítulo analisa um sistema de acionamento de motores de indução trifásico mais complexo, proposto em [4, 11, 31], e submetido a quatro ambientes que reproduzem aplicações industriais específicas, quais sejam: ambientes (i) isento de estresse, (ii) mineração, (iii) marítimo (extração de petróleo) e (iv) siderúrgico.

4.2 - Detalhamento do Sistema de Acionamento Analisado

Na indústria, a confiabilidade e continuidade da produção são de extrema importância para a rentabilidade do setor. Vários exemplos podem ser citados, como o setor químico, petroquímico, siderúrgico, metalúrgico, mineração, dentre outros, cujos equipamentos são acionados por máquinas elétricas, como bombas, compressores, extrusoras, laminadores, trituradores, moinhos, exaustores e ventiladores. A falha dos motores muitas vezes ocasiona a paralisação total ou parcial da produção, com consequências econômicas críticas.

Em geral, as máquinas elétricas necessitam de um sistema de acionamento com velocidade variável, e, para isso utilizam conversores eletrônicos, cujos fabricantes oferecem uma grande variedade, diversas topologias, vasta gama de potência e diversos níveis de tensão elétrica. Além disso, muitos trabalhos são propostos para a melhoria do acionamento; por exemplo, em [7, 8] é proposta uma configuração não-convencional para sistemas de acionamento, a fim de minimizar os indesejáveis fenômenos de alta frequência que se manifestam em sistemas de acionamento utilizando cabos longos.

É interessante comparar a confiabilidade de diferentes sistemas de acionamento de motores. Porém, devido à infinidade de sistemas existentes para as diversas aplicações conhecidas, nesse trabalho optou-se pela escolha de apenas uma topologia para o conversor de

frequência, o VSI (*Voltage Source Inverters*) apresentado em [31] e utilizado nos Capítulos 2 e 3 desse trabalho. As características desse conversor, apresentado na Figura 2.1 (Capítulo 2), são: tensão de suprimento de 220 V, capacitores do barramento CC de 400 V, IGBTs e diodos de 600 V; além disso, também está incluso o dissipador, *cooler*, unidade de controle e sensores de tensão e corrente. Segundo [4], esse tipo de conversor é o mais utilizado para aplicações em baixa tensão para potências de até 1,5 MW. Vale ressaltar que o sistema de acionamento escolhido foi o não regenerativo; assim, diodos retificadores são utilizados nessa topologia VSI.

É importante destacar que a metodologia aplicada a esse conversor pode ser utilizada para qualquer outro. Dessa maneira, pode-se, por exemplo, buscar uma topologia que apresente um índice de confiabilidade dentro do desejado para o acionamento, conforme realizado em [4, 11]. Em outras palavras, para conhecer a confiabilidade do conversor deve-se somar a taxa de falha de todos os seus componentes eletrônicos, e assim se obter a taxa de falha total desse item, em seguida pode-se analisar os índices de confiabilidade, ou seja, determinar as figuras de mérito de interesse.

Para a análise da sua confiabilidade, o sistema de acionamento foi dividido em quatro subsistemas: (i) motor, (ii) conversor de frequência, (iii) transformador e (iv) circuito de proteção e cabos (disjuntor e cabos), conforme apresentado na Figura 4.1. A partir do ponto de vista da confiabilidade, tem-se uma estrutura em série, o que significa que todos os quatro subsistemas devem funcionar para que a unidade realize suas funções.



Figura 4.1: Sistema de acionamento do motor.

O conversor é o subsistema essencial dentro da unidade, consistindo de vários componentes eletrônicos que funcionalmente interagem uns com os outros de uma forma complexa. Nesse trabalho, o conversor de frequência foi dividido em três subsistemas (controle, potência e refrigeração), que são considerados dependentes uns dos outros sob os aspectos de confiabilidade, pois a falha de qualquer um dos subsistemas provoca falha no sistema global, já que o sistema de acionamento não poderá funcionar em suas condições nominais.

Conforme discutido nos capítulos anteriores, a primeira etapa para o estudo da confiabilidade é a determinação das taxas de falhas de todos os itens do sistema de acionamento, que neste trabalho foram obtidas da seguinte maneira:

- Componentes não eletrônicos – proteção, cabos, transformador e motor: após uma investigação de diferentes obras as taxas de falhas, as informações necessárias foram obtidas em [4], [11], [39-40].
- Componentes eletrônicos: as taxas de falha foram obtidas por meio das normas de predição das taxas de falhas [13-16], juntamente a valores encontrados em outras fontes ([4], [11], [31] e [40-41]).
- Cabe ressaltar que a opção por tais fontes consideraram: validade dos dados, adequação dos fatores ambientais, manutenção de dados, reconhecimento internacional, usabilidade e adequação de novas tecnologias.

A Tabela 4-1 mostra as taxas de falhas e o MTBF utilizados para estimar a confiabilidade do sistema de acionamento, em que todos os itens estão dentro de suas especificações elétricas e ambientais, ou seja, sem estresse ambiental.

Tabela 4-1: Taxa de falha utilizada para estimar a confiabilidade do sistema de acionamento do motor – Sem estresse ambiental.

Componente/Item	Taxa de falha [10 ⁻⁹ horas]	MTBF [anos]	Fonte ¹	Item do sistema
Componentes não eletrônicos				
Disjuntor	640	178	[4, 39]	Proteção e Cabos
Transformador	1600	71	[4, 39]	Transformador
Motor (Indução)	3200	36	[4, 11, 39]	Motor
Cabos	200	571	[40]	Proteção e Cabos
Componentes eletrônicos – Conversor				
Capacitor, 400 V	50	2283	[13-16] ²	Potência
IGBT, 600 V, 100 A	52	2195	[13-16] ²	Potência
Diodo de roda livre	23	4963	[13-16] ²	Potência
Diodo, 100V, 100A	50	2283	[13-16] ²	Potência
Amplificador Operacional	60	1903	[31, 41]	Controle
Capacitor, 30 V	320	357	[31, 41]	Controle
Conector	200	571	[11, 40]	Controle
Indutor	360	317	[31]	Controle
Sensor efeito hall	70	1631	[31]	Controle
Resistor	180	634	[31]	Controle
DSP (<i>Digital Signal Processor</i>)	2400	48	[31]	Controle
Conversor Analógico/Digital	100	1142	[31, 41]	Controle
Microcontrolador	470	243	[31]	Controle
<i>Cooler</i>	800	143	[4, 13]	Refrigeração

¹ Fonte: A coluna fonte indica a referência bibliográfica da qual a taxa de falha foi obtida.

² Os valores obtidos por meio das normas/manuais de predição são aproximadamente iguais quando se considera o componente eletrônicos sem estresse (taxa de falha de referência); por esse motivo, foi considerado um valor ponderado entre os valores obtidos por meio dessas normas/manuais.

Diversos autores apresentam trabalhos para estimar a confiabilidade de sistemas de acionamento e/ou do conversor de frequência; entretanto, os valores das taxas de falhas podem apresentar diferenças, as quais se devem a vários aspectos, tais como: aplicação do componente, níveis de tensões e corrente, materiais utilizados nos componentes, qualidade empregada pelo fabricante, tecnologia empregada, dentre outros. Nesse tocante, é importante analisar as características construtivas e operacionais dos itens utilizados e o método empregado para se determinar a taxa de falha. É importante destacar que mesmo se fossem utilizadas outros valores de taxas de falha nesse trabalho, isso não iria interferir no método

para estimar os índices de confiabilidade do sistema; apenas seriam encontrados outros valores numéricos como resultado.

Como o maior objetivo desse trabalho é o estudo da confiabilidade quando o sistema, em especial o conversor, é exposto a um ambiente hostil, foram consideradas três situações com estresse ambiental: Mineração, Marítimo (extração de petróleo) e Siderúrgico, além da situação isenta de fatores adversos, as quais são discutidas na próxima seção.

4.3 - Ambiente sob Estudo

Para a correta determinação da confiabilidade do sistema de acionamento de motores, é importante analisar a influência do ambiente na degradação dos itens utilizados. Nesse sentido, métodos para a determinação das taxas de falhas de componentes eletrônicos e formas para se estimar a influência de ambientes adversos foram apresentados nos Capítulos 2 e 3. Vale enfatizar que a metodologia proposta, baseada em SBRF, apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito à determinação do estresse ambiental. Logo, para a análise da confiabilidade do sistema analisado neste capítulo, tal foi o método empregado. Para isso, os mesmos dez agentes ambientais apresentados no Capítulo 3 serão considerados no presente estudo.

Dentre as normas estudadas para a caracterização do ambiente [25-27], foi utilizada a IEC 60721-3 para definir a combinação dos agentes ambientais para a composição dos quatro ambientes (sem estresse, mineração, marítimo e siderúrgico). Ou seja, foram atribuídos os níveis de cada agente ambiental (vibração, umidade, poeira, por exemplo) segundo a IEC 60721-3 [25, 26], caracterizando cada um dos ambientes sob estudo da maneira mais próxima possível ao que se deve encontrado em campo. São eles:

1. **Ambiente sem estresse ambiental** - Classificação IE 31 [25]: Local com temperatura e umidade controladas, mínima presença de areia e poeira; vibração e choque mecânico são desprezados.
2. **Ambiente típico de mineração** - Classificação IE 42 [26]: Local com temperatura elevada, exposto a areia ou poeira em alta proporção, vibração e choques mecânicos significativos, níveis normais de agentes químicos e presença de respingos de água.
3. **Ambiente marítimo** - Classificação IE 34 [25]: Local com baixa temperatura, alta umidade, exposto a salinidade, areia em proporção moderada, vibração e choques mecânicos moderados.
4. **Ambiente siderúrgico** - Classificação IE 37 [25]: Local com temperatura elevada, exposto poeira em média proporção, vibração e choques mecânicos significativos, presença significativa de agentes químicos, em especial SO₂ e NO₂.

A Tabela 4-2 apresenta os níveis utilizados para cada agente ambiental nas quatro situações supracitadas e o respectivo fator de estresse ambiental resultante. A próxima seção apresenta os resultados obtidos da análise de confiabilidade, sob a forma de gráficos e figuras de mérito.

Tabela 4-2: Fator de estresse devido aos ambientes adversos.

Fator Ambiental	Ambientes			
	Sem estresse	Mineração	Marítimo	Siderurgia
TB	15° C	-5° C	-65° C	10° C
TA	30° C	55° C	45° C	70° C
VT	0,1° C/min	0,5° C/min	0,5° C/min	1,0° C/min
PR	101 kPa	106 kPa	101 kPa	101 kPa
UR	70 %	90 %	95 %	80 %
VA	0,3 mm	3,0 mm	1,5 mm	1,5 mm
CM	1 m/s ²	10 m/s ²	5 m/s ²	5 m/s ²
AR	0 mg/m ³	500 mg/m ³	400 mg/m ³	30 mg/m ³
PO	0,01 mg/m ³	4 mg/m ³	1,5 mg/m ³	1,5 mg/m ³
PQ	0 mg/m ³	0 mg/m ³	60 mg/m ³	500 mg/m ³ (NO ₂ e SO ₂)
Fator de Estresse	1	4,7433	3,5900	3,6100

4.4 - Resultados da Análise de Confiabilidade

As taxas de falha e o MTBF presumidos para o sistema são mostradas na Tabela 4-3, considerando que todos os componentes utilizados estão submetidos ao ambiente proposto (casos em estudo), e, portanto, todos os itens do sistema de acionamento são estressados de modo igual.

Uma vez determinadas as taxas de falha dos diversos componentes do sistema (transformador, cabo, motor, capacitores, IGBTs, diodos, etc.), é possível então estimar a função de confiabilidade do sistema [31], conforme apresentado nas Figuras 4.2 a 4.6.

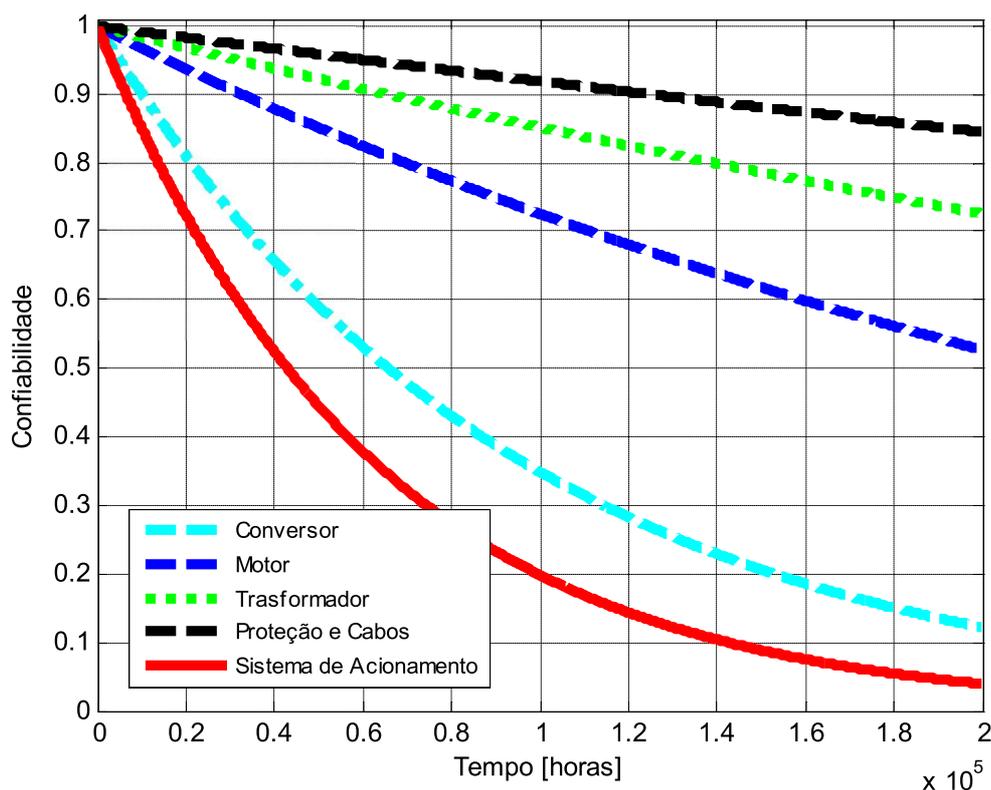


Figura 4.2: Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Ambiente sem estresse.

Tabela 4-3: Taxa de falha – Ambiente adverso.

Ambientes	Componente/Item	Taxa de falha [10 ⁻⁹ horas]	MTBF [anos]
Sem estresse	VSI	1450,00	78,73
	Refrigeração	1000,00	114,16
	Controle	4010,00	28,47
	Sensores e gate	4050,00	28,19
	Conversor completo	10510,00	10,86
	Motor	3200,00	35,67
	Transformador	1600,00	71,35
	Proteção e Cabos	840,00	135,90
	Sistema Completo	16150,00	7,07
Mineração	VSI	6877,79	16,60
	Refrigeração	4743,30	24,07
	Controle	19020,63	6,00
	Sensores e gate	19210,37	5,94
	Conversor completo	49852,08	2,29
	Motor	15178,56	7,52
	Transformador	7589,28	15,04
	Proteção e Cabos	3984,37	28,65
	Sistema Completo	76604,30	1,49
Marítimo	VSI	5205,50	21,93
	Refrigeração	3590,00	31,80
	Controle	14395,90	7,93
	Sensores e gate	14539,50	7,85
	Conversor completo	37730,90	3,03
	Motor	11488,00	9,94
	Transformador	5744,00	19,87
	Proteção e Cabos	3015,60	37,85
	Sistema Completo	57978,50	1,97
Siderurgia	VSI	5234,50	21,81
	Refrigeração	3610,00	31,62
	Controle	14476,10	7,89
	Sensores e gate	14620,50	7,81
	Conversor completo	37941,10	3,01
	Motor	11552,00	9,88
	Transformador	5776,00	19,76
	Proteção e Cabos	3032,40	37,65
	Sistema Completo	58301,50	1,96

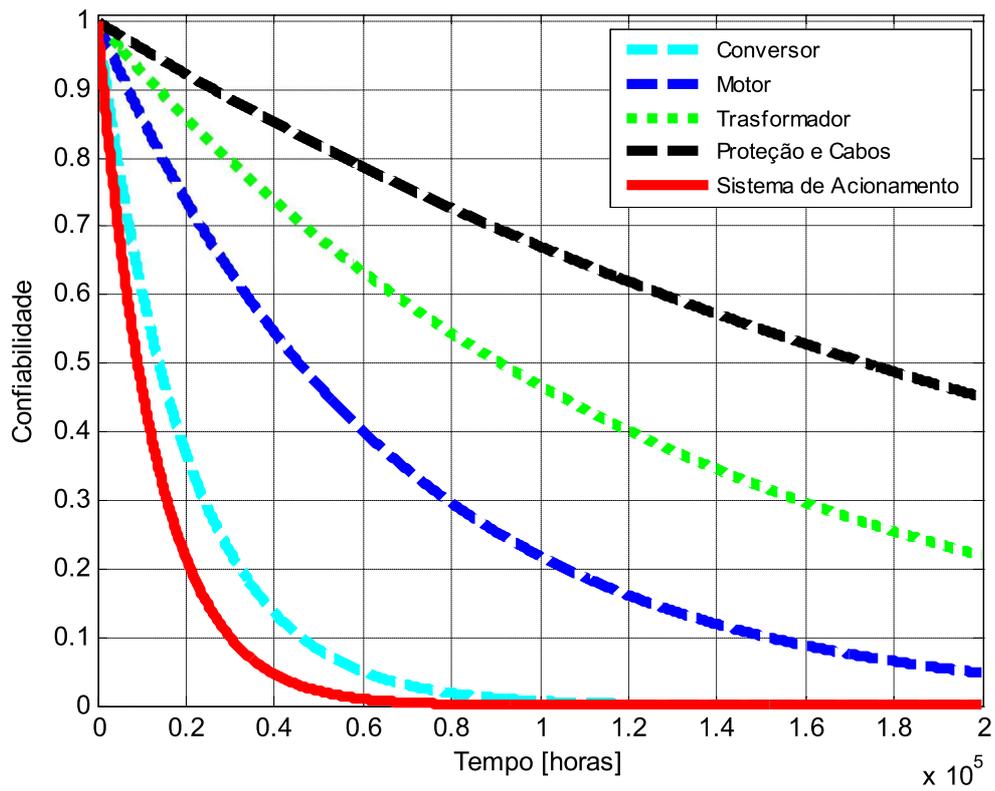


Figura 4.3: Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Mineração.

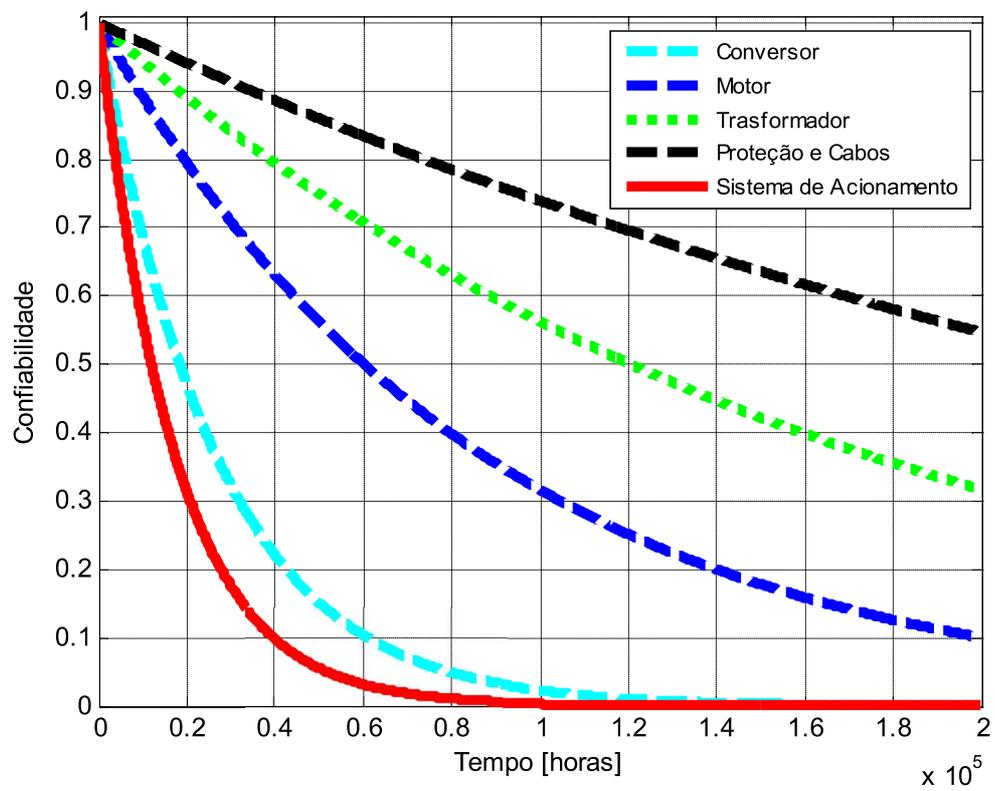


Figura 4.4: Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Marítimo.

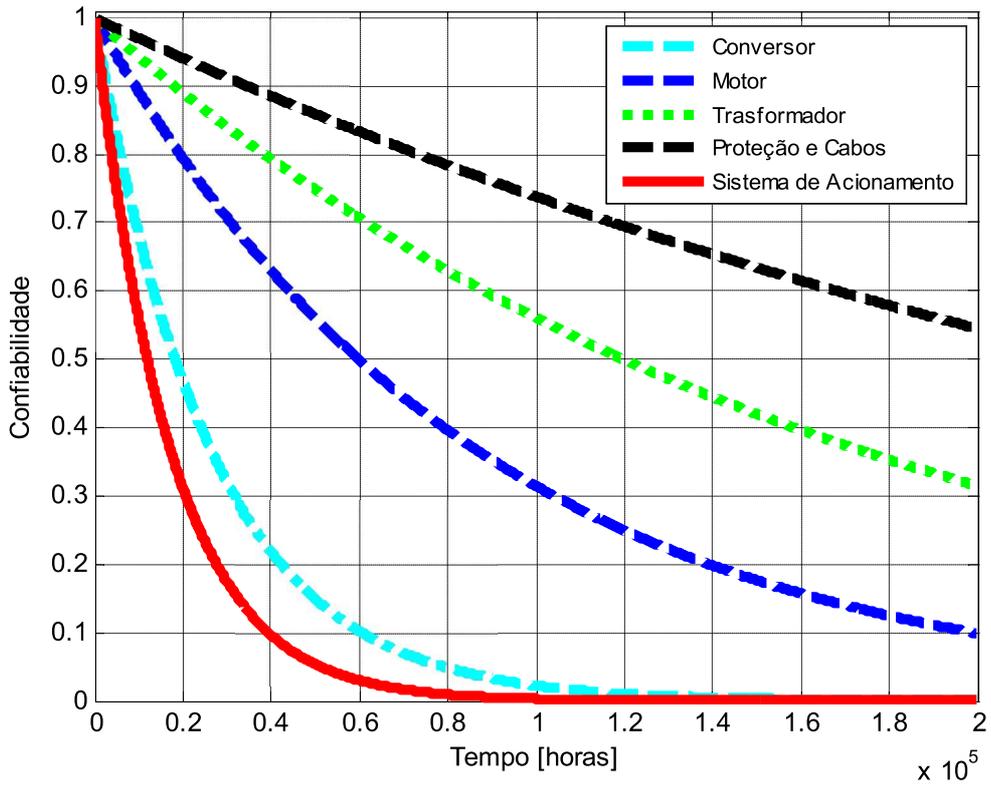


Figura 4.5: Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Siderurgia.

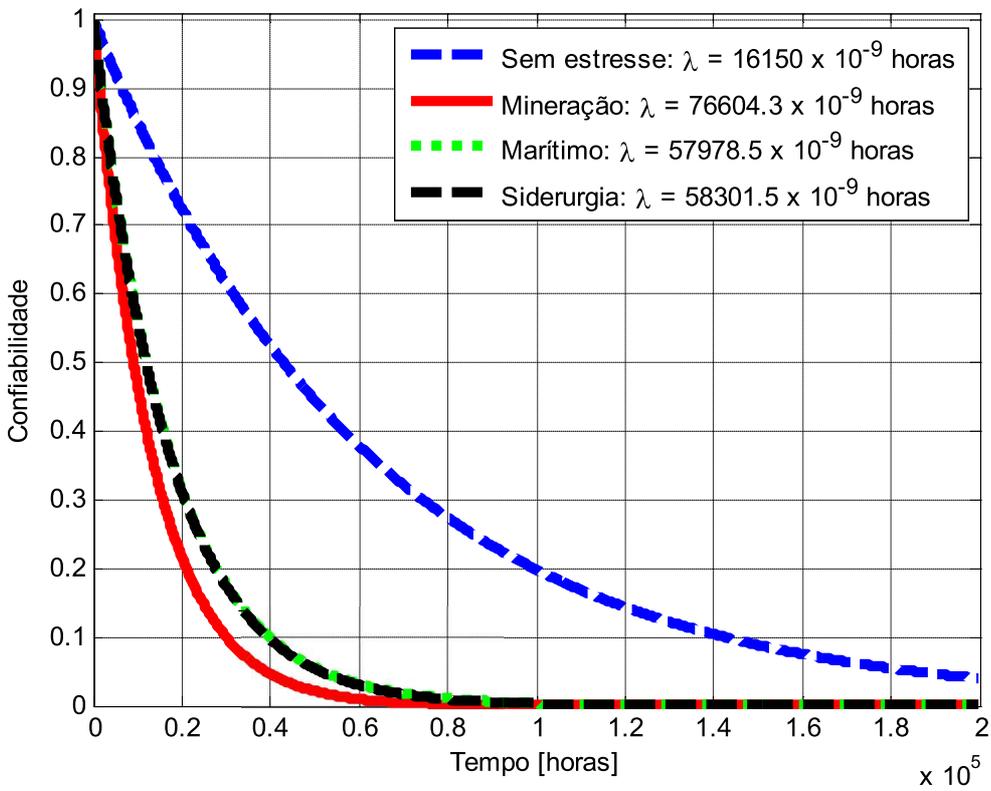


Figura 4.6 Confiabilidade do Sistema de Acionamento – Todos os ambientes.

Por meio das Figuras 4.2 a 4.5 e da Tabela 4-3, observa-se que os itens mais confiáveis do sistema são o transformador, proteção e cabos, enquanto o conversor é o principal responsável pelas falhas do sistema, pois possui a maior taxa de falha dentre todos os dispositivos. Dessa forma, sua confiabilidade é a que reduz de forma mais abrupta durante o tempo de operação do sistema.

A Tabela 4-3 mostra a contribuição de cada item na confiabilidade do conversor de frequência. Dentre os dispositivos de eletrônica de potência existentes no *VSI*, aquele que apresenta a maior taxa de falhas é banco de capacitores eletrolíticos (650 falhas/10⁹ horas) tornado-se, assim, um dos principais itens na queda da confiabilidade do sistema. Outros dois elementos que também possuem elevadas taxas de falhas são o *cooler* e o DSP, com valores de 800 e 2400 falhas/10⁹ horas, respectivamente. Esses três componentes são cruciais não só nos índices de confiabilidade do conversor de frequências, como também de todo o sistema de acionamento de motores, visto que o fracasso de um item leva todo o sistema a falhar.

A Tabela 4-4 apresenta as seguintes figuras de mérito: tempo médio até a falha (MTTF), percentual esperado de falhas nos dois primeiros anos de uso (considerando uma jornada de trabalho de vinte horas diárias) e tempo no qual 10% e 50% dos mecanismos estarão fora de operação (percentil 10% e tempo mediano, respectivamente), para todos os subsistemas do sistema de acionamento.

Por meio das figuras de mérito apresentados na Tabela 4-4, verifica-se o quanto o ambiente pode interferir na confiabilidade do sistema de acionamento. Duas figuras de mérito ratificam essa afirmação: tempo mediano e percentual de falhas nos dois primeiros anos. Estima-se que nesse período as falhas aumentem de 21,01% para valores na ordem de 57-67% quando submetido a ambientes adversos, o que representa um aumento significativo. Também, por meio do tempo mediano, espera-se que metade dos conversores em operação já

tenham apresentado falhas em cerca de 9.048 a 11.955 horas aproximadamente, que são valores muito menores que aqueles correspondentes ao ambiente isento de estresse ambiental (42.919,33 horas).

Tabela 4-4: Figuras de mérito – Sistema de Acionamento do Motor.

Subsistema	Figura de Mérito	Ambiente			
		Sem Estresse	Mineração	Marítimo	Siderurgia
Conversor	MTTF [horas]	95147,48	20059,34	26503,48	26356,64
	Falhas - Dois anos ¹	14,23%	51,70%	42,36%	42,53%
	Percentil 10% [horas]	10024,79	2113,46	2792,42	2776,95
	Tempo mediano [horas]	65951,21	13904,08	18370,81	18269,03
Motor	MTTF [horas]	312500,00	65882,40	87047,35	86565,10
	Falhas - Dois anos ¹	4,56%	19,88%	15,44%	15,52%
	Percentil 10% [horas]	32925,16	6941,40	9171,35	9120,54
	Tempo mediano [horas]	216608,49	45666,20	60336,63	60002,35
Transformador	MTTF [horas]	625000,00	131764,81	174094,71	173130,19
	Falhas - Dois anos ¹	2,31%	10,49%	8,04%	8,09%
	Percentil 10% [horas]	65850,32	13882,81	18342,71	18241,09
	Tempo mediano [horas]	433216,99	91332,40	120673,26	120004,71
Proteção e Cabos	MTTF [horas]	1190476,19	250980,71	331608,97	329771,80
	Falhas - Dois anos ¹	1,22%	5,65%	4,31%	4,33%
	Percentil 10% [horas]	125429,19	26443,46	34938,49	34744,93
	Tempo mediano [horas]	825175,21	173966,57	229853,82	228580,39
Sistema Completo	MTTF [horas]	61919,50	13054,10	17247,77	17152,22
	Falhas - Dois anos¹	21,01%	67,32%	57,11%	57,31%
	Percentil 10% [horas]	6523,87	1375,39	1817,23	1807,17
	Tempo mediano [horas]	42919,33	9048,41	11955,25	11889,01

¹ Falhas nos primeiros dois anos considerando uma jornada de trabalho de vinte horas diárias.

Ainda analisando-se a Tabela 4-4, outras considerações podem ser feitas, pois essa apresenta as figuras de mérito do sistema completo de acionamento e também de todos os seus subsistemas (conversor, motor, transformador, proteção e cabos). Como esse é um sistema em série do ponto de vista da confiabilidade, o fracasso de qualquer item provoca a falha de todo o sistema; logo, os índices das figuras de mérito do sistema completo são piores

ao comparar com os seus subsistemas, pois esse contempla todos os itens (todos os subsistemas). Por exemplo, ao se analisar a falha esperada do sistema nos dois primeiros anos para o caso sem estresse ambiental, o resultado obtido para o sistema completo foi igual a 21,01%, que é consideravelmente superior ao de qualquer um dos seus subsistemas: conversor (14,23%), motor (4,56%), transformador (2,31%), proteção e cabos (1,22%). Resultado análogo também é observado para os demais casos (mineração, marítimo e siderurgia), porém com uma piora dos índices devido ao estresse ambiental.

Ao se comparar os quatro ambientes em estudo, por meio da Tabela 4-3 e da Figura 4.6, observa-se que houve um aumento substancial da taxa de falhas dos componentes quando submetido a ambientes adversos. Além disso, ao se confrontar os ambientes de mineração, marítimo e siderúrgico, observou-se que o que apresentou maior taxa de falhas foi o sistema de mineração. Vale esclarecer, contudo, que os outros ambientes, na prática, podem apresentar índices superiores caso os valores dos agentes físico-químicos forem superiores aos utilizados nesse trabalho (Tabela 4-2). De qualquer forma, houve um aumento expressivo em todas as situações analisadas, o que demonstra que ambientes contendo fatores de estresse influenciam negativamente a confiabilidade do sistema de acionamento de motores. Isso demonstra, mais uma vez, que a análise do meio no qual o conversor está inserido não pode ser desprezada.

4.5 - Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado um sistema de acionamento (conversor, transformador, motor, cabos e proteção) exposto a três ambientes distintos (mineração, marítimo e siderurgia), contendo agentes físico-químicos com grande potencial de

degradação. Observou-se que: i) no sistema de acionamento de motores, o conversor é o elemento que possui a maior taxa de falhas e, por este motivo, é o elemento que mais influencia a confiabilidade do sistema; ii) dentre os diversos componentes existentes no conversor de frequência, o capacitor, *cooler* e DSP são os componentes mais críticos nos índices de confiabilidade; iii) diversos fatores ambientais puderam ser modelados e analisados simultaneamente no contexto do sistema estudado, utilizando-se a metodologia proposta nessa dissertação (baseada em SBRF). Tal ferramenta mostrou-se efetiva, portanto, para se obter as figuras de mérito e análises de confiabilidade, bastante úteis na análise de situações/projetos de sistemas de acionamento de motores.

Também é importante destacar que, normalmente, o conversor de frequência se encontra em gabinetes apropriados, em locais cujos fatores ambientais adversos podem ser controlados. Em outras palavras, tem-se que os componentes eletrônicos são, em maior ou menor grau, protegidos desses fatores, de forma que o elemento que de fato fica submetido integralmente submetido ao estresse ambiental é o gabinete. Ou seja, pode haver situações em que a blindagem dos componentes eletrônicos seja apenas parcial. Nesse caso, a metodologia apresentada nesse trabalho se torna uma boa alternativa para analisar a viabilidade, do ponto de vista da confiabilidade, do sistema inserido em um ambiente hostil.

Um exemplo onde tal situação pode ocorrer é em um sistema de acionamento de motores por meio de transmissão CC, apresentado em [7, 8]. Nessa situação, a ponte inversora estará próxima ao motor e, portanto, sujeita ao mesmo ambiente adverso. Sendo assim, caso a proteção ou blindagem proporcionada pelo gabinete seja apenas parcial, os componentes eletrônicos estarão sujeitos aos fatores ambientais, tal como no caso das aplicações em sistemas de mineração, marítimo e siderúrgico.

Por fim, é importante enaltecer que a metodologia proposta nesse trabalho, baseada em regras *Fuzzy*, se apresentou como uma boa alternativa. Isso porque a subjetividade decorrente da utilização das normas para a predição de taxas de falha foi minimizada. Como grande contribuição da metodologia proposta, pode-se citar a determinação do fator para a correção da taxa de falha quando os itens estão submetidos a ambientes hostis. Entretanto, é importante destacar que essa metodologia só é aplicada dentro das faixas de valores previstas nas normas ambientais e, como não houve validação experimental, podem existir diferenças com relação aos resultados em campo. Todavia, uma vez conhecida tal diferença pode-se modificar a composição da base de regras *fuzzy* considerando essa nova informação, tornando o método mais exato.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação discorreu a respeito da estimação das taxas de falhas de componentes eletrônicos quando os mesmos são submetidos a fatores ambientais que potencialmente podem os deteriorar, tendo como prerrogativa apresentar uma metodologia baseada em regras *fuzzy* para estimar o fator de correção ambiental de forma coerente e precisa.

Adicionalmente, em comparação com a metodologia apresentada nas normas/manuais para predição das taxas de falhas, a opção pela estratégia SBRF resulta em uma redução da subjetividade ao analisar o ambiente no qual o sistema de acionamento do motor está inserido. Neste contexto, o principal foco do presente trabalho está, justamente, na caracterização da confiabilidade do sistema de acionamento de motores quando o mesmo se encontra exposto a um ambiente hostil.

Com o propósito de se estimar, de forma criteriosa, a confiabilidade do sistema de acionamento de motores, o Capítulo 2 investigou a influência de diversos fatores ambientais na degradação de componentes eletrônicos e como são estimadas as taxas de falhas de itens eletrônicos por meio de normas de predição apropriadas. No que diz respeito aos fatores ambientais, foram investigados diversos agentes físico-químicos tendo destaque: temperatura, vibração, choques mecânicos, umidade, ambiente salino, areia, poeira e radiação eletromagnética e nuclear. Foi observado que alguns componentes são mais susceptíveis a uma determinada condição ambiental do que outros.

Dentre os resultados apresentados é importante destacar que, na fase de concepção/projeto de equipamentos eletrônicos as previsões da taxa de falha são úteis e diversas normas/manuais são encontrados na literatura com esse propósito. Porém, de uma forma geral, não contemplam de maneira adequada os aspectos ambientais. Neste capítulo, também foi demonstrado, que diversas figuras de mérito podem ser determinadas a partir da taxa de falha, que são importantes para conhecimento das características operacionais do sistema.

O Capítulo 3 apresentou um conjunto de informações e formulações, a partir das quais é possível reduzir substancialmente a subjetividade do problema estimar a correção da confiabilidade dos componentes eletrônicos quando se utiliza normas/manuais de predição de taxas de falhas. Por meio da elaboração da base de regras *fuzzy* e do conhecimento da influência dos fatores ambientais sobre os componentes eletrônicos, pode se efetuar as correções sem ter que se preocupar com a classe normatizada a qual deve ser atribuído o ambiente. Nesse sentido, a análise de situações e/ou projetos pode ser realizada de uma forma mais coerente e precisa.

As análises apresentadas neste capítulo evidenciaram, por meio de exemplos da determinação da taxa de falha do conversor VSI, que os ambientes hostis influenciam negativamente a confiabilidade do sistema de acionamento de motores, reiterando a importância da análise do ambiente no qual o sistema de acionamento está inserido.

Nesse capítulo também é realizada a validação do método SBRF, para isso foi feita uma análise dos resultados obtidos, comparando os valores encontrados com os existentes na literatura (normas/manuais). Uma discussão sobre as divergências encontradas entre os métodos foi realizada, apresentando os motivos sobre as principais diferenças (causas relacionadas a metodologias, tecnologia dos componentes, ambiente a qual os métodos são

propostos, entre outros) e esclarecendo as situações as quais a aplicação do método SBRF é conveniente.

O Capítulo 4 apresentou-se a aplicação do método proposto para um sistema de acionamento de motores mais complexo e para ambientes mais próximos dos encontrados no setor industrial; nesse tocante, neste capítulo foi proposto um sistema de acionamento de motores de indução trifásico, considerando sistema de proteção e cabos, transformador, conversor (VSI, refrigeração, sensores e *drives*) e motor (motor de indução), e submetido a três ambientes com aplicações industriais: mineração, marítimo e siderúrgico; e um ambiente isento de estresse ambiental.

Finalmente, ao se considerar concomitantemente diversos agentes ambientais com elevado potencial de degradação dos itens existentes no sistema de acionamento; observa-se que ao comparar os quatro ambientes, houve um aumento substancial da taxa de falha dos componentes quando submetido a ambientes adversos. Logo, a análise do ambiente o qual o conversor está inserido não pode ser desprezada, pois os agentes físico-químicos os quais os componentes serão expostos podem reduzir consideravelmente a confiabilidade do sistema de acionamento e conseqüentemente do conversor. A título de informação cita-se que foi estimado que 10% dos conversores em operação já tenham apresentado falhas em cerca de 1.375 a 1.820 horas quando submetidos a ambientes adversos, valores substancialmente menores do que se esperava para ambientes sem estresse ambiental (6.523,87 horas).

Além disso, diversos fatores ambientais puderam ser modelados e analisados simultaneamente em sistema de acionamento de motores. Para isso a correção das taxas de falha foi realizada utilizando a metodologia SBRF podendo, assim, determinar diversas figuras de mérito que são úteis na análise de situações/projetos de sistemas de acionamento de motores. Dessa forma a metodologia proposta nesse trabalho baseado em regra *fuzzy* se

apresentou como uma boa alternativa no estudo da confiabilidade de sistemas de acionamento de motores, em especial, quando o sistema é exposto a diversos fatores de estresse ambiental.

Outro aspecto relevante apresentado nesse capítulo é que o conversor é o item mais crítico na análise da confiabilidade do sistema de acionamento do motor; e dentre os diversos componentes existentes no conversor de frequência, o capacitor, *cooler* e DSP são os componentes cruciais nos índices de confiabilidade do conversor.

Como comentário final, é importante destacar que em aplicações industriais convencionais, no sistema de acionamento de motores o conversor de frequência se encontra em gabinetes apropriados construídos em locais cujos fatores ambientais adversos podem ser controlados. Todavia, podem existir situações em que a blindagem dos componentes eletrônicos não seja total, ficando os itens expostos a alguma interferência do ambiente; nessas situações a metodologia apresentada nesse trabalho se torna uma ferramenta viável para analisar a confiabilidade do sistema.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se destacar:

- Análise e propostas de configurações para incremento da confiabilidade do inversor quando o mesmo é submetido a ambientes hostis. Nesse tocante, pode se utilizar elementos eletrônicos com índices de confiabilidade maiores, ou seja, melhoria da qualidade do componente; utilização de redundâncias no sistema, ativa ou passiva; e melhoria do gabinete no qual o conversor será inserido.
- Obtenção mais precisa das taxas de falhas dos componentes eletrônicos, seja por meio de normas específicas de fabricantes, normas de difícil acesso para a comunidade externa da empresa, como a norma Siemens SN 29500; seja por informações

fornecidas pelos fabricantes ou ainda por taxas de falha obtidas por testes de vida acelerados ou por resultados de campo.

- Validação experimental do método proposto, por meio dos valores de campo, pode-se determinar a abrangência do método proposto e também aumentar sua robustez, visto que com o conhecimento adquirido poderá ser empregado para a determinação de uma nova base de regras *fuzzy*.
- Melhorias na base de regras *fuzzy*, como por exemplo, utilização do *fuzzy* tipo 2, pois, dependendo do componente, o ambiente pode ser mais nocivo quando comparado a um outro. Além disso, dependendo das características dos dispositivos eletrônicos, o ambiente pode ser mais prejudicial a uma determinada família de componentes do que de outra. Nesse sentido, com a utilização do *fuzzy* tipo 2 se pode modelar de forma mais apropriada essa característica dos dispositivos eletrônicos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. PROCEL. Procel Info - Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. **PROCEL**, Junho 2015. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em: 20 Junho 2015.
2. ROCHA, A. et al. Increasing long-belt-conveyor availability by using fault-resilient medium-voltage ac drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 5, p. 1708–1716, 2012.
3. ROCHA, A. et al. Increasing long belt-conveyors availability by using fault-resilient medium voltage ac drives - part 2: reliability and maintenance. **Industry Applications Society Annual Meeting**, Las Vegas - NV, 2012. 1-8.
4. KLUG, R.-D.; MERTENS, A. Reliability of megawatt drive concepts. **In Proc. IEE Int. Conf. on Ind. Techn.**, Maribor, Slovenia, December 2003.
5. CAMARGO, C. C. D. B. **Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica**. 1ª. ed. Florianópolis - SC: LTC, 1979. 298 p.
6. ROCHA, A. V. **Confiabilidade e Resiliência de Conversores de Média Tensão Baseados em IGCT**. Belo Horizonte: Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
7. CASTRO JÚNIOR, J. A. et al. Rectifier-to-Inverter Connection Through Long DC Cable - Part II: The Complete Copper Economy Characterization. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 1, p. 229-235, January/February 2012.
8. CASTRO JÚNIOR, J. A. **Uma Nova Configuração de Sistemas de Acionamento: Conexão Retificador-Inversor através de Cabos Longos – Análise da Economia de Cobre**

- e da Proteção do Sistema contra Falhas. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
9. JEFTENIC, B. et al. **Optimal utilization of the bulk material transportation system based on speed controlled drives**. Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 1-6.
10. IEEE 90 - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard Computer Dictionary: A compilation of IEEE Standard Computer Glossaries**. New York, NY: [s.n.], 1990.
11. WIKSTRÖM, P.; TERENS, L. A.; KOBI, H. **Reliability, Availability, and Maintainability of High-Power Variable-Speed Drive System**. [S.l.]: [s.n.], v. 36, 2000. 231-241 p.
12. MCLEISH, J. G. **Enhancing MIL-HDBK-217 Reliability Predictions with Physics of Failure Methods**. [S.l.]: [s.n.], 2010.
13. TELCORDIA TECHNOLOGIES. **Telcordia SR-332 Insule 1: Reliability Prediction Procedure**. [S.l.]: [s.n.], 2001.
14. DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction of Electronic Equipment**. [S.l.]: [s.n.], 1995.
15. IEC. **IEC TR 62380: Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment**. [S.l.]: [s.n.], 2004.
16. FIDES GROUP. **FIDES Guide 2009 Inssue A: Reliability Methodology for Electronic Systems**. [S.l.]: [s.n.], 2009.
17. EPSMA - EUROPEAN POWER SUPPLY MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Reliability Guidelines to Understanding Reliability Prediction**. [S.l.]: [s.n.], 2005.

18. FREITAS, M. A.; COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade**: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados. Belo Horizonte, MG: UFMG, Escola de Engenharia, Fundação Christiano Ottoni, 1997. 309 p.
19. IEEE STANDARDS COORDINATING COMMITTEE 37 ON RELIABILITY PREDICTION. **IEEE 1314.1 - Guide for Selecting and Using Reliability Predictions Based on IEEE 1413**. New York, NY: [s.n.], 2003.
20. IEC. **IEC 61709**: Electric components - Reliability Reference conditions for failure rates and stress models for conversion. [S.l.]: [s.n.], 2011.
21. RADC. **RADC-TR-82-172**: Thermal Guide For Reliability Engineers. [S.l.]: [s.n.], 1982.
22. DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-HDBK-251**: Reliability – Design Thermal Applications Guide For Reliability Engineers. [S.l.]: [s.n.], 1978.
23. DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-HDBK-454**: General Guidelines for Electronic Equipment. [S.l.]: [s.n.], 1995.
24. DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-HDBK-338B**: Electronic Reliability Design Handbook. [S.l.]: [s.n.], 1998.
25. IEC. **IEC 60721-3-3**: Classification of environmental conditions – Part 3-3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Stationary use at weatherprotected locations. [S.l.]: [s.n.], 2002.
26. IEC. **IEC 60721-3-4**: Classification of environmental conditions – Part 3-4: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Stationary use at non-weatherprotected, 1995.
27. ETS. **ETS 300 019-1**: Classification of environmental conditions. [S.l.]: [s.n.], 2002.
28. BARLOW, R. E.; PROSCHAN, F. **Mathematical**: Theory of Reliability. Philadelphia:

- SIAM, 1996. 258 p.
29. HARMS, J. W. **Revision of MIL-HDBK-217 - Reliability Prediction of Electronic Equipment**. Crane Division: Naval Surface Warfare Center.
30. ELERATH, J. G.; PECH, M. IEEE 1413: A Standard for Reliability Predictions. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 61, n. 1, p. 125-129, March 2012.
31. JULIAN, A. L.; ORITI, G. A Comparison of Redundant Inverter Topologies to Improve Voltage Source Inverter Reliability. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 43, n. 5, p. 1371-1378, September/October 2007.
32. DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-HDBK-310: Global Climatic Data for Developing Military Products**. [S.l.]: [s.n.], 1997.
33. DEPARTMENT OF DEFENSE USA. **MIL-HDBK-1670: Environmental Criteria and Guidelines for Air-Launched Weapons**. [S.l.]: [s.n.], 2007.
34. GOMES, L. T. **Estudo Sobre o Espalhamento da Dengue Usando Equações Diferenciais Parciais e Lógica Fuzzy**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2009. 136 p.
35. CHEN, S.-M. et al. Weighted Fuzzy Interpolative Reasoning Based on Weighted Increment Transformation and Weighted Ratio Transformation Techniques. **IEEE Trans. Fuzzy Systems.**, v. 17, n. 6, p. 1412-1427, December 2009.
36. MATHWORKS, T. **MATLAB R2008a**, 10 February 2008.
37. RIZOL, P. M. S.; MESQUITA, L.; SAOTOME, O. Lógica Fuzzy tipo-2. **Revista Sodebras**, v. 6, p. 27-46, 2011.
38. KREMP, B. F.; KIMBALL, E. W. **RADC-TR-80-299: Revision of Enviromental Factor for MIL-HBDK-217B**. Orlado, Florida: Martin Miretta Corporation, 1980.

39. MOLAEI, M.; ORAEE, H.; FOTUHI-FIRUZABAD, M. Markov Model of Drive-Motor Systems for Reliability Calculation. **IEEE ISIE 2006**, Motreal, Quebec, Canada, 9-12 July 2006. 2286-2291.
40. RIEDEL, G. J.; HUESGEN, T.; SCHMIDT, R. Reliability Prediction Sensitivity Analysis - How to Perform Reliability Prediction Time Efficiently. **6th IET International Conference on Machines and Drives - PEMD 2012**, 2012. 6 pages.
41. VALIPOUR, H. et al. Reliability Comparison of two Industrial AC/DC Converters with Resonant and non-Resonant Topologies. **6th Interational Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015)**, Tehran, Iran, 3-4 February 2015. 430-435.
42. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5463 - Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 1994.
43. HOUAISS, A.; VILLAR, M. S.; FRANCO, F. M. M. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. 2ª reimpressão. ed. Rio de Janeiro, RJ: Objetiva, 2007. 2922 p.
44. CASTRO, H. F. **Otimização da Confiabilidade e Disponibilidade em Sistemas Redundantes**. Campinas, SP: Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, 2003. 165 p.
45. DIAS, A. **Metodologia para Análise da Confiabilidade em Freios Pneumáticos Automotivos**. Campinas, SP: Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, 1996. 222 p.
46. ALVES, C. G. **Análise de Confiabilidade em Fadiga. Estudo de Caso: Braço de Controle de Suspensão Automotiva**. Campinas, SP: Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, 2008. 156 p.

47. ABU RUB, H. et al. Advanced control of induction motor based on load angle estimation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 51, n. 1, p. 5-14, February 2004.
48. CHEN, L.; KANG-LING, F.; HU, Z.-F. A scheme of fuzzy direct torque control for induction machine, 2, August 2005.
49. ANDRADE, L. B. D. **Mapeamento do potencial mineral para níquel e ouro no Cinturão Metassedimentar Nova Brasilândia - Rondônia por meio de por meio de logica nebulosa (fuzzy) e redes neurais artificiais**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2009. 69 p.
50. PUMA, J. L. A. **Controle Direto de Torque do Motor de Indução Trifásico Usando Controlador Fuzzy Tipo PI Autoajustável**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2010. 167 p.
51. ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, June 1965. ISSN doi> 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
52. KOVACIC, Z.; BOGDAN, S. **Fuzzy Controller Design: Theory and Applications**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2006. 416 p. ISBN ISBN-10: 084933747X.
53. SIVANANDAM, S. N.; SUMATHI, S.; DEEPA, S. N. **Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB**. [S.l.]: Springer, 2007. 430 p.
54. KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications**. [S.l.]: Pertince Hall, 1995. 574 p.
55. TANSCHKEIT, R. **ICA - Inteligência Computacional Aplicada**, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www2.ica.ele.puc-rio.br/Downloads/41/LN-Sistemas%20Fuzzy.pdf>>. Acesso em: 2014 outubro 21. Apostila disponível no site.

APÊNDICE A

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE CONFIABILIDADE

A.1 - Considerações Iniciais

Neste apêndice disserta-se a respeito dos conceitos básicos da confiabilidade, assim como suas principais figuras de mérito. Além disso, são abordadas as distribuições estatísticas que podem ser usadas para modelar o comportamento da confiabilidade, possibilitando o entendimento não só dos conceitos da confiabilidade em si, mas também dos aspectos relacionados ao mesmo, tornando-o mais compreensível à comunidade da eletrônica de potência, máquinas elétricas e acionamentos elétricos, contextualizando-o em aplicações industriais.

A.2 - Introdução

A crescente complexidade dos sistemas técnicos hoje empregados, aliada às estreitas exigências de condições operativas ou de um alto grau de automação, levou ao aparecimento de uma nova disciplina científica: a teoria da confiabilidade, voltada para o estudo dos métodos gerais a serem adotados nas fases de planejamento, projeto, fabricação, recepção, transporte e operação de componentes ou sistemas, de modo a assegurar o máximo de eficiência, segurança e economia ao processo. Tal ciência estabelece os mecanismos (físico-químicos) de aparecimento de falhas em dispositivos ou sistemas e os métodos que

permitem melhorar a qualidade de seus componentes, mediante a introdução de índices quantitativos (figuras de méritos) da qualidade de produção.

Neste trabalho, o estudo da confiabilidade tem por objetivo uma análise durante a fase de projeto do sistema de acionamentos de máquinas. Nessa etapa, visa-se estimar as taxas de falhas (principal figura de mérito da confiabilidade) de componentes eletrônicos. Como se deseja aplicar métodos/metodologias de predição de taxa de falhas para sistemas de acionamento de motores em diferentes aplicações (mineração, submarino, etc.) serão abordadas técnicas para a predição de taxa de falhas de componentes quando expostos a ambientes adversos, ou seja, nos quais existam temperaturas elevadas, vibração, poeira, umidade, dentre outros fatores de estresse.

A.3 - Conceitos básicos sobre Confiabilidade

É de senso comum que a confiabilidade é um conceito que relaciona qualidade, durabilidade, capacidade de funcionamento e confiança de produtos e serviços. Nesse sentido, na literatura existem diversas definições para confiabilidade:

- Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo [42].
- Capacidade de uma unidade funcional desempenhar, sem falhas ou avarias, uma dada tarefa sob certas condições e dentro de um período [43].
- Probabilidade de um dispositivo, ou sistema, desempenhar suas funções de projeto adequadamente, por um determinado período de tempo, sob condições de operação estabelecidas [44].

- Confiabilidade é a probabilidade de um item desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de operação estabelecidas, por um período de tempo predeterminado [18].
- Probabilidade de um componente (aparelho, sistema, equipamento) cumprir suas funções prefixadas, dentro de um período de tempo desejado e debaixo de certas condições operativas [45].

Dessa maneira, a confiabilidade pode ser compreendida como a capacidade/probabilidade de um componente, equipamento ou sistema operar satisfatoriamente, sob condições previamente estabelecidas, em um determinado período. É importante destacar que, em todas as definições apresentadas, quatro elementos estão sempre presentes: Capacidade/Probabilidade, Comportamento Adequado, Condição de Operação e Período de Uso.

Segundo [18, 45], a probabilidade fornece a entrada numérica inicial para a avaliação da confiabilidade. Em outras palavras, permite mensurar a confiabilidade e, por esse motivo, deve-se utilizar o conceito de probabilidade ao invés de capacidade, já que este apresenta um conceito abstrato quanto à medida de confiabilidade.

Entretanto, para a determinação da probabilidade não existe apenas uma forma ou técnica, uma vez que sua determinação engloba tratamentos estatísticos; aspectos combinatórios de confiabilidade de sistemas; técnicas gerais de estimativa de valores da confiabilidade de sistemas complexos; aplicação desses conceitos em ambientes industriais e técnicas experimentais para determinação da confiabilidade [44].

O conceito de comportamento adequado necessita de uma referência do desempenho satisfatório, que é utilizada na comparação com o comportamento do que se deseja avaliar. No entanto, essa referência pode apresentar variações em relação àquela ideal,

e, por este motivo, existem definições sobre os diversos tipos de falha, tais como, falhas catastróficas (não reparáveis) e falhas reparáveis.

Segundo [18], todo produto é projetado e desenvolvido para ser utilizado sob condições específicas, que podem envolver tanto aspectos de natureza ambiental, tais como pressão, temperatura, umidade, vibração e radiação, quanto aspectos de natureza operacional, como carga, alimentação e manuseio. Dessa forma, essas condições devem ser bem definidas para garantir a confiabilidade inicialmente proposta. Caso não sejam respeitadas essas condições, os índices de confiabilidade podem ser modificados e, de um modo geral, a confiabilidade do item é reduzida.

O período de uso deve ser analisado a partir da premissa básica de que a falha ocorrerá. O termo período pode estar associado ao tempo de uso, número de ciclos, tempo de funcionamento, distância percorrida, entre outros. Nesse caso, também é importante que seja definido um período padrão ou período de referência [45]. Dessa maneira o intervalo pré-determinado durante o qual se espera que o item tenha um bom desempenho é denominado período de uso, período de missão ou período de vida útil.

Para que o estudo da confiabilidade possa ser realizado, é importante o conhecimento da terminologia associada ao tema, para o entendimento dos métodos de análises e cálculos. Assim sendo, na sequência são apresentadas as definições de alguns termos estatísticos relevantes, denominados segundo [18] como figuras de mérito. O estudo da confiabilidade pode ser relatado de várias formas, utilizando-se uma ou mais dessas figuras de mérito.

As definições apresentadas a seguir foram todas extraídas de [42], a não ser nos casos onde outra fonte seja citada.

- Item: Qualquer parte, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente. Por exemplo, o item pode ser considerado tanto um elemento discreto, como um diodo, como um conversor de frequência de um sistema de acionamento de motores; até mesmo o próprio sistema de acionamento pode ser considerado como um item.
- Falha: Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida.
- A taxa de falha (λ) de um item é um valor para a média do número de falhas por unidade de tempo. A taxa de falha para os componentes eletrônicos é constante durante o seu período de vida útil, devido ao fato de a distribuição estatística da confiabilidade mais adequada a esses dispositivos ser a exponencial [18].
- Critério de Falha: Conjunto de regras aplicáveis ao julgamento de tipos e gravidade de falhas, para determinação dos limites de aceitação de um item.
- Falha Crítica: Falha que provavelmente resultará em condições perigosas e inseguras para pessoas, danos materiais significativos ou outras consequências inaceitáveis.
- Causa de Falha: Circunstâncias relativas ao projeto, fabricação ou uso que conduzem a uma falha.
- Mecanismo de Falha: Conjunto de processos físicos, químicos ou outros que conduzem a uma falha.
- Vida Útil: Sob 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 torna-se inaceitável ou até que o item seja considerado irrecuperável depois de uma pane.

- Vida Média: Média dos tempos até a falha de um grupo de itens não-reparados e de características semelhantes.
- Vida de Projeto: Tempo de uso planejado para o sistema total.
- MTTF ou Tempo médio até a falha: Esperança matemática do tempo de uso até a falha de um item. Equivale à área sob a função de confiabilidade.
- MTBF ou Tempo médio entre falhas: Esperança matemática do tempo entre falhas de um item. O MTBF (tempo médio entre falhas) de qualquer item com taxa de falha constante e sem redundância é o inverso da sua taxa de falha, normalmente expressa em horas ou em anos. Assim como a taxa de falha, o MTBF é o critério básico para a avaliação prática de confiabilidade da unidade e pode ser baseada em taxas de falhas dos componentes do sistema em observações de falhas em um conjunto de unidades instaladas e em operação.
- MTTR ou Tempo de restabelecimento médio: Esperança matemática do tempo de restabelecimento. O MTTR é o tempo médio que se leva para eliminar uma falha e colocar de volta a unidade em operação. Esse índice é fortemente dependente de boa manutenção, tais como o emprego de um sistema adequado para o diagnóstico e o nível de habilidade da mão de obra para resolução de problemas. É critério básico para avaliação da manutenibilidade.
- B_x ou percentil $x\%$: tempo no qual se espera que $x\%$ dos produtos colocados em operação venham a falhar [18]. Esse índice é importante no estudo de tempo e custos com os quais os fabricantes arcam no período de garantia dos produtos.
- Tempo mediano: tempo no qual se espera que 50% dos produtos colocados em operação venham a falhar [18].

- Função de confiabilidade: para um determinado tempo, fornece a confiabilidade do produto, ou seja, a probabilidade do mesmo funcionar por um período superior a um determinado tempo [18]. A função de confiabilidade expressa a probabilidade de o sistema operar sem falha durante o intervalo de tempo. Desempenha um papel na derivação analítica de outros termos de confiabilidade e de verificação da exatidão de suas aproximações.
- Função taxa de falha: é a taxa instantânea de falha no tempo, dado que o item estava em operação [18].
- Dependabilidade: Termo coletivo usado para descrever o desempenho da disponibilidade e seus fatores de influência: confiabilidade, manutenibilidade e suporte logístico de manutenção. Ou seja, é a propriedade que define a capacidade de os sistemas/itens desempenharem suas funções nas quais se possa justificadamente confiar, considerando a confiabilidade, segurança, disponibilidade e manutenibilidade.
- Capabilidade: Capacidade de um item atender a uma demanda de serviço de determinadas características quantitativas, sob dadas condições internas. As condições internas se referem, por exemplo, a qualquer combinação de subitens em falhas ou não. Dessa forma a capabilidade é o conjunto de capacidade de um equipamento que pode ser dividida em capabilidade inicial e capabilidade desejada. A capabilidade inicial representa o atendimento às necessidades além do necessário, ou seja, é um "bônus" de fornecimento; já a capabilidade desejada representa o mínimo que o equipamento tem de ter para atender à produção de forma satisfatória.

- **Disponibilidade:** Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. O termo “disponibilidade” é usado como uma medida do desempenho de disponibilidade. Ou seja, a disponibilidade de um item é a probabilidade de encontrá-lo em condições de serviço, em qualquer ponto adequado de tempo. Os requisitos para obter uma alta disponibilidade são um alto MTBF e um MTTR baixo. Contrariamente à prática em sistemas de transmissão mecânica, o tempo de manutenção programada não faz parte da definição de disponibilidade.
- **Mantenabilidade:** Capacidade de um item ser mantido ou relocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos. O termo “mantenabilidade” é usado como uma medida de desempenho de manutenibilidade.

Devido ao grande número de figuras de mérito que podem ser utilizadas para a caracterização da confiabilidade de sistemas, a próxima seção apresenta de forma didática os conceitos mais utilizados para a representação da confiabilidade.

A.4 - Discussões sobre os principais conceitos básicos de confiabilidade

Nessa seção, dissertar-se-á sobre os conceitos básicos de confiabilidade e definições comumente usados em engenharia de confiabilidade, tais como taxa de falha, curva

da banheira e distribuições estatísticas da confiabilidade. Serão descritas as formas de utilizações das previsões de confiabilidade e como as mesmas determinam o ciclo de vida do sistema.

A.4.1 - Confiabilidade e falha

Conforme citado na seção anterior, a definição clássica da confiabilidade é a probabilidade de um item executar sua função pretendida para um intervalo especificado sob condições estabelecidas [19]. Nessa definição, um item (produto, aparelho, componente ou sistema) pode se enquadrar em dois estados: estado operacional e falho. Essa suposição considera que o item só pode fazer a transição do estado operacional para o estado falho, ou seja, sem a possibilidade de correções da falha do equipamento.

A falha ocorre quando um item não é mais capaz de executar uma função requerida. No entanto, na prática, um item pode ter um desempenho abaixo do especificado, por um dado momento, e em uma segunda tentativa pode funcionar normalmente, sem reparo do item e, por vezes, sem qualquer intervenção, são falhas conhecidas como transitórias ou intermitentes.

Embora a teoria da confiabilidade é baseada no conceito de falhas, as definições de uma falha pode ser muito diferente a partir de diferentes perspectivas. Para exemplificar essa situação [46] descreve como diversos setores dentro de uma empresa/cliente podem analisar a falha do produto:

- Para um engenheiro de *hardware*, uma falha significa uma substituição de componentes e verificação da falha do componente substituído.
- Para o departamento de logística, uma falha é um produto retornado.
- Para o departamento de finanças, uma falha é uma reclamação de garantia.

- Para o departamento de manutenção, uma falha é uma chamada de serviço para manutenção corretiva.
- Para um cliente, uma falha é uma degradação do serviço ou capacidade do sistema (uma falha que é tolerada sem interrupção do serviço é considerada uma degradação da capacidade do produto, uma vez que é então menos capaz de tolerar falhas futuras).

Estas diversas definições de "falha" podem levar a vários tipos de indicadores, tais como a taxa de substituição ou de taxa de chamada de serviço, além do valor da taxa de falha (figura de mérito primordial no estudo da confiabilidade). Também é importante destacar que a falha depende do nível de hierarquia do componente no sistema ao qual se aplica o fracasso. Por exemplo, uma falha de um componente pode não provocar uma falha do sistema, particularmente em sistemas que incluem a redundância ou tolerância a falhas.

A.4.2 - Taxa de Falhas e MTBF

A taxa de falhas constante (λ), típica de sistemas com distribuição estatística exponencial, tem muitas propriedades úteis, sendo que uma delas é o valor médio da distribuição de vida útil do produto, que é de $\frac{1}{\lambda}$. Este valor médio representa o comprimento estatisticamente esperado de tempo até a falha do produto e é comumente chamado de vida média, ou *mean-time-before/between-failure* (MTBF) [18]. Outra propriedade útil da taxa de falhas constante é que ela pode ser estimada a partir de uma população, como o número de falhas dividido pelo tempo, sem ter de atender a uma distribuição de tempos de falha. Além disso, taxas constantes são aplicadas em normas de predição de taxa de falhas de componentes eletrônicos [13-16], pois conforme já mencionado a distribuição estatística dos componentes eletrônicos é exponencial.

A figura de mérito MTBF é muitas vezes mal interpretada durante a vida útil do produto. Se um produto tem um MTBF de 1.000.000 horas, não significa que o produto vai durar 1.000.000 horas (mais do que a média da vida humana). Pelo contrário, isto significa que, em média, um dos produtos falhará para cada 1.000.000 horas de funcionamento de um produto, ou seja, se há 1.000.000 produtos em campo, um deles falhará em uma hora, em média. Neste caso, se as falhas de produtos são verdadeiramente exponencialmente distribuídas, 63% dos produtos terão falhado depois de 1.000.000 horas de operação. Produtos com falhas verdadeiramente exponencialmente distribuídos ao longo de toda a sua vida quase nunca ocorrem na prática, mas uma taxa de falha constante de MTBF pode ser uma boa aproximação do comportamento das falhas do produto.

A.4.3 - Curva da banheira e MTTF

A probabilidade de falha, $Q(t)$, é o complementar da confiabilidade, $R(t)$. Portanto, é definida como sendo a probabilidade de que um dispositivo, ou sistema, falhe ou deixe de desempenhar suas funções de projeto, em um período temporal definido, sob certas condições operacionais [46], dada por (A.1).

$$Q(t) = 1 - R(t) \quad (\text{A.1})$$

A taxa de falha λ é uma importante função da confiabilidade e é definida como sendo o número de ocorrências de falha em um período de tempo dado. A análise do comportamento da taxa de falha de um equipamento por um longo período de tempo pode ser representada por uma curva que possui a forma de uma banheira, sendo conhecida, por esta razão, como Curva da Banheira.

Como observado na Figura A.1, há três regiões distintas nesta curva. A Região I corresponde às falhas no início de funcionamento, que surgem devido a problemas no uso inicial do sistema; tal fase é conhecida como falhas de juventude.

A Região II representa o tempo de vida útil do componente ou sistema. Neste período, as falhas ocorrem de forma aleatória. Como já dito, a taxa de falha constante é uma característica de componentes eletrônicos; em sistemas mecânicos, esta região não é percebida, pois os desgastes inerentes a tais sistemas e os processos de fadiga de material já colocam o equipamento em um processo de degradação, que caracteriza a Região III, também conhecida como falhas de velhice.

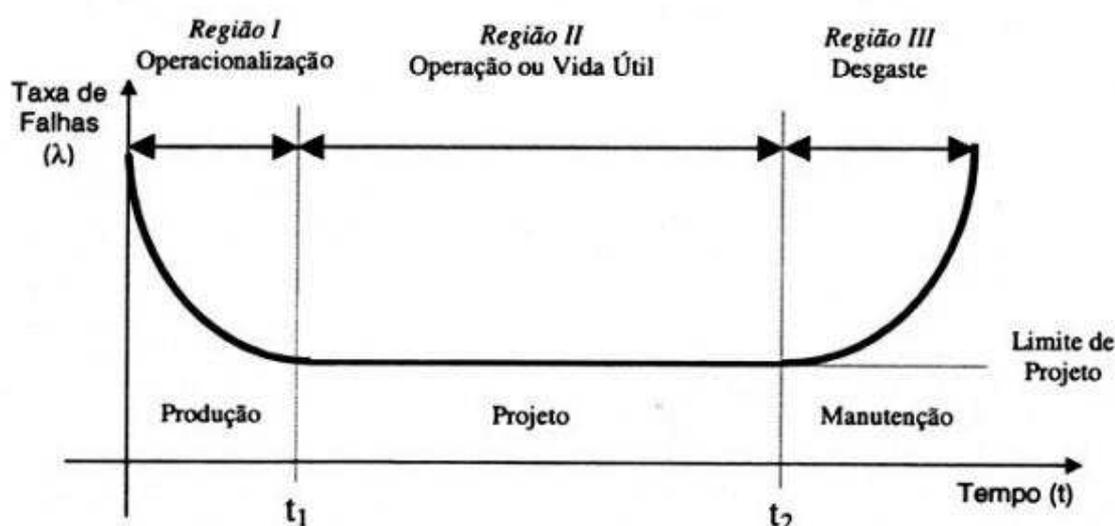


Figura A.1: Curva da Banheira [46].

Devido aos desgastes ocorridos na Região III, são necessárias intervenções de manutenção. A intervenção de manutenção pode ser corretiva, quando envolve uma ação no sentido de restaurar um item logo após uma falha ou preventiva, quando envolve uma ação periódica no sentido de manter um item operando em uma determinada condição.

A grandeza probabilística que mede a capacidade de manter ou recolocar um componente, ou uma unidade, em um estado que permita seu bom desempenho, nas condições de operação determinadas, é a manutenibilidade. Ela pode ser definida como sendo a probabilidade de que um componente, ou sistema, seja reparado e recolocado em funcionamento, dentro de um período de tempo determinado [45]. A taxa de reparo μ é a razão entre o número de reparos e o tempo necessário para efetuar tais reparos.

Outra importante função em probabilidade é a função densidade de falha, representada por $f(t)$ e dada por (A.2):

$$f(t) = -\frac{d}{dt}R(t) = \frac{d}{dt}Q(t) \quad (\text{A.2})$$

A taxa de falha λ relaciona-se com a confiabilidade e a função densidade de falha segundo (A.3).

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{A.3})$$

O valor esperado da variável aleatória contínua denominada tempo até falha é definido como tempo médio até a falha, ou simplesmente, MTTF. Em muitas situações práticas, o conhecimento do MTTF é suficiente para caracterizar a qualidade e disponibilidade de um item.

Da mesma forma, o tempo médio até o reparo é definido. A soma destes dois tempos resulta no tempo médio entre falhas, MTBF.

Analiticamente, o MTTF pode ser dado por (A.4):

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (\text{A.4})$$

Assim, como o MTTF depende da confiabilidade, o MTTR depende da manutenibilidade, e pode ser expresso por (A.5):

$$MTTR = \int_0^{\infty} (1 - M(t))dt \quad (A.5)$$

A.4.4 - Distribuições Estatísticas

As expressões (A.1-A.5) fornecem relações entre todas as funções de confiabilidade, sendo que, o conhecimento de apenas uma possibilita a determinação das demais. As distribuições estatísticas assumem expressões, as quais aproximam os dados representados pelas amostras reais, ou seja, essas aproximam do comportamento da falha em campo.

Segundo [46] a confiabilidade está associada a conceitos estatísticos, devido à sua relação com a probabilidade. Desta forma, diversas distribuições estatísticas podem ser usadas para modelar o comportamento desta probabilidade, conforme mostra a Tabela A-1. Segundo [18], uma vez escolhida a distribuição de probabilidade que melhor descreve o comportamento do tempo de falha do item é então possível estimar as figuras de mérito de interesse, sendo que, se a distribuição de probabilidade for corretamente especificada, as técnicas paramétricas serão mais eficientes que as não-paramétricas.

As distribuições estatísticas também são conhecidas por “distribuições de vida” e, geralmente, representam a probabilidade de um item operar em um determinado momento. Dessa maneira, curva de confiabilidade, taxa de falhas, vida média e outras figuras de mérito de confiabilidade (MTBF e tempo mediano, por exemplo) podem ser calculadas a partir dessas distribuições. Uma discussão mais detalhada sobre o assunto é encontrada na literatura [18, 19, 44, 45]. A próxima subseção apresenta duas distribuições estáticas: a exponencial e a distribuição de Weibull, pelos seguintes motivos:

Tabela A-1: Exemplos de distribuições estatísticas utilizadas em confiabilidade

Distribuição	Função de densidade, f(t)
Binomial	$\binom{n}{x} p^x q^{n-x}$ <p>onde n é o numero de amostras, x é o tamanho das amostras de 0 a n, p é a probabilidade de sucesso e q é 1-p.</p>
Exponencial	$\lambda e^{-\lambda t}$ <p>onde λ é a taxa de falha constante e o inverso do MTBF. Aplicada a Região II da curva da banheira (região constante).</p>
Gamma	$\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} e^{-\beta t}$ <p>onde α é o parâmetro de escala e β é o parâmetro de forma.</p>
Log-normal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}t\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}$ <p>onde μ é a media e σ é o desvio padrão.</p>
Normal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$ <p>onde μ é a media e σ é o desvio padrão.</p>
Poisson	$\frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!}$ <p>onde x é o numero de falhas e λ é a taxa de falha constante. Distribuição apropriada para o número de falhas de uma população em um período de tempo em que os dispositivos tenham uma distribuição exponencial e são substituídos em caso de falha.</p>
Weibull	$\frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$ <p>onde α é o parâmetro de escala e β é o parâmetro de forma. Considerando a curva da banheira: Região I - parâmetro de forma <1; Região III - parâmetro de forma > 1; Região I - parâmetro de forma= 1 (taxa de falha constante).</p>

- A distribuição exponencial é considerada uma das mais simples em termos matemáticos. Entretanto, esta distribuição tem sido extensivamente utilizada para modelar o tempo de vida de certos produtos e materiais, tais como óleos isolantes, dielétricos, componentes eletrônicos, entre outros. Tão importante é sua importância que as normas de predição de taxas de falhas de equipamentos eletrônicos/elétricos utilizam essa distribuição estatística.

- A distribuição de Weibull é frequentemente usada para descrever o tempo de vida de produtos industriais. A sua popularidade em aplicações práticas deve-se ao fato dela apresentar uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica: a sua função de taxa de falha é monótona, isto é, ela é estritamente crescente, estritamente decrescente ou constante. Ela descreve adequadamente a vida de mancais, alguns tipos de componentes eletrônicos, cerâmicas, alguns capacitores e dielétricos.

A.4.4.1 - Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial caracteriza-se por uma taxa de falha λ constante. É uma distribuição uniparamétrica, onde o parâmetro principal é a própria taxa de falha λ .

Sua aplicação se dá no período de vida útil do item analisado. Ela se mostra muito eficiente na análise de componentes eletrônicos, que em condições e ambientes normais de operação, praticamente, não sofrem processos de degradação e possuem longa vida útil.

Considerando as relações dadas em (A.1-A.3) e a função taxa de falha constante, tem-se:

$$\lambda(t) = \lambda \quad (\text{A.6})$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{A.7})$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{A.8})$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{A.9})$$

O MTTF é um valor constante e o inverso da taxa de falha:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{A.10})$$

Semelhantemente, o MTTR é o inverso da taxa de reparo, caso seja distribuída exponencialmente:

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (\text{A.11})$$

A.4.4.2 - Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é, geralmente, uma distribuição bi-paramétrica. Os parâmetros que caracterizam esta distribuição são o parâmetro de escala α (ou δ , para análise de manutenção) e o parâmetro de forma β (ou γ , para análise de manutenção).

A função taxa de falhas, para $\alpha > 0$, $\beta > 0$ e $t \geq 0$ é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \quad (\text{A.12})$$

Logo, obtém-se:

$$R(t) = e^{\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]} \quad (\text{A.13})$$

$$Q(t) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]} \quad (\text{A.14})$$

$$f(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \cdot e^{\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]} \quad (\text{A.15})$$

A distribuição de Weibull se adequa melhor a sistemas mecânicos do que a distribuição exponencial, pois esta última não consegue simular os efeitos de desgaste e fadiga, inerentes a tais sistemas.

A variação do parâmetro de forma β faz com que a distribuição de Weibull se ajuste a vários modelos físicos. Portanto, a distribuição de Weibull é amplamente utilizada em confiabilidade.

Caso o parâmetro de forma β seja igual à unidade. A distribuição de Weibull se iguala a uma distribuição exponencial, onde a taxa de falha é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{1}{\alpha} \quad (\text{A.16})$$

Como citado no item anterior, valores constantes de MTTF e MTTR, característica da distribuição exponencial, serão considerados nas propostas nos itens seguintes. Entretanto, isto não é válido para a distribuição de Weibull. As expressões A.17 e A.18 fornecem um valor constante aproximado de MTTR e MTTR, considerando os parâmetros da distribuição de Weibull.

$$MTTF = \alpha \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (\text{A.17})$$

$$MTTR = \delta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (\text{A.18})$$

Onde a função gamma $\Gamma(a)$ é dada por (A.19):

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} e^{-x} \cdot x^{a-1} dx \quad (\text{A.19})$$

Caso a variável a seja inteira, tem-se:

$$\Gamma(a) = (a - 1)! \quad (\text{A.20})$$

A.5 - Sistemas redundantes

O aumento da confiabilidade/disponibilidade de um sistema pode ser obtido de duas maneiras: melhora da qualidade dos componentes ou a utilização de redundância de componentes ou sistemas.

As redundâncias podem ser ativas ou passivas; redundância passiva, ou redundância *stand-by*, trata de uma estrutura disposta, logicamente, em paralelo, onde o componente redundante passa a funcionar a partir da falha do outro componente. Já a redundância ativa os componentes paralelos funcionam simultaneamente.

O conceito de estruturas de sistemas em paralelo e sistemas em série é essencial para o estudo de sistemas redundantes. Um conjunto de componentes é considerado disposto em série do ponto de vista da confiabilidade se o sucesso da operação do sistema depende do sucesso da operação de cada componente, sendo que, esses não necessitam estar fisicamente em série.

Como o funcionamento de todos os componentes é fundamental, a confiabilidade do sistema em série é dada pelo produto da confiabilidade de seus componentes:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (\text{A.21})$$

Onde n é o número total de componentes.

As considerações feitas para a confiabilidade também são válidas para a disponibilidade.

A.5.1 - Redundância Ativa

Como citado anteriormente, uma redundância ativa constitui um conjunto de componentes em paralelo, onde o funcionamento dos mesmos não depende da falha de alguns deles.

Segundo [44], um conjunto de componentes é considerado disposto logicamente em paralelo, do ponto de vista da confiabilidade, se o sucesso da operação do sistema depende ao menos do sucesso de um de seus componentes, assim:

$$R_s = \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) \quad (\text{A.22})$$

A.5.2 - Redundância Passiva

Redundância passiva é uma estrutura em paralelo, onde um dos componentes passa a funcionar após a falha do outro. A taxa de falha na unidade de espera é, naturalmente, mais baixa que aquela da unidade em operação. O esquema mostrado na Figura A.2 representa um sistema *stand-by*:

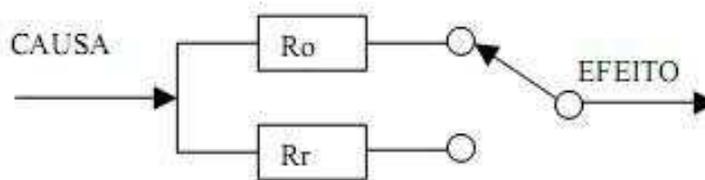


Figura A 2: Sistema com redundância passiva

Considerando P_{ch} como sendo a probabilidade de sucesso de chaveamento de uma unidade para outra e R_{ch} a confiabilidade da conexão ou da chave, a confiabilidade do sistema R_s é dada por (22):

$$R_s = (1 - Q) \cdot R_{ch} \quad (A.23)$$

Onde,

$$Q = Q_o - Q_o \cdot P_{ch}(1 - Q_r) \quad (A.24)$$

A.6 - Considerações Finais

Neste apêndice, diferentes conceitos necessários para compreensão da confiabilidade foram abordados, esclarecendo-se aspectos pouco abordados nas áreas de eletrônica de potência e acionamento de máquinas. Dessa forma as principais figuras de mérito, como taxa de falha, MTBF e MTTF, foram expostas, assim como as principais

distribuições estatísticas utilizadas em confiabilidade. Isso possibilitará ao leitor um maior entendimento sobre os conceitos que serão tratados nos capítulos dessa dissertação, assim como justificar a escolha das normas de predição de taxa de falhas para a determinação da confiabilidade dos componentes eletrônicos e consequente do sistema de acionamento de motores elétricos. Também é importante destacar, que caso o leitor queira um conhecimento mais aprofundado sobre os conceitos relacionado ao tema, a literatura apresenta diversas obras; como sugestão, cita-se [18, 19, 28, 42, 44-46].

APÊNDICE B

TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY

B.1 - Considerações Iniciais

Em geral os sistemas que utilizam a teoria *fuzzy* não requerem modelos matemáticos precisos dos processos, entretanto, esses sistemas usam a experiência e o conhecimento dos profissionais (especialistas), envolvidos nos processos em estudo, para construir a base de regras. A lógica *fuzzy* tem mostrado bons resultados na área de controle de motores, por exemplo, em [47] são usados controladores de lógica *fuzzy* e PI para controlar o ângulo de carga o que simplifica o sistema de acionamento do motor de indução trifásico; o controlador *fuzzy* também pode ser usado para calcular dinamicamente o vetor de tensão de referência do estator, conforme foi apresentado em [48]. Essa ferramenta também tem apresentado resultados satisfatórios em outras áreas, como no estudo dos casos de dengue no estado de São Paulo [34] e para o mapeamento do potencial mineral de níquel e ouro no estado de Rondônia [49], o que demonstra a gama de aplicações em que o método *fuzzy* pode ser utilizado.

Na próxima seção são descritas as definições básicas de conjuntos *fuzzy* e algumas operações matemáticas importantes que podem ser realizadas com esses conjuntos. Inicialmente são introduzidos termos mais usados na linguagem cotidiana dos sistemas *fuzzy*, tais como variáveis linguísticas, proposições *fuzzy*, relações *fuzzy*, implicações e o mecanismo de inferência. Em um segundo momento, é realizada uma descrição da estrutura do método

fuzzy, assim como do processo de *defuzzificação* que tem como finalidade calcular o valor numérico (*crisp*) da saída.

B.2 - Conjuntos Fuzzy

Na modelagem de diversos fenômenos é comum se deparar com variáveis de grande influência, mas que não são precisamente quantificadas. Exemplos disso são amplamente discutidos no Capítulo 2 sobre fatores ambientais adversos a componentes eletrônicos. Tais variáveis são muito complexas para serem analisadas de modo tradicional ou não podem ser tratadas pela álgebra tradicional por apresentarem características incertas. Entretanto, por serem fundamentais para o sistema em estudo, não podem ser ignoradas.

No cotidiano, as pessoas estão a todo instante classificando essas variáveis, quantificando-as do seu modo. E, a partir disso, são capazes de tirar conclusões precisas a respeito da incerteza inerente ao fenômeno. Por exemplo, um médico pode medir numericamente a temperatura ou a pressão arterial de um paciente, mas relacionar um número à dor que este sente não é um processo objetivo. Quem quantifica a dor é o paciente, atribuindo-lhe valores como “fraca”, “média”, “forte”, “insuportável”, conceitos completamente abstratos e subjetivos. Na tentativa de se transformar a informação subjetiva em números, [34] propôs mostrar ao paciente uma figura com diferentes cores e suas graduações. Pedese para ele escolher aquela que melhor expressa o seu sentimento (em geral, cores mais quentes indicam maior dor). Como cada cor corresponde a um comprimento de onda, pode-se relacionar um número à dor do paciente, conseguindo-se uma medida objetiva.

Essa relação entre conceitos subjetivos e números pode ser realizada através de modelagem matemática utilizando a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Esse tipo de teoria tem se

mostrado mais adequado na manipulação de variáveis incertas e subjetivas do que a matemática clássica através de conjuntos *crisp*.

Para o entendimento do método a ser utilizado para a manipulação das variáveis *fuzzy*, faz-se necessária, primeiramente, a apresentação de algumas definições da teoria dos conjuntos *fuzzy*, presentes em diversas obras literárias [34, 50-55].

B.2.1 - Função Característica

Seja S um conjunto cujo domínio é X . A função característica do conjunto S tem o valor $\mu_S(x) = 1$ se $x \in S$, e $\mu_S(x) = 0$ se $x \notin S$, $\mu : X \rightarrow \{0, 1\}$. O conjunto S com esta função característica é denominada conjunto clássico ou *crisp*.

Dessa maneira, nesse conjunto S qualquer elemento x do domínio X assume só e exclusivamente a condição de pertencente ou a de não pertencente ao conjunto. Baseando-se nessa representação, se define um subconjunto *fuzzy* considerando os graus de pertinência.

B.3.2 - Função de Pertinência

Seja F um conjunto cujo domínio é X . A função de pertinência $\mu_F(x)$ do conjunto F é uma função que designa valores, ou graus de pertinência, para cada $x \in F$, $\mu : X \rightarrow [0, 1]$. Então F é denominado de conjunto *Fuzzy*.

Aparentemente, os conjuntos *crisp* podem ser tratados como um caso especial dos conjuntos *fuzzy*, visto que a função característica pode assumir valores somente marginais do intervalo $[0, 1]$ no qual é definida a função de pertinência.

Em teoria de conjuntos *fuzzy*, a faixa de possíveis valores quantitativos considerados para os membros do conjunto *fuzzy* é denominada universo de discurso.

A função de pertinência converte o grau de nebulosidade num intervalo normalizado $[0, 1]$, onde os valores limites 0 e 1 lembram o grau de pertinência dos membros

do conjunto *crisp*. Ou seja, a condição de pertencente $\mu_F(x) = 1$ ou a de não pertencente ao conjunto $\mu_F(x) = 0$.

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, conquanto as mais usadas sejam as formas triangular, trapezoidal, Gaussiano e curvas de Bell-shaped, como mostrado na Figura B.1.

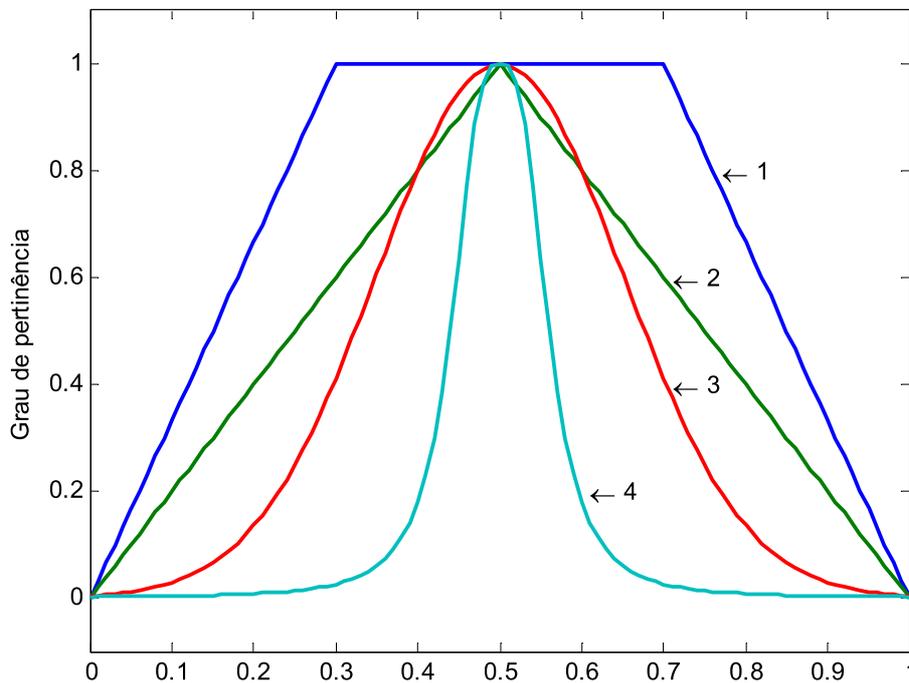


Figura B.1: Função de pertinência (1) trapezoidal (2) triangular (3) gaussiano e (4) curva Bell-shaped.

B.3.3 - Centro e Núcleo do Conjunto *Fuzzy*

O único valor $x = c_F = c_F^x \in F \in F$, com o máximo valor de pertinência $\mu_F(c_F) = 1$, é denominado o centro do conjunto *fuzzy* F . Se existe um conjunto de valores com o máximo grau de pertinência, $core(F) = \{x \in X : \mu_F(x) = 1\}$, então $core(F)$ é denominado núcleo do conjunto *fuzzy* F . O centro do conjunto *fuzzy* F com um núcleo, é calculado através de $c_F^x = (x_a + x_b)/2$, sendo x_a e x_b os limites do núcleo.

B.3.4 - União, Intersecção e Complemento de Conjuntos *Fuzzy*

Há muitas formas de determinar a função de pertinência do conjunto *fuzzy* resultante da união e intersecção de conjuntos *fuzzy*, assim como para determinar o complemento de um conjunto *fuzzy*. Zadeh [51] tem proposto as seguintes definições para essas operações:

$$\begin{aligned}\mu_{B \cap C}(x) &= \min(\mu_B(x), \mu_C(x)) \\ \mu_{B \cup C}(x) &= \max(\mu_B(x), \mu_C(x)) \\ \mu_{\bar{B}}(x) &= 1 - \mu_B(x)\end{aligned}\tag{B.1}$$

B.4 - Variável Linguística

Uma das grandes vantagens do uso da lógica *fuzzy* é a possibilidade de transformar a linguagem cotidiana em conjuntos de números, permitindo sua manipulação computacional. As variáveis linguísticas são variáveis cujos valores são palavras ou sentenças em linguagem utilizada no dia-a-dia, assumindo valores chamados de termos linguísticos. Por exemplo, a Figura B.2 apresenta os termos linguísticos “Baixo”, “Mediano”, e “Alto” são relativos à variável linguística ALTURA dos seres humanos.

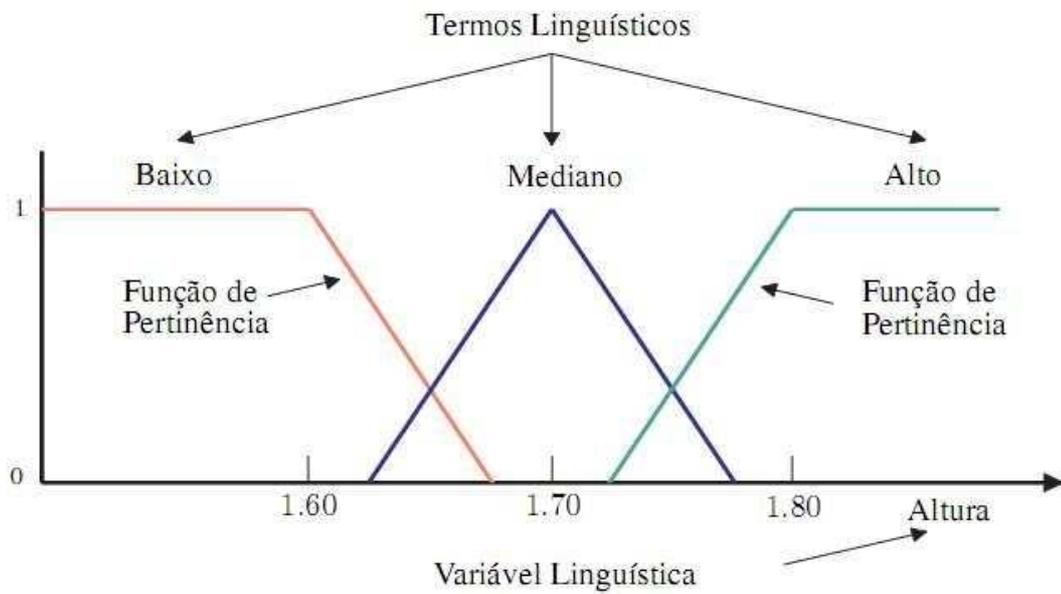


Figura B. 2: Função de pertinência, variável linguística e termos linguísticos [50].

B.4.1 - Proposições *Fuzzy*

Seja $x \in X$ uma variável linguística e $T_i(x)$ um conjunto *fuzzy* associado com o termo linguístico T_i . Logo a seguinte estrutura representa uma proposição, isto é:

$$P_i: x \text{ é } T_i \quad (B.2)$$

Uma proposição *fuzzy* é interpretada por um processo conhecido como *fuzzificação*.

Considerando um exemplo da ALTURA seria:

Proposição: 1,50 é “Baixo”

Proposição: 1,70 é “Mediano”

Proposição: 1,90 é “Alto”

B.4.2 - Fuzzificação

Seja $x \in X$ uma variável linguística e $T_i(x)$, um conjunto *fuzzy* associado ao termo linguístico T_i . A conversão de um valor físico (numérico) de x no seu correspondente termo linguístico com a associação de um grau de pertinência, $x \rightarrow \mu_{T_i(x)}$ é denominada fuzzificação. A função de pertinência $\mu_{T_i(x)}$ representa o equivalente *fuzzy* do valor de x .

B.4.3 - Relação Fuzzy

Sejam $x \in X$ e $y \in Y$ variáveis linguísticas, e $T_i(x)$ e $F_j(y)$, conjuntos *fuzzy* correspondentes aos termos linguísticas T_i e F_j , respectivamente, a seguinte estrutura representa, conseqüentemente, uma relação de duas dimensões:

$$R_{ij} = x \text{ é } T_i \wp y \text{ é } F_j$$

denotado por (B.3)

$$R_{ij} = P_i^x \wp P_j^y$$

Sendo que \wp é um operador. A escolha do operador \wp tem uma influência direta na estrutura do controlador *fuzzy* [52]. Tal operador será mais detalhado na próxima seção, em que se discute a construção da Base de Regras *Fuzzy*.

B.5 - Base de Regras Fuzzy

A base de regras *fuzzy* é a parte central da metodologia *fuzzy* e representa a "inteligência" em qualquer algoritmo *fuzzy*. É aqui que o conhecimento do projetista e sua experiência devem ser corretamente interpretados e organizados em um conjunto apropriado de regras [52].

A base de regras contém um conjunto de regras-proposições *fuzzy* onde as variáveis antecedentes e consequentes são variáveis linguísticas, e os possíveis valores de uma variável linguística são representados por conjuntos *fuzzy*, ou seja, uma proposição *fuzzy* expressa relações entre variáveis linguísticas e conjuntos *fuzzy* [55]. As proposições podem estar no formato “*SE ... ENTÃO*”, como por exemplo:

$$\text{RF: SE a pressão é alta, ENTÃO o volume é pequeno} \quad (\text{B.4})$$

Sendo que na Regra *Fuzzy* (RF), **alta** e **pequeno** são conjuntos *fuzzy*, e **pressão** e **volume** são variáveis linguísticas. Pressão é o antecedente (premissa) e volume é o consequente.

B.6 - Mecanismos de Inferência

Independentemente da forma das regras *fuzzy*, a maior preocupação é como interpretar o significado de cada regra, isto é, como determinar a influência produzida pela parte antecedente da regra *fuzzy* na parte consequente da regra. O procedimento para analisar essa influência é denominado implicação *fuzzy*. Existem muitas formas possíveis para definir uma implicação *fuzzy* [55], mas em geral duas delas são preferidas: a implicação **produto** (também denominado implicação Larsen), e a implicação **mínimo** ou Mandani.

$$\begin{aligned} \mu_{RF^i} &= \mu_{R_{pq}} \cdot \mu_{P_m} \\ \mu_{RF^i} &= \min(\mu_{R_{pq}}, \mu_{P_m}) \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

O índice RF^i na equação (B.5) é para determinar que o valor da função de pertinência μ_{RF^i} refere-se à regra fuzzy i . A regra é do tipo RF^i : **SE** R_{pq} **ENTÃO** P_m .

A implicação *fuzzy* produto (**prod**), multiplica o valor numérico resultante da aplicação da norma T **mínimo** (método para operação AND) no antecedente pela função de pertinência do conjunto fuzzy do conseqüente da regra, apresentado na Figura B.3. No entanto, a implicação *fuzzy* mínimo (**min**), calcula o valor mínimo entre o valor numérico resultante da aplicação da norma T **mínimo** (método para operação AND) no antecedente, e a função de pertinência do conjunto fuzzy do conseqüente da regra, apresentado na Figura B.4.

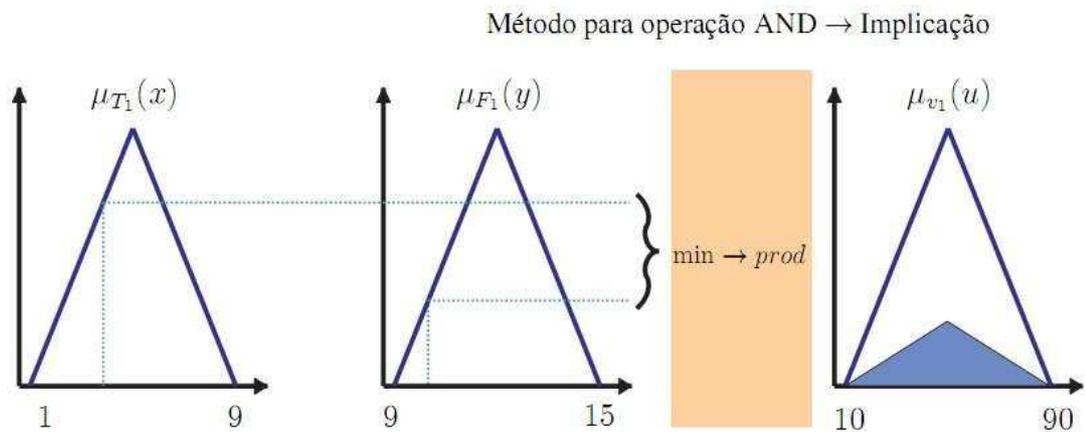


Figura B.3: Implicação Fuzzy Produto Aplicado a uma Regra [50].

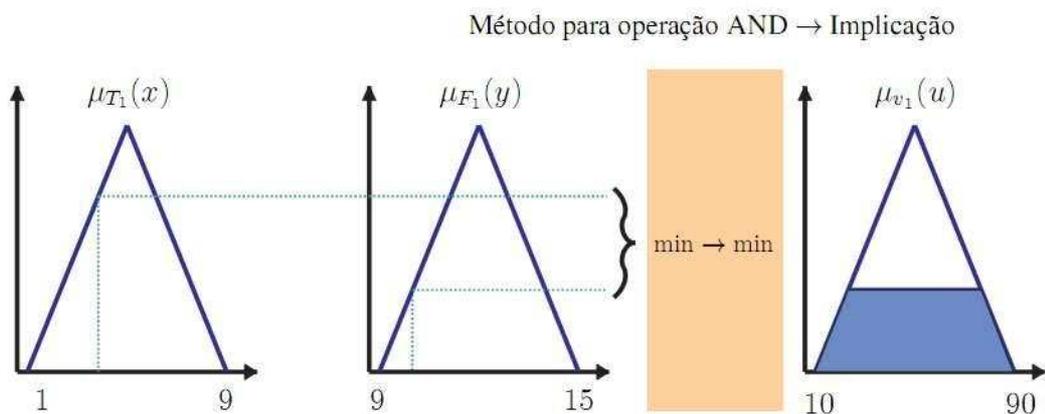


Figura B.4: Implicação Fuzzy Mínimo Aplicado a uma Regra [50].

B.6.1. Agregação *Max-Min*

O primeiro passo da inferência baseada em regras individuais é determinar o grau de pertinência da parte antecedente da regra (por exemplo, relação R_{pq}), e, então, calcular a influência deste dado na parte consequente da regra (por exemplo, na preposição P_m). Esse procedimento é utilizado para todas as regras *fuzzy* e, finalmente, o processo denominado agregação é concluído com a inferência do conjunto *fuzzy* resultante para o sistema, a ser usado para calcular o valor *crisp* da saída [54].

A saída das regras individuais podem ser compostas de diferentes formas, dependendo de qual operador de agregação se esteja usando. Há diferentes operadores de agregação, mas os operadores **max** e **sum** são os mais frequentemente usados [53].

Se o operador máximo (**max**) fosse usado como operador de agregação, então o significado de todas as regras *fuzzy* seria definido pela equação (B.6); no entanto, se o operador fosse a soma (**sum**), então o significado de todas as regras seria definido na equação (B.7).

$$\mu_U(x_k, y_k, u) = \mu_{U_{i=1}^r FR^i}(x_k, y_k, u) = \max \left\{ \min_{i=1}^r \left[\mu_{R_{pq}}, \mu_{P_m} \right] \right\} \quad (B.6)$$

$$\mu_U(x_k, y_k, u) = \mu_{U_{i=1}^r FR^i}(x_k, y_k, u) = \sum \min_{i=1}^r \left[\mu_{R_{pq}}, \mu_{P_m} \right] \quad (B.7)$$

Observa-se o processo completo de inferência, de forma gráfica, na Figura B.5.

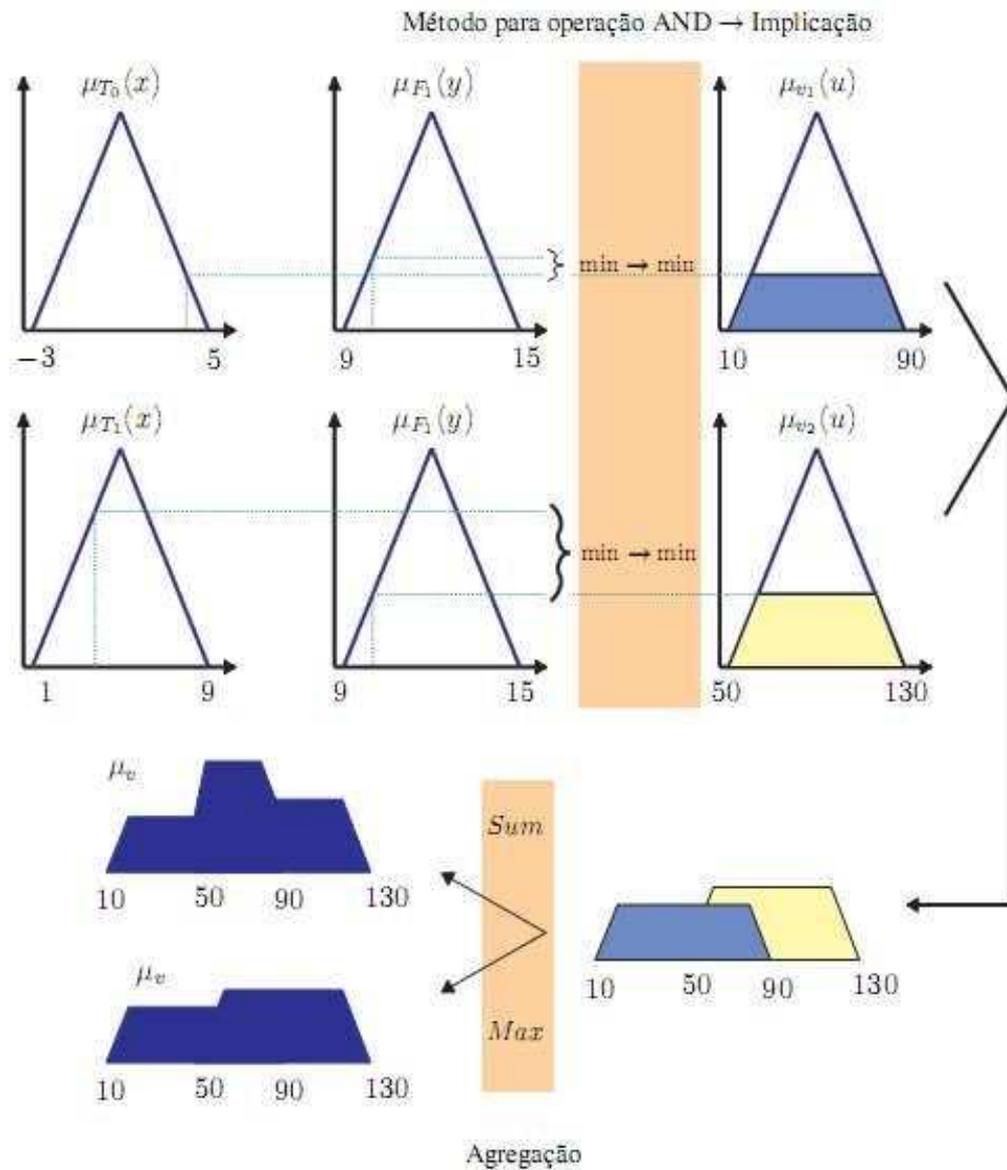


Figura B.5: Representação Gráfica do Procedimento de Inferência [50].

B.7 - Defuzzificação

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída através do processo de inferência, no estágio de *defuzzificação* é efetuada uma interpretação dessa informação, pois, em aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas. Essa saída é calculada com base na inferência por meio das funções de pertinência das variáveis linguísticas da parte consequente

das regras para obtenção de uma saída não *fuzzy* (*crisp*), nessa etapa as regiões resultantes são convertidas em valores de saída numéricos do sistema [53].

Há vários métodos de defuzzificação, tais como método do critério máximo, média dos máximos, Singleton, etc. [55]. No entanto, o valor de saída *crisp* é frequentemente calculado de acordo com o princípio de gravidade, isto é:

$$\mu_{FC}(x_k, y_k) = \frac{\sum_i \mu_i \cdot \mu_u(x_k, y_k, u)}{\sum_i \mu_u(x_k, y_k, u)} \quad (\text{B.8})$$

B.8 - Estrutura do método Fuzzy

O tipo de estrutura do método *fuzzy* depende do processo sob estudo e da qualidade requerida. Dessa maneira, as estruturas diferem em relação ao número de entradas e saídas, pelo número de conjuntos *fuzzy* utilizados para a(s) entrada(s) e saída(s), pela forma das funções de pertinência, pela forma das regras *fuzzy*, pelo tipo de mecanismo de inferência, e pelo método de *defuzzificação* utilizado [52].

Apesar da variedade de possibilidades de estruturas para o método *fuzzy*, a forma básica de todos os tipos comuns consiste em: 1. *Fuzzificação*, 2. Base de regras *fuzzy*, 3. Mecanismo de inferência, e 4. *Defuzzificação*. A Figura B.6 apresenta uma representação gráfica dessa estrutura.

Segundo [52], o sistema de inferência *fuzzy* considera entradas não *fuzzy*, ou seja, entradas precisas, resultantes de medições ou observações (conjunto de dados, por exemplo), que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disso, é necessário efetuar um mapeamento desses dados precisos para os conjuntos *fuzzy* (de entrada) relevantes, o que é

realizado no estágio de *fuzzificação*; nesse estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para uma dada situação.

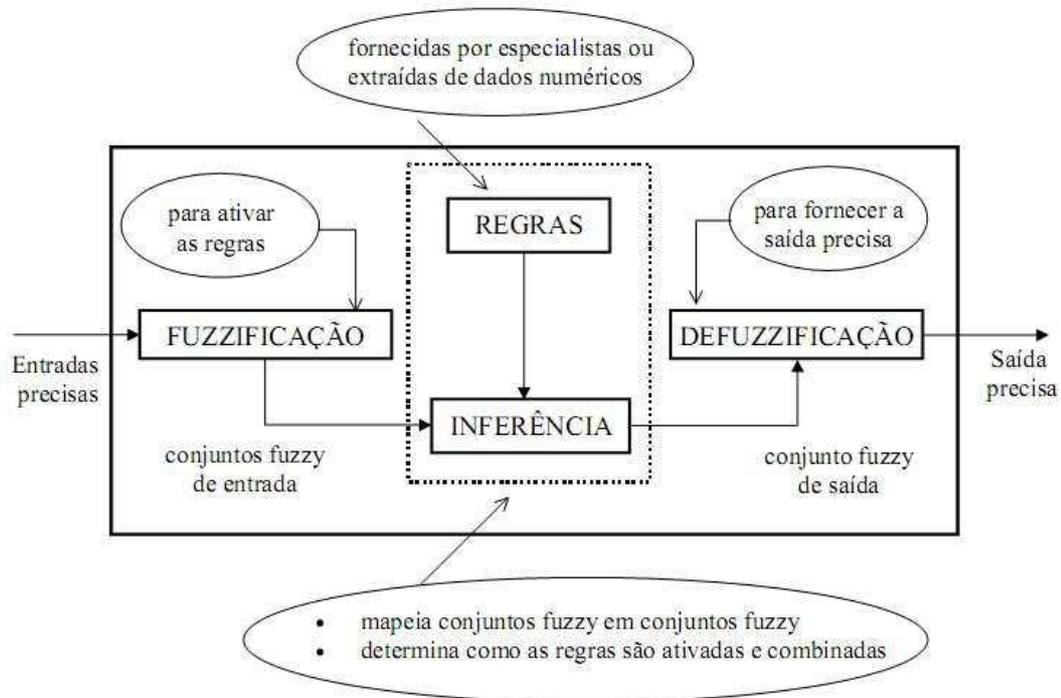


Figura B.6: Estrutura Fuzzy [55].

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída através do processo de inferência, no estágio de *defuzzificação* é efetuada uma interpretação dessa informação. Pois, em aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas, conforme discutido na seção anterior.

As regras podem ser fornecidas por especialistas em forma de sentenças linguísticas e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*. Tomando como exemplo um controlador *fuzzy*, esse só terá um bom desempenho se as regras que definem a estratégia de controle forem consistentes. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo “SE ... ENTÃO” pode não ser uma tarefa fácil, por mais conhecedores que os especialistas sejam do problema em questão. Alternativamente ao uso de especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de regras de dados numéricos [55].

No estágio de inferência ocorrem as operações com conjuntos *fuzzy* propriamente ditas: combinação dos antecedentes das regras e sua implicação. Os conjuntos *fuzzy* de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e os de saída, referentes aos consequentes, podem ser definidos previamente ou, alternativamente, gerados automaticamente a partir dos dados.

B.9 - Considerações Finais

Alguns conceitos necessários para compreensão da teoria *fuzzy* foram abordados nesse apêndice, como: funções características, funções de pertinência, operações matemáticas com conjuntos, variáveis linguísticas e estrutura básica do método *fuzzy*. Permitindo ao leitor uma melhor compreensão da modelagem utilizada neste trabalho, para a determinação das taxas de falhas dos componentes de um sistema de acionamento e de sua confiabilidade. Caso o leitor necessite um conhecimento mais aprofundado sobre a teoria *fuzzy*, diversas obras podem ser consultadas; como sugestão, cita-se [34, 50-55].