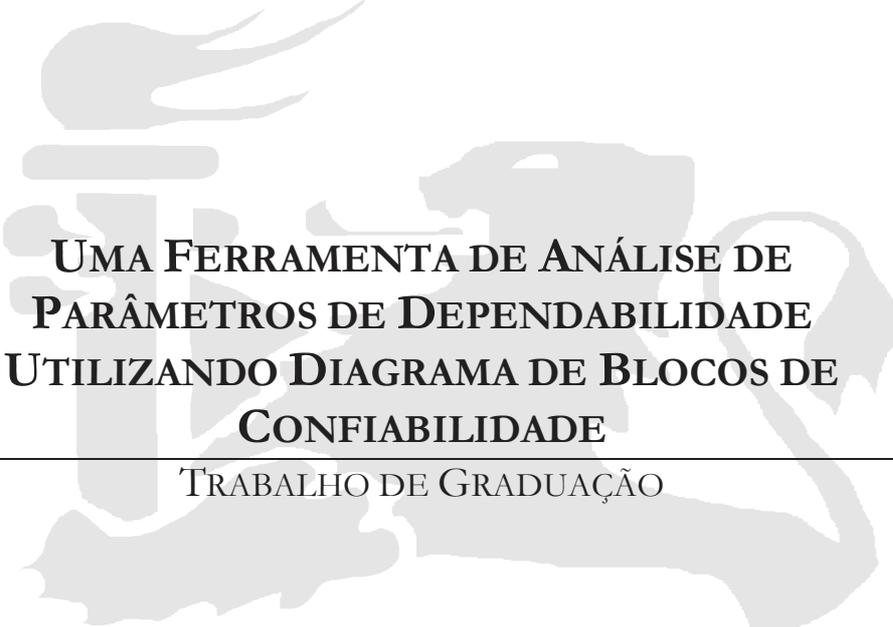




Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática



UMA FERRAMENTA DE ANÁLISE DE
PARÂMETROS DE DEPENDABILIDADE
UTILIZANDO DIAGRAMA DE BLOCOS DE
CONFIABILIDADE

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Curso de Engenharia da Computação

Aluno: André Feitoza de Mendonça (afm4@cin.ufpe.br)

Orientador: Professor Paulo Romero Martins Maciel (prmm@cin.ufpe.br)

DEZEMBRO DE 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE INFORMÁTICA

ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

UMA FERRAMENTA DE ANÁLISE DE
PARÂMETROS DE DEPENDABILIDADE
UTILIZANDO DIAGRAMA DE BLOCOS DE
CONFIABILIDADE

André Feitoza de Mendonça

Monografia apresentada ao Centro de
Informática da Universidade Federal de
Pernambuco como exigência parcial para
obtenção do título engenheiro da
computação, sob orientação do professor
Paulo Romero Martins Maciel.

Recife

Dezembro 2009

Agradecimentos

Agradeço ao professor Paulo Romero Martins Maciel pela oportunidade por ele oferecida a mim de contribuir em suas pesquisas com este trabalho de graduação.

Bruno Silva, que dedicou parte de seu tempo no auxílio de meu trabalho de conclusão de curso.

Saudosa mãe Fátima, que, enquanto esteve entre nós, disseminou sua bondade. Pai Mendonça, um exemplo de moral e determinação. Irmão Alexandre, acima de tudo, um amigo.

Tatiana, que soube compreender a falta de tempo para com ela devido à dedicação a este trabalho.

Amigos de faculdade, Eduardo e Anderson, companheiros de diversos projetos durante o curso.

Resumo

Os atributos de dependabilidade em determinados sistemas são cruciais para a análise de seus serviços oferecidos. Em especial, as métricas de dependabilidade de *Data Centers*, que operam 24 horas por dia e 7 dias na semana, são decisivas para a previsão do tempo em que o sistema não estará operacional e seus conseqüentes prejuízos. Este trabalho propõe uma alternativa de cálculo para atributos de dependabilidade. Trata-se de um software que foca nos seguintes atributos: confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. Trazendo Diagrama de Blocos de Confiabilidade como modelagem, a ferramenta computacional considera distribuições de probabilidades exponenciais em seus cálculos. Ao fim deste trabalho, a ferramenta é analisada através de um estudo de caso que compara os resultados obtidos pelo software desenvolvido e os valores reais. Essa comparação comprovou a precisão das métricas de dependabilidade oferecidas pela ferramenta.

Abstract

The attributes of dependability in certain systems are crucial to the analysis of its offered services. In particular, the dependability metrics of Data Centers, which work 24 hours per day and 7 days a week, are decisive in predicting the time in which the system will not be operational and the consequent costs of it. This work purposes an alternative way to calculate parameters of dependability attributes. It is a software which focus on the following attributes: reliability, maintainability and availability. Using the Reliability Block Diagram (RBD), the software considers exponential distribution of probabilities in its calculus. At the end of this work, the computational tool is analyzed through a case study that compares the results of the software developed with real values. The analysis done proves the accuracy of the dependability metrics provided by the tool.

Sumário

1.	Introdução	6
1.1	Contexto.....	6
1.2	Objetivos.....	7
1.3	Trabalhos Relacionados.....	8
1.4	Estrutura do Documento	8
2.	Fundamentos	10
2.1	Noções Básicas de Probabilidade.....	10
2.2	Probabilidade Condicional e Eventos Independentes	11
2.3	Variáveis Aleatórias	12
2.4	Distribuições de Probabilidade	14
2.4.1	Distribuição Binomial.....	14
2.4.2	Distribuição Normal	15
2.4.3	Distribuição Exponencial.....	16
3.	Dependabilidade	18
3.1	Confiabilidade.....	18
3.1.1	Definições Matemáticas de Confiabilidade	19
3.1.2	Distribuição de Falhas Exponencial	21
3.1.3	Distribuição de Falhas Weibull	22
3.1.4	Distribuição de Falhas Normal.....	24
3.2	Manutenabilidade	26
3.2.1	Definições Matemáticas de Manutenabilidade.....	26
3.2.2	Distribuição Exponencial de Tempo de Reparo.....	28
3.3	Disponibilidade	28
3.3.1	Definições Matemáticas de Disponibilidade.....	29
4.	Modelagem de Dependabilidade para Sistemas	32
4.1	Diagrama de Blocos de Confiabilidade.....	35
4.1.1	Configuração Série	37
4.1.2	Configuração Paralela.....	38
4.1.3	Configuração <i>k-out-of-n</i>	39
4.1.4	Configuração Ponte.....	39
5.	Metodologia	42
6.	Ferramenta	44
6.1	Funcionalidades	44
6.2	Arquitetura do Software	45
7.	Estudo de Caso.....	49
7.1	Análise do Problema	49
7.2	Modelagem do Sistema	51
7.2.1	Caso 1.....	52
7.2.2	Caso 2.....	53
7.2.3	Caso 3.....	54
7.3	Avaliação do Sistema	54
8.	Conclusão	57

1. Introdução

1.1 Contexto

Falhas existem e vêm se tornando elementos-chaves na competição entre produtos. As falhas acontecem de controles remotos a aviões, ocasionando enormes prejuízos econômicos e, até mesmo, mortes. Neste contexto, empresas passaram a se preocupar com métricas de confiabilidade [6,11,23] de seus produtos. Informações precisas sobre confiabilidade passaram a ser bastante valorizadas pelos consumidores e um fator decisivo na compra. A utilização de tais métricas de confiabilidade permite, por exemplo, uma previsão, dentro de uma margem de erro controlada, de quando um sistema falhará pela primeira vez.

Métricas de manutenibilidade [4], como o tempo médio de reparo de um sistema, são cruciais para que prejuízos econômicos sejam medidos e controlados. No caso de um sistema de controle de tráfego aéreo, por exemplo, é estritamente necessário que o tempo médio de manutenção do referido sistema seja mensurado, uma vez que se trata de um sistema crítico.

De acordo com [6], aspectos como a confiabilidade e manutenibilidade ocupam a segunda e quarta posições, respectivamente, na lista dos dez atributos mais importantes em produtos, como mostra a Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Atributos mais importantes de produtos¹

Atributo	Score médio
Performance	9.5
Confiabilidade	9.0
Serviço	8.9
Manutenibilidade	8.8
Garantia	8.4
Facilidade de uso	8.3
Aparência	7.7
Marca	6.3
Embalagem/Visual	5.8
Modelo mais recente	5.4

¹ Fonte: Ebeling(1997, p.3)

A disponibilidade [6,11,23] de um sistema, por sua vez, é uma métrica que, considerando a confiabilidade e manutenibilidade, indica, em termos percentuais, a quantidade de tempo durante a qual o sistema opera corretamente. De acordo com [6], admite-se duas formas de se medir a disponibilidade de um sistema. A primeira maneira é observar a história do sistema e computar o tempo em que o mesmo operou corretamente e em que esteve em reparo. Com esses dados, é possível o cálculo da disponibilidade. Já a segunda forma de cálculo, que será abordada com mais profundidade neste trabalho, faz uma projeção da disponibilidade a cada instante de tempo, não necessitando de dados históricos. No caso de um sistema bancário, por exemplo, seria possível a previsão da disponibilidade do mesmo antes mesmo de sua entrada em funcionamento.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é propor uma ferramenta de software para análise de parâmetros de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade de sistemas. Os cálculos devem ser feitos considerando distribuição exponencial [17,24] de probabilidades e utilizando Diagrama de Blocos de Confiabilidade² [11,23] para modelagem. Mais especificamente, os objetivos deste trabalho são:

- Explicar os conceitos de variáveis aleatórias [17,19] e citar alguns exemplos de distribuições de probabilidades;
- Definir dependabilidade [8,12] e conceituar, matematicamente, confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade;
- Explicar a importância da distribuição exponencial para cálculos de dependabilidade;
- Citar modelos de dependabilidade, focando na modelagem RBD;
- Propor uma alternativa de ferramenta de software para cálculo de métricas de dependabilidade e, através de um estudo de caso, analisar a precisão de seus cálculos.

² Na literatura, a modelagem Diagrama de Blocos de Confiabilidade é conhecida como *Reliability Block Diagram* (RBD)

1.3 Trabalhos Relacionados

No mercado existem muitas ferramentas de software que propõem análise de métricas de dependabilidade de sistemas. Em especial, o software BlockSim [22] permite a modelagem de sistemas utilizando Diagrama de Blocos de Confiabilidade ou *Fault Trees* [11], ou até mesmo combinação entre tais modelagens.

O software descrito em [21] e a ferramenta computacional Sharpe [5], por sua vez, apresentam, além da metodologia RBD e *Fault Tree*, cálculos de parâmetros de dependabilidade baseados em Redes Petri [14] e cadeias de Markov [11], utilizando os modelos *Stochastic Petri Net* (SPN) [23] e *Generalized Stochastic Petri Net* [8].

A ferramenta descrita neste trabalho apresenta modelagem RBD para cálculo de métricas de dependabilidade. Além da modelagem citada, o software é parte integrante do projeto DESDAC³ que utiliza simulações seguras de sistemas com o uso de modelos SPN. A ferramenta proposta é voltada para o contexto de *Data Centers*, sendo assim, apropriada para cálculos de dependabilidade para esta área. As alternativas de software apresentadas possibilitam a modelagem de sistemas genéricos, não se restringindo a um domínio específico.

1.4 Estrutura do Documento

Este documento está dividido em oito capítulos. O primeiro mostra a relevância dos atributos de dependabilidade e define os objetivos do trabalho. O capítulo 2 traz definições matemáticas básicas de probabilidade e variáveis aleatórias, descrevendo algumas distribuições de probabilidades de destas.

O conceito de dependabilidade é descrito no capítulo 3. Os atributos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade são definidos com mais detalhes, focando na utilização da distribuição exponencial de probabilidades. O capítulo 4 traz um apanhado de modelagens de sistemas para análise de

³ O projeto DESDAC será descrito com maiores detalhes no capítulo 6

dependabilidade presentes na literatura, focando a modelagem *Reliability Block Diagram*.

O capítulo 5 mostra a metodologia adotada para o desenvolvimento da ferramenta descrita neste trabalho. Já o capítulo 6 relata as funcionalidades da ferramenta, bem como a arquitetura de software empregada em seu projeto.

O capítulo 7 avalia a precisão dos cálculos da ferramenta, comparando os resultados fornecidos pela mesma com dados reais obtidos de um estudo de caso. O capítulo 8 traz a conclusão final do trabalho.

2. Fundamentos

2.1 Noções Básicas de Probabilidade

Muitas vezes se faz necessário uma estimativa da possibilidade de um evento ocorrer. Evento, neste trabalho, é considerado qualquer conjunto de resultados possíveis de um determinado espaço amostral. Uma opção para inferência da chance de ocorrência de um evento é fazer uso de frequência relativa [17,19] através de experimentação, ou seja, repetir o mesmo evento n vezes e observar a frequência com que o evento ocorre. De acordo com [19], frequência relativa é uma medida proporcional de quão verossímil é um evento em um conjunto de observações. A equação a seguir define frequência relativa de um evento A :

$$f_A = \frac{n_A}{n}, \quad (2.1)$$

onde n_A é o número de ocorrências do evento A após n repetições.

A fim de obter um número mais próximo do real, a frequência relativa f_A deve ser medida após um grande número de repetições. Contudo, a quantidade “ideal” de repetições necessárias para que f_A convirja corretamente é dependente do experimento considerado. Essa dependência pode fazer com que o número n de repetições de uma determinada experiência seja insuficiente e que a f_A mensurada ainda esteja longe de se aproximar do valor real. Segundo [17], outro problema do uso de frequência relativa são os desvios aleatórios que podem acontecer. Por exemplo, é possível que uma moeda não viciada, quando arremessada 10 vezes, venha a apresentar 9 caras e 1 coroa.

Devido à imprecisão gerada pelo uso de frequência relativa, estabeleceu-se o uso de um número denominado probabilidade para medir a chance de um evento ocorrer. De acordo com [18], probabilidade é usada para quantificar o grau de certeza de um evento associado a um experimento aleatório.

A probabilidade de um evento A , denominada de $P(A)$, se relaciona com sua frequência relativa através da seguinte equação, proposta por [17]:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_A.$$

De acordo com [17], cada evento A associa-se com um número real denominado probabilidade, que satisfaz as seguintes propriedades:

- $0 \leq P(A) \leq 1$;
- $P(S) = 1$, onde S é o espaço amostral;
- Sejam $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n, \dots$ eventos mutuamente excludentes dois a dois, então:

$$P(\cup_{i=1}^n A_i) = \sum_{i=1}^n P(A_i).$$

2.2 Probabilidade Condicional e Eventos Independentes

O conceito de probabilidade condicional [17,19,24] é extremamente útil para modelar situações onde se quer estabelecer relação entre dois eventos. Sejam A e B eventos, a probabilidade de o evento B , quando A tiver ocorrido, é dita condicional e simbolizada por: $P(B|A)$.

Um exemplo clássico de uso de probabilidade condicional é a remoção de bolas brancas e pretas de uma urna. O cálculo da probabilidade de se retirar uma bola branca depois de já haver removido uma bola preta, sem reposição, faz uso do conceito mencionado. Num caso real, onde a urna contém 10 bolas, sendo 5 brancas e 5 pretas, o valor da probabilidade descrita é $5/9$, uma vez que quando a bola branca é retirada, restam apenas 9 bolas na urna, pois uma bola preta já teria sido retirada.

A fórmula fechada para o cálculo de probabilidades condicionais é definida por [18] como:

$$P(B|A) = P(A \cap B)/P(A). \quad (2.2)$$

A dedução dessa fórmula é feita através da utilização do conceito de frequência relativa. Fazendo uso das equações 2.1 e 2.2, tem-se que:

$$f_{B|A} = \frac{n_{A \cap B}/n}{n_A/n} = \frac{n_{A \cap B}}{n_A}$$

De acordo com [17], a razão $\frac{n_{A \cap B}}{n_A}$ representa a frequência relativa de B nos resultados onde A tenha ocorrido. Dessa forma, após infinitos experimentos, observa-se que essa razão define a probabilidade de B , condicionada a que A tenha ocorrido.

Uma vez que o cálculo de probabilidades condicionais foi detalhado, o conceito eventos independentes [17,19,24] será definido. Sejam os eventos A e B independentes. A ocorrência do evento A não influencia em qualquer aspecto a probabilidade do evento B . Tomando como exemplo o caso de uma moeda não viciada arremessada e definindo A como o evento de o primeiro arremesso apresentar cara e B o evento de o segundo arremesso apresentar coroa. Intuitivamente, observa-se que os eventos A e B são inteiramente não relacionados.

De acordo com [18], a independência de eventos traz consigo algumas simplificações matemáticas, tais como: $P(B|A) = P(B)$ e $P(A|B) = P(A)$. Através da equação 2.2, deduz-se que:

$$P(A \cap B) = P(A) \times P(B). \quad (2.3)$$

Dessa forma, dois eventos A e B são independentes, se e somente se, $P(A \cap B) = P(A) \times P(B)$.

2.3 Variáveis Aleatórias

Elementos unitários de um espaço amostral, ou seja, eventos de um dado experimento, geralmente não possuem representação numérica. Por exemplo, os eventos considerados em um arremesso de uma moeda são: “cara” e “coroa”. Para um tratamento matemático mais preciso, é conveniente um mapeamento de eventos em valores numéricos.

No caso da moeda, esse mapeamento, denominado de variável aleatória [17,19], poderia atribuir zero para “cara” e um para “coroa”, como pode ser observado na Figura 2.1. Uma variável aleatória é uma função $X(s)$ que associa todo elemento $s \in S$ a um número real, onde s é um evento e S o espaço amostral.

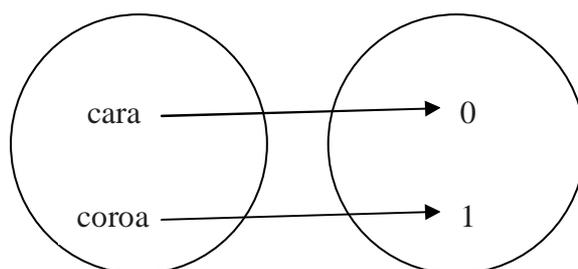


Figura 2.1 - Diagrama de Venn de uma variável Aleatória

Segundo [24], existem dois tipos de variáveis aleatórias: discretas e contínuas. As variáveis aleatórias discretas possuem um contradomínio finito ou infinito enumerável. Cada valor deste contradomínio é associado a uma probabilidade. Seja uma variável aleatória discreta X , com um contradomínio formado por um conjunto de valores enumerável (x_1, x_2, \dots) , a representação da probabilidade de cada número x_i é dada por $p(x_i) = P(X = x_i)$, satisfazendo as propriedades definidas em [17]:

- $p(x_i) \geq 0$, para todo i ,
- $\sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) = 1$.

A função p define a probabilidade de uma determinada variável aleatória discreta em um dado ponto, definindo a distribuição de probabilidade (conceito abordado com mais detalhes no decorrer do capítulo) da variável aleatória considerada.

As variáveis aleatórias contínuas possuem um contradomínio não-enumerável. De acordo com [17], considerando que X é uma variável aleatória contínua, existe uma função f , denominada função densidade de probabilidade (*fdp*) de X , que obedece às seguintes condições:

- $f(x) \geq 0$ para todo x ,
- $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$,
- para todo x_1 e x_2 , tal que $x_1 < x_2$, $P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx$.

Outra função bastante utilizada em probabilidade é a função de distribuição acumulada [18]. Esta função recebe como parâmetro um valor x , contido no contradomínio de uma variável aleatória X , e computa somatório das probabilidades referentes a valores menores ou iguais a x . Dessa forma, seja uma função de distribuição acumulada de X , $F(x)$, têm-se que $F(x) = P(X \leq x)$.

No caso contínuo, as funções de densidade e densidade acumulada se relacionam, segundo [17], através das equações 2.4 e 2.5.

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx \quad (2.4)$$

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x) \quad (2.5)$$

2.4 Distribuições de Probabilidade

A distribuição de probabilidade de uma variável aleatória está diretamente ligada a uma função que relaciona elementos do espaço amostral da variável em questão com suas respectivas probabilidades. Como já mencionado nesse capítulo, no caso contínuo, esta função é denominada *fdp*. No decorrer desse capítulo, serão apresentados exemplos de distribuições de probabilidade (discretas e contínuas) relevantes e usadas neste trabalho.

2.4.1 Distribuição Binomial

A distribuição binomial [19] modela o cálculo da probabilidade de um mesmo evento ocorrer k vezes em n experimentos independentes. Um exemplo clássico do uso desse tipo de distribuição é o cálculo da probabilidade de k moedas arremessadas darem como resultado “cara” em n tentativas. A variável aleatória discreta considerada neste exemplo é dada por:

X = número de moedas arremessadas tendo como resultado “cara”.

Neste caso, X é considerada uma variável aleatória binomial baseada em n repetições. Segundo [19], a distribuição desta variável é dada por:

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}. \quad (2.6)$$

Onde $k = 0, 1, \dots, n$ e p , considerando o exemplo, é a probabilidade de uma moeda arremessada ser “cara”, no caso, 0.5. Os valores das probabilidades de X para $k = 0, 1, \dots, 8$ podem ser visualizados na Figura 2.2.

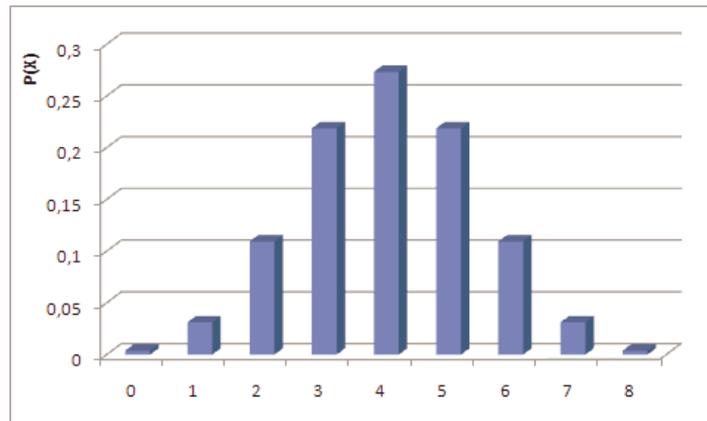


Figura 2.2 – Distribuição binomial de probabilidade

2.4.2 Distribuição Normal

A distribuição normal (ou *Gaussiana*) é considerada uma das mais importantes. Segundo [17], a distribuição normal é uma excelente aproximação para uma grande classe de distribuições, que têm enorme importância na prática, tais como a de *Poisson* [19] e a de *Pascal* [24].

A *fdp* de uma distribuição normal [19] é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}. \quad (2.7)$$

Onde $-\infty < x < +\infty$, $-\infty < \mu < +\infty$ e $\sigma > 0$. O gráfico de uma distribuição normal genérica é apresentado na Figura 2.3.

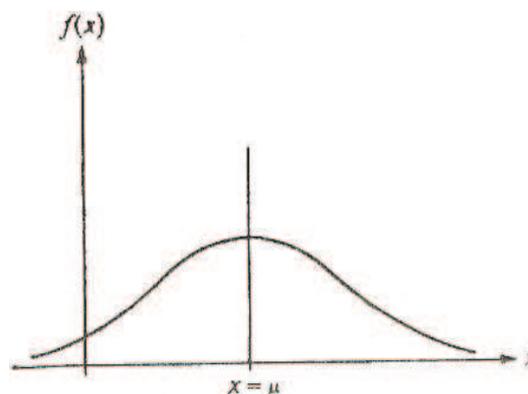


Figura 2.3 – Distribuição de probabilidade normal⁴

⁴ Fonte: Probabilidade. Aplicações à Estatística

O parâmetro μ é a esperança [19] da variável aleatória contínua, modelada por uma distribuição normal. De acordo com [19], a esperança, ou valor esperado, de uma variável aleatória é uma média com pesos de todos os elementos de uma variável, onde tais pesos são definidos pelas suas respectivas probabilidades.

Já o parâmetro σ elevado ao quadrado, considerando a distribuição normal, define a variância. Segundo [18], a variância mede o grau de dispersão de elementos de uma amostra em relação à média da mesma amostra. A importância da variância é mais facilmente percebida através de um exemplo. Suponha que a vida útil de uma lâmpada seja de 1000 horas. Isso deveria significar que a maioria das lâmpadas deveria durar um período próximo de 1000 horas, entre 900 horas e 1.100 horas, por exemplo. Contudo, uma análise da variância pode indicar dois tipos de lâmpadas, uma de boa qualidade que dura 1.300 horas e outra de péssima qualidade com duração de 700 horas. O cálculo da variância indicaria essa disparidade.

2.4.3 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial [17,24] é largamente utilizada na modelagem de atributos de dependabilidade de sistemas. As características que justificam o seu uso são encontradas no próximo capítulo. A *fdp* de uma distribuição exponencial é dada por:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha x} . \quad (2.8)$$

Onde $x > 0$. Para valores menores que zero, o valor da *fdp* é zero. O gráfico de uma distribuição exponencial é ilustrado na Figura 2.4.

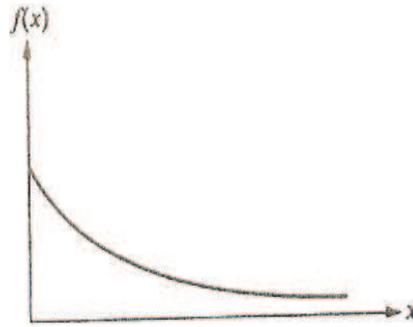


Figura 2.4 – Distribuição exponencial de probabilidade⁵

De acordo com [17], o valor de α é a constante de decaimento da distribuição. A esperança desta distribuição é dada por $\frac{1}{\alpha}$. A variância também é definida em termos de α , sendo expressa por $\frac{1}{\alpha^2}$.

⁵ Fonte: Meyer, Probabilidade. Aplicações à Estatística

3. Dependabilidade

Os conceitos de dependabilidade foram inicialmente definidos com a publicação do livro *Dependability: Basic Concepts and Terminology* (1992). De acordo com [8], pode-se definir a dependabilidade de um sistema como a habilidade para evitar defeitos dos serviços que são mais frequentes e mais críticos para os usuários.

Os sistemas analisados sob métricas de dependabilidade são denominados dependáveis. [8] afirma que sistemas dependáveis são aqueles nos quais a confiança pode ser justificadamente depositada nos serviços por eles liberados. Segundo [12], dependabilidade é a propriedade de um sistema dependável que quantifica a confiança em seus serviços oferecidos de acordo com os seguintes atributos: confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade, segurança e sobrevivência.

Tomando como exemplo sistemas computacionais, [12] afirma que dependabilidade é a habilidade do sistema realizar um serviço de qualidade, que é mensurada de acordo com cada atributo, para um usuário. Os usuários, por sua vez, são outros sistemas (físicos ou humanos) que interagem com a interface do serviço. A falha de um sistema ocorre devido a um evento que desvia o serviço de seu comportamento esperado correto. Já o tempo entre a falha do serviço e a volta do funcionamento do mesmo é denominado tempo de restauração.

Este trabalho foca em três atributos de dependabilidade: confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. Dando seguimento a este capítulo, serão definidos os conceitos e os parâmetros relacionados com cada um dos atributos mencionados.

3.1 Confiabilidade

A confiabilidade de um sistema é um fator que está se tornando cada vez mais decisivo para que um produto seja bem aceito por seus consumidores. [15] afirma que confiabilidade é a probabilidade condicional de um sistema permanecer operacional dado um intervalo de tempo $[0, t]$, considerando que ele estava operacional em $t=0$.

De acordo com [6], três aspectos devem ser levados em conta quando a confiabilidade de um sistema ou componente é analisada. Primeiro, uma definição não ambígua das possíveis falhas do sistema deve ser feita. Em segundo lugar, a unidade de tempo deve ser identificada. Esta pode ser dada em horas, dias ou ciclos de operação do sistema. Para um sistema automotivo, por exemplo, um ciclo de operação poderia ser a ativação da ignição do motor. Por último, [6] recomenda que o sistema deva ser observado em condições de funcionamento naturais, sujeito a condições físicas reais. A observação do sistema em condições manipuladas pode gerar dados de confiabilidade viciados.

Dando seguimento a este capítulo, parâmetros de confiabilidade serão definidos matematicamente e, logo após, algumas distribuições de probabilidades de falhas comumente utilizadas serão descritas.

3.1.1 Definições Matemáticas de Confiabilidade

No decorrer deste trabalho, será comum o uso da variável aleatória contínua T , que define o tempo para falha de um sistema. A definição matemática do atributo de confiabilidade, proposta por [6], é dada por uma função (de confiabilidade) expressa da seguinte forma:

$$R(t) = P(T \geq t). \quad (3.1)$$

Nesta função, a confiabilidade é mensurada no intervalo $[0, t]$, dado em horas, por exemplo. No caso, a probabilidade $P(T \geq t)$ refere-se à chance de um sistema, decorrido o intervalo de tempo $[0, t]$, não apresentar nenhuma falha. O autor [6] também afirma que $R(0) = 1$ e $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$, ou seja, para um intervalo de tempo nulo, o sistema não apresentará falha. Já considerando um intervalo de tempo muito grande é nula a chance de um sistema não falhar.

Outra função de grande importância no estudo de confiabilidade é a função $F(t)$ [15], que nada mais é do que o complemento de $R(t)$, ou seja, $F(t) = 1 - R(t) = P(T < t)$. Dessa forma, $F(t)$ é a probabilidade de um sistema falhar, decorrido um intervalo de tempo $[0, t]$.

As probabilidades definidas $R(t)$ e $F(t)$ levam em conta a ocorrência ou não de falhas em um intervalo de tempo de funcionamento do sistema. A

probabilidade de um sistema falhar pela primeira vez em determinado instante de tempo é definida por $f(t)$ [23], que por sua vez é a *fdp* da distribuição de falhas. Segundo [4], a função $F(t)$ é a função de distribuição acumulativa de $f(t)$ e, de acordo com [23], observa-se que:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (3.2)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3.3)$$

Um parâmetro bastante importante do estudo de confiabilidade é o tempo médio para falha, mais conhecido na literatura como *mean time to failure* (MTTF). Dado que um sistema entra em funcionamento, [11] afirma que este parâmetro estima qual é o tempo médio de funcionamento de um sistema quando reparos não são permitidos. Segundo [6], o MTTF é a esperança da *fdp* $f(t)$ e é definido por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt.$$

Após algumas deduções matemáticas que fogem do escopo deste trabalho, pode-se afirmar que o MTTF é expresso pela seguinte equação proposta por [23]:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt. \quad (3.4)$$

Ainda considerando o atributo de confiabilidade de um sistema, a função de taxa de falhas [23] (*hazard function*), $\lambda(t)$, é de grande utilidade na descrição temporal da ocorrência de falhas. Segundo [6], $\lambda(t)$ é conhecida como a função de taxa instantânea de falhas. [23] menciona que taxas da falhas podem ser caracterizadas como crescentes, decrescentes e constantes. A definição matemática de $\lambda(t)$, proposta por [23], é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (3.5)$$

3.1.2 Distribuição de Falhas Exponencial

A distribuição exponencial de falhas, de acordo com [17], implica que a *fdp* $f(t)$ é dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (3.6)$$

Nesse contexto, o valor de $F(t)$, seguindo a equação 3.3, é representado por:

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Já $R(t)$, por ser o complemento de $F(t)$, é expressa como: $R(t) = e^{-\lambda t}$. A Figura 3.1 mostra os gráficos de $F(t)$ e $R(t)$ considerando distribuição de falhas exponencial.

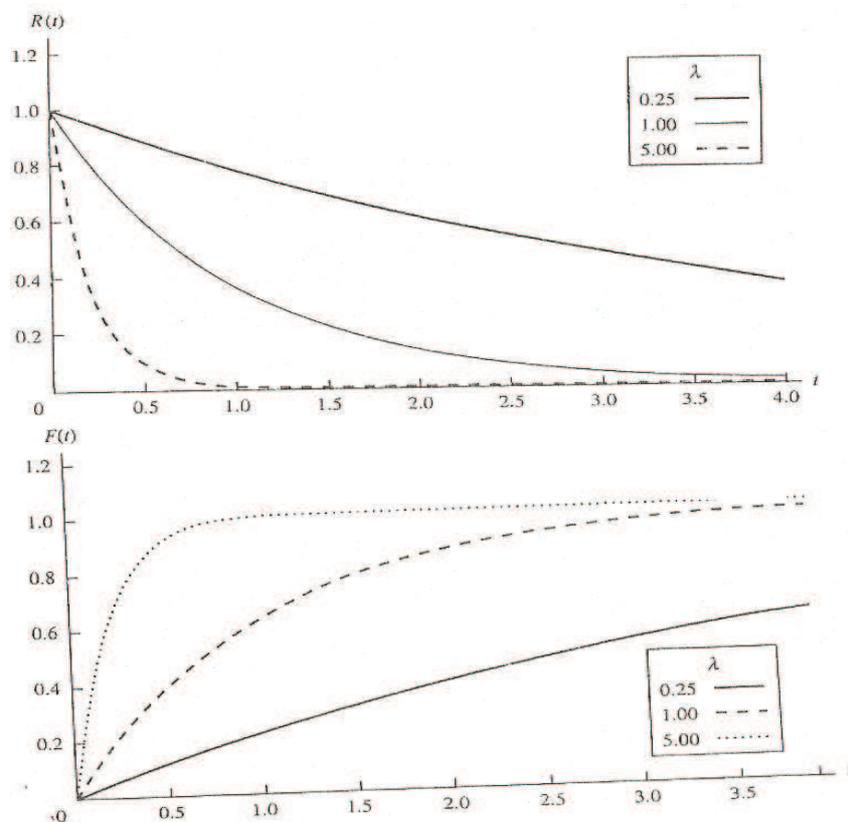


Figura 3.1 – Gráficos de $R(t)$ e $F(t)$ para distribuição exponencial⁶

⁶ Fonte: Ebeling(1997, p.43)

O MTTF, por sua vez, utilizando a equação 3.4, é deduzido da seguinte forma:

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

A utilização de uma distribuição de falhas exponencial resulta em $\lambda(t)$ constante. [17] afirma que a taxa de falhas constante significa que, depois que a peça estiver em uso, sua probabilidade de falhar não se altera. Dessa forma, não existe efeito de “desgaste” quando o modelo exponencial é empregado na modelagem.

Por exemplo, suponha que dois sistemas idênticos sejam analisados. O primeiro já está em operação por 1000 horas e o segundo foi posto para funcionar recentemente. Caso a confiabilidade de ambos os sistemas seja modelada por uma distribuição exponencial, a análise para ambos os sistemas será idêntica, uma vez que não existe efeito de “desgaste”. Segundo [6], quando efeitos ambientais externos, de caráter aleatório, são causas primárias para a falha de um sistema, o mesmo pode ser naturalmente modelado com uma taxa de falhas constante.

De acordo com [6], sistemas modelados com a taxa de falhas constante são denominados sem memória. De acordo com [13], um sistema é denominado instantâneo (sem memória), caso as suas saídas em um instante de tempo t dependam somente de entradas geradas no mesmo instante t .

A dedução de $\lambda(t)$, neste caso, é feita fazendo uso da equação 3.5 e 3.6, da seguinte forma:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda.$$

3.1.3 Distribuição de Falhas Weibull

A distribuição de falhas Weibull [6] é usada para modelar tanto taxas de falhas crescentes quanto decrescentes. A fórmula geral de $\lambda(t)$ para uma distribuição Weibull, proposta por [17], é dada por:

$$\lambda(t) = (\alpha\beta)t^{\beta-1}, \quad (3.7)$$

onde $\beta > 0$, $\alpha > 0$, $t \geq 0$.

Os parâmetros β e α ajustam a função $\lambda(t)$. [17] lembra que, atribuindo-se o valor 1 a β , a distribuição exponencial torna-se um caso particular da distribuição de Weibull. A utilização de $\beta > 1$ faz com que a distribuição tenha uma taxa de falhas crescente. Já o valor de β inserido no intervalo $[0,1]$ torna $\lambda(t)$ decrescente. A Figura 3.2 mostra o gráfico de $\lambda(t)$ com variações de β mencionadas.

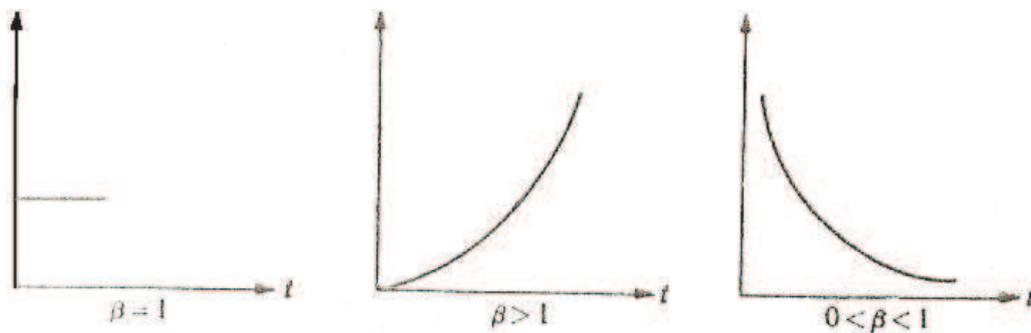


Figura 3.2 – Gráficos de *Hazard functions* para diferentes valores de β ⁷

Realizando deduções matemáticas encontradas em [17], as funções $f(t)$ e $R(t)$ são expressas por:

$$f(t) = (\alpha\beta)t^{\beta-1}e^{-\alpha t^\beta}$$

$$R(t) = e^{-\alpha t^\beta}.$$

A Figura 3.3 ilustra a função $f(t)$ para $\alpha = 1$ e $\beta = 1,2,3$.

⁷ Fonte: Probabilidade. Aplicações à Estatística

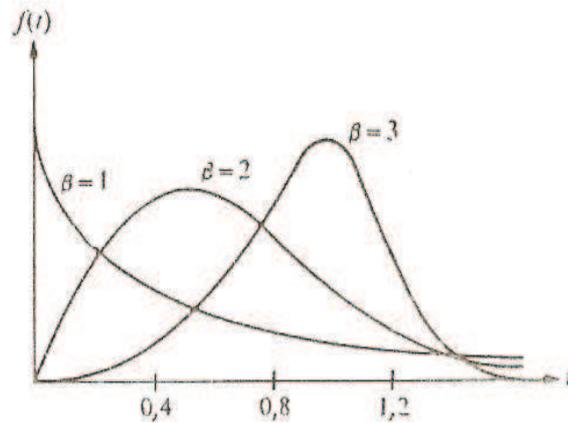


Figura 3.3 – Gráficos de distribuições Weibull para diferentes valores de β

Como era de se esperar, $\beta = 1$ faz com que a *fdp* torna-se uma exponencial. Para $\beta = 3$, observa-se uma função quase simétrica, muito similar a uma distribuição normal.

3.1.4 Distribuição de Falhas Normal

A distribuição de falhas normal utiliza a *fdp* definida pela equação 2.7. De acordo com [6], a distribuição de falhas normal é freqüentemente empregada na modelagem de fadiga de sistema. [17] menciona que a distribuição normal é um modelo apropriado para componentes nos quais as causas primárias de falhas sejam originadas por algum efeito de desgaste. Como já mencionado, o parâmetro μ representa o valor esperado de uma distribuição normal e, nesse caso, é o tempo mais provável para que a primeira falha do sistema ocorra. Segundo [17], mudanças no parâmetro σ modificam a forma da distribuição normal, como se observa na Figura 3.4.

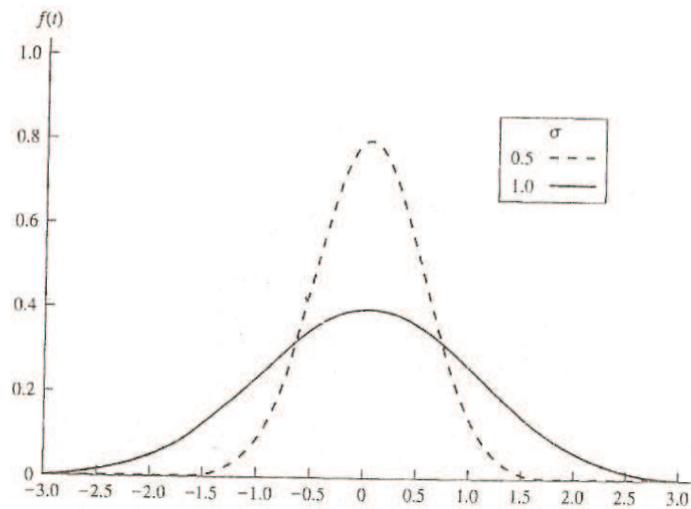


Figura 3.4 - Gráficos de distribuições Normal para diferentes valores de σ ⁸

Para $\sigma = 0,5$, existe uma concentração da chance de o primeiro erro ocorrer perto do valor esperado da distribuição, que na Figura 3.4 é zero. A Figura 3.5 exibe o gráfico de $F(t)$, considerando a distribuição apresentada na Figura 3.4.

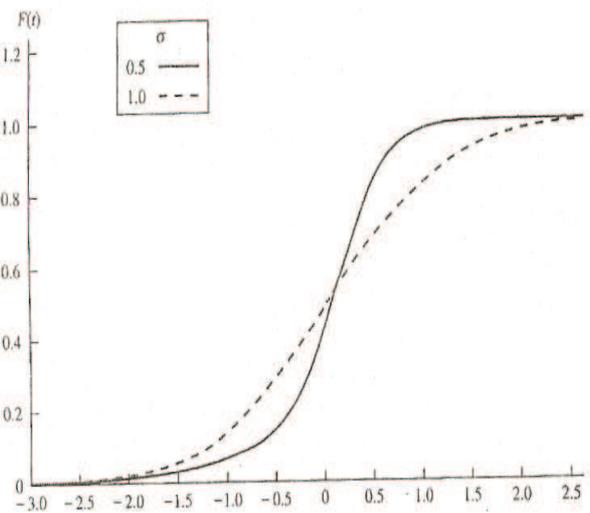


Figura 3.5 – Gráficos de $F(t)$ para distribuição Normal⁹

O gráfico da Figura 3.5 cresce bruscamente próximo ao ponto zero, que por sua vez é o valor de μ , quando $\sigma = 0,5$. O gráfico $F(t)$ apresenta esta característica porque para valores perto de μ , como já mencionado, é maior a probabilidade da primeira falha do sistema.

⁸ Fonte: Ebeling(1997, p.68)

⁹ Fonte: Ebeling(1997, p.70)

3.2 Manutenibilidade

A manutenibilidade modela situações onde o sistema falha e o retorno para o estado de correto funcionamento necessita de qualquer tipo de manutenção. De acordo com [6], manutenibilidade é definida como a probabilidade do reparo de um sistema ser finalizado com sucesso em um dado intervalo de tempo.

Segundo [20], existem dois tipos de manutenção: corretivas e proativas. A manutenção corretiva é realizada em resposta a falhas do sistema, que levam o mesmo a um estado não operacional. Já a manutenção proativa, de acordo com [6], pode ser tanto preventiva quanto preditiva. Uma manutenção preventiva é feita periodicamente e envolve, por exemplo, lubrificação, ajustes finos e alinhamento de peças. Para [20] as manutenções preventivas ocorrem, principalmente, devido a um calendário previamente ajustado e ao uso de componente considerado. Manutenção preditiva é realizada com ajuda de ferramentas de análise que indicam quando um determinado componente funcional de um sistema está perto de falhar. Em geral, a manutenção proativa resulta em redução de custos.

O tempo de reparo de um sistema, no qual o mesmo não apresenta seus serviços disponíveis, é denominado *downtime* [6]. De acordo com [12], manutenibilidade é a medida de performance do produto que envolve também a contabilização de custos de manutenção. A manutenção de um sistema, se não for planejada adequadamente, pode elevar consideravelmente os custos relativos à operação de um sistema. No decorrer desse capítulo, a descrição matemática de parâmetros de manutenibilidade e as distribuições de tempo de reparo serão introduzidas.

3.2.1 Definições Matemáticas de Manutenibilidade

Seja a variável aleatória contínua, T , definida como o tempo de reparo de um sistema que tenha previamente apresentado falha. A definição matemática de manutenibilidade, $H(t)$, proposta por [6], é representada da seguinte forma:

$$H(t) = P(T \geq t).$$

Considerando um intervalo de tempo $[0,1]$ em uma unidade de tempo arbitrária, para o autor [6], $H(t)$ é a probabilidade de um reparo genérico ser executado, isto é, a recuperação do sistema após uma falha.

De acordo com [6], a função $H(t)$ é uma função distribuição acumulada cuja *fdp* é denominada $h(t)$. A função $h(t)$ é definida como a função de densidade de probabilidade para a variável aleatória contínua T . Sendo assim, esta função define a probabilidade de um reparo ser finalizado em um determinado instante de tempo. Como ilustrado na equação 2.4, $h(t)$ e $H(t)$ se relacionam da seguinte forma:

$$H(t) = \int_0^t h(t)dt. \quad (3.8)$$

No estudo de manutenibilidade, um parâmetro importante é o tempo médio de reparo, conhecido na literatura como *mean time to repair* (MTTR). Para [6], *MTTR* é a esperança da variável aleatória T , definindo o instante de tempo mais provável para que um reparo seja concluído. A definição matemática de *MTTR*, proposta por [6], é dada por:

$$MTTR = \int_0^{\infty} th(t)dt = \int_0^{\infty} (1 - H(t))dt. \quad (3.9)$$

A taxa de reparos [6] por unidade de tempo, $r(t)$, também é um parâmetro de manutenibilidade. A quantidade de reparos que podem ser efetuados num sistema em uma unidade de tempo é essencial para previsão de gastos e do tempo de indisponibilidade de um sistema. Para [6], a função $r(t)$ é expressa por:

$$r(t) = \frac{h(t)}{1-H(t)}. \quad (3.10)$$

3.2.2 Distribuição Exponencial de Tempo de Reparo

A utilização de distribuição exponencial para o tempo de reparo, fazendo uso da equação 2.8, implica que a fdp $h(t)$ seja definida como:

$$h(t) = re^{-rt}. \quad (3.11)$$

A manutenibilidade para uma distribuição exponencial é expressa, tendo como referência as equações 3.8 e 3.11, da seguinte forma:

$$H(t) = 1 - e^{-rt}. \quad (3.12)$$

O MTTR, empregando as Equações 3.9 e 3.12, é deduzido da seguinte maneira:

$$MTTR = \int_0^{\infty} (1 - (1 - e^{-rt}))dt = \int_0^{\infty} e^{-rt} dt = \frac{1}{r}.$$

Já a taxa de reparo, por sua vez, fazendo uso da equação 3.10, é dada por:

$$r(t) = \frac{re^{-rt}}{e^{-rt}} = r.$$

3.3 Disponibilidade

Segundo [6], o atributo disponibilidade de dependabilidade usa diretamente conceitos de confiabilidade e manutenibilidade. Para [23], disponibilidade é a probabilidade de um sistema ou componente realizar uma função requerida em um certo instante de tempo ou um período de tempo especificado, denominado algumas vezes de missão.

Disponibilidade pode ser facilmente mensurada através de dados históricos de um sistema, como propõe [6]. Para isso, é necessário que um sistema seja observado por um certo intervalo de tempo, contabilizando-se a porcentagem do tempo em que o sistema ofereceu seus serviços com

corretude. Utilizando essa abordagem, [15] define matematicamente disponibilidade da seguinte forma:

$$Disponibilidade = \frac{uptime}{uptime+downtime}. \quad (3.13)$$

Considere um sistema observado por um intervalo de tempo de 10 horas. Supondo o uso da abordagem proposta por [6], caso o sistema em questão opere corretamente, por exemplo, por 5 horas (*uptime*) e nas outras 5 horas esteja em manutenção, a disponibilidade do sistema é, claramente, de 50%. O objetivo deste trabalho, contudo, é fazer previsões de disponibilidade baseadas em métricas pré-definidas de confiabilidade e manutenibilidade, não levando em conta o histórico do sistema. O estudo da previsão da disponibilidade é detalhado no decorrer deste capítulo.

3.3.1 Definições Matemáticas de Disponibilidade

Um gráfico típico de disponibilidade, $A(t)$, é exibido na Figura 3.6.

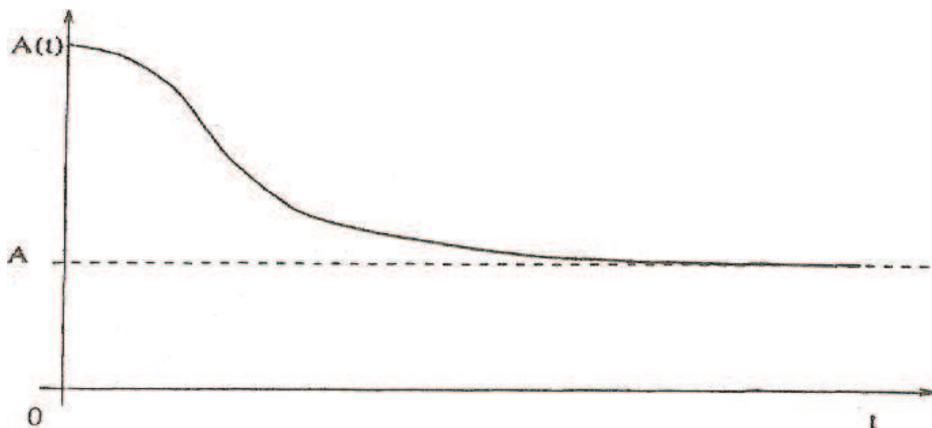


Figura 3.6 – Gráfico de disponibilidade instantânea¹⁰

A Figura 3.6 mostra a probabilidade de um sistema estar disponível em um instante de tempo t . De acordo com [6], quando $t \rightarrow \infty$, o valor de $A(t)$ é igual a A , definido como *steady-state*. [6] também afirma que o sistema sempre estará disponível em $t = 0$, ou seja, $A(0) = 1$.

¹⁰ Fonte: Sahner(1996, p.30)

Segundo [11], um sistema reparável apresenta uma taxa de reparos que o conduz novamente a um estado operacional. Para [11], tais sistemas apresentam dois estados distintos: operacional (estado 0) e em reparo (estado 1). Como se observa na Figura 3.7, a mudança de estado é regida unicamente por $\lambda(t)$ e $r(t)$, sendo um processo estocástico de Markov contínuo. De acordo com [11], um processo Markoviano contínuo no tempo é uma modelagem que apresenta estados e probabilidades de transição entre os mesmos.

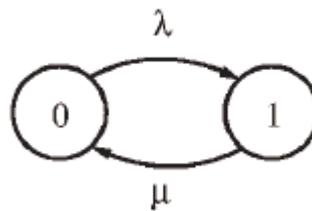


Figura 3.7 – Estados de um sistema reparável

Considera-se $P_0(t)$ e $P_1(t)$ as probabilidades do referido sistema estar, em um determinado instante de tempo t , nos estados 0 e 1, respectivamente. Para [11], a probabilidade $P_0(t)$ é a disponibilidade do sistema.

Segundo [11], a análise estocástica desse diagrama de estados resulta nas seguintes equações:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = r(t)P_1(t) - \lambda(t)P_0(t) \quad (3.14)$$

$$P_0(t) + P_1(t) = 1. \quad (3.15)$$

A equação 3.14 define a variação instantânea de $P_0(t)$, considerando as taxas de falha e reparo. Já a equação 3.15 define que o espaço amostral referido na análise é bi-particionado entre as probabilidades $P_0(t)$ e $P_1(t)$. Considerando uma distribuição exponencial de falhas e para o tempo de reparo, resultando em $\lambda(t) = \lambda$ e $r(t) = r$, [11] afirma que a disponibilidade, $A(t)$, é a solução da equação diferencial de primeira ordem [15] representada pelo sistema formado pelas equações 3.14 e 3.15, considerando a condição de contorno de $P_0(0) = 1$. Dessa forma, [23] define matematicamente $A(t)$ como:

$$A(t) = P_0(t) = \frac{r}{\lambda+r} + \frac{\lambda}{\lambda+r} e^{-(\lambda+r)t}. \quad (3.16)$$

A equação 3.16 atesta que, definindo as taxas de reparo e de falha de um sistema, é possível prever sua disponibilidade em um determinado instante de tempo.

Para [3], equações diferenciais de primeira ordem estão sob a seguinte forma:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y),$$

onde f é uma função de duas variáveis. Qualquer função $y = \phi(t)$ que satisfaça a essa equação para todo t em algum intervalo é dita uma solução da equação diferencial proposta.

Um exemplo de gráfico de disponibilidade, utilizando distribuição exponencial para falhas e tempo de reparo, é dado pela Figura 3.8.

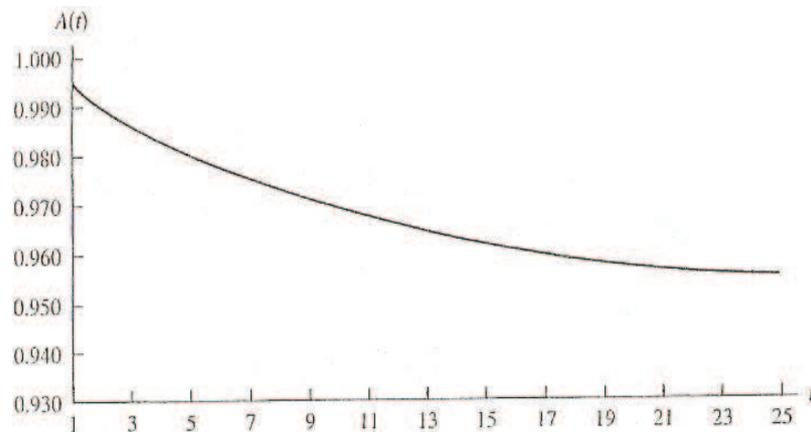


Figura 3.8 – Gráfico de disponibilidade considerando distribuição exponencial¹¹

Tendo como base a equação 3.16, pode-se definir precisamente o valor do *steady-state* de um sistema, que é dado por:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{r}{\lambda + r} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

¹¹ Fonte: Ebeling(1997, p.258)

Segundo [23], no estudo de disponibilidade, as métricas de manutenibilidade podem não ser necessárias, quando o objeto de estudo é um sistema não reparável. Tais sistemas não voltam a ser operacionais após qualquer falha. Para [23], nesse caso particular, a análise de disponibilidade é idêntica à de confiabilidade.

4. Modelagem de Dependabilidade para Sistemas

De acordo com [13], sistemas podem ser convenientemente representados como uma “caixa preta” que possui dois conjuntos de terminais acessíveis, os quais compõem as entradas e saídas do sistema.

De acordo com [11], sistemas podem ou não ser formados por uma combinação de blocos (componentes) menores. Este trabalho, até o presente momento, considerou o estudo de atributos de dependabilidade para sistemas formados por um único componente, ou seja, sistemas onde seu único bloco define inteiramente as métricas de dependabilidade do sistema inteiro.

Por outro lado, este capítulo contempla a análise de sistemas compostos por diversos componentes. Tal tipo de sistema, ilustrado na Figura 4.1, é composto por partes interconectadas, onde cada uma possui métricas de dependabilidade distintas ou não. A definição de [8] para sistemas é mais conveniente no contexto desse capítulo. Segundo [8], um sistema é um conjunto de componentes que atuam juntos para realizar uma determinada função, a qual não seria possível realizar com quaisquer partes individuais isoladas.

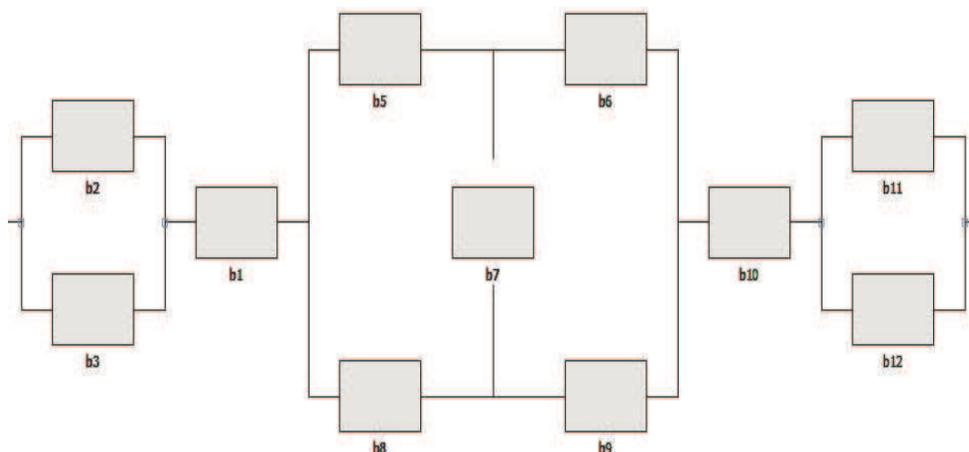


Figura 4.1 – Sistema composto por diversos componentes

Muitos modelos de dependabilidade de sistema utilizam conceitos de Redes Petri. Segundo [14], Redes de Petri foram apresentadas na tese de doutoramento Kommunikation mit Automaten do Dr. Carl Adam Petri, em 1962. Desde então, esta técnica foi largamente utilizada nas mais diversas aplicações, em especial na modelagem matemática de sistemas para análise de sua corretude. [23] define os seguintes elementos presentes em uma Rede Petri: lugar (Figura 4.2(a)), transição (Figura 4.2(b)), arco (Figura 4.2(c)) e token (Figura 4.2(d)). Um exemplo de rede Petri é ilustrado na Figura 4.3.



Figura 4.2 – Elementos gráficos de uma Petri Net (a) lugar, (b) transição, (c) arco, (d) token

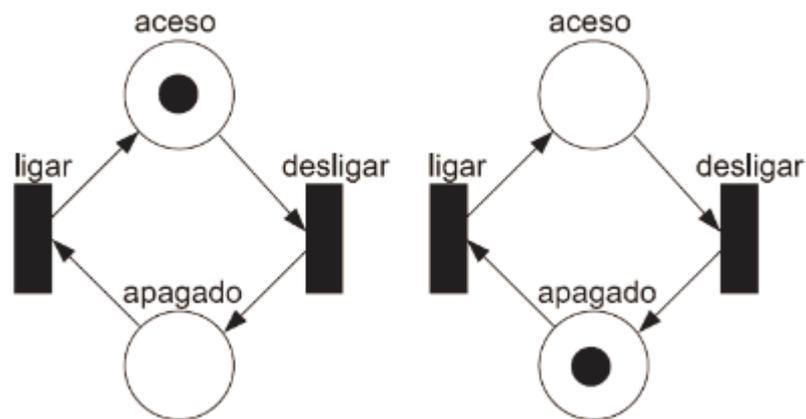


Figura 4.3 – Exemplo de modelo Petri Net

Para [14], Redes Petri são formadas por dois tipos de componentes: um ativo denominado de transição e outro passivo denominado lugar. Os lugares correspondem às variáveis de estado e as transições, às ações.

A Figura 4.3 apresenta uma Rede de Petri que modela o funcionamento de uma lâmpada. Os lugares do modelo, aceso e apagado, representam os possíveis estados da lâmpada. Já as transições, ligar e desligar, representam as possíveis ações que podem ser efetuadas na lâmpada. O token indica o

estado atual da lâmpada, que inicialmente está acesa. Uma vez que o token está no lugar aceso, a transição desligar é habilitada transferindo o token para o lugar apagado, ou seja, indicando que a lâmpada está apagada.

Baseado em conceitos de Redes Petri, o modelo *Stochastic Petri Net* [23] (SPN) é, segundo a literatura, empregado na análise de dependabilidade de sistemas. De acordo com [9], modelos SPN foram propostos por pesquisadores do campo de modelagem estocástica aplicada com o objetivo de desenvolver uma ferramenta que permita a integração da descrição formal, prova de correção e avaliação de desempenho. A Figura 4.4 mostra um exemplo de modelo SPN.

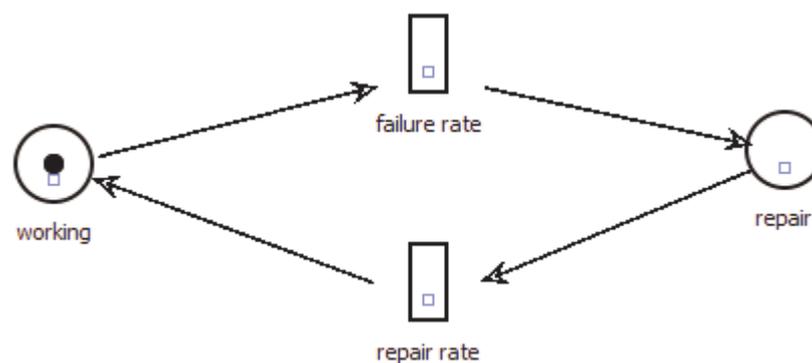


Figura 4.4 – Exemplo de modelo SPN

O exemplo apresentado pela Figura 4.4 apresenta os lugares “working” e “repair” e as transições “failure rate” e “repair rate”. De acordo com [8], a principal diferença entre um modelo SPN e uma Rede de Petri usual são as transições. Diferentemente de uma Rede de Petri, na qual uma transição habilitada é imediatamente executada, as transições em um modelo SPN não seguem essa regra. Em modelos SPN, as transições habilitadas são executadas com um retardo distribuído exponencialmente.

Outro modelo bastante empregado é o *Fault Tree* [23]. De acordo com [11], o *Fault Tree* relaciona diversas possíveis causas de falhas de um sistema fazendo uso da lógica booleana para inferir, através de um processo dedutivo, parâmetros de dependabilidade. Um exemplo de modelo de *Fault Tree* pode ser visualizado na Figura 4.5.

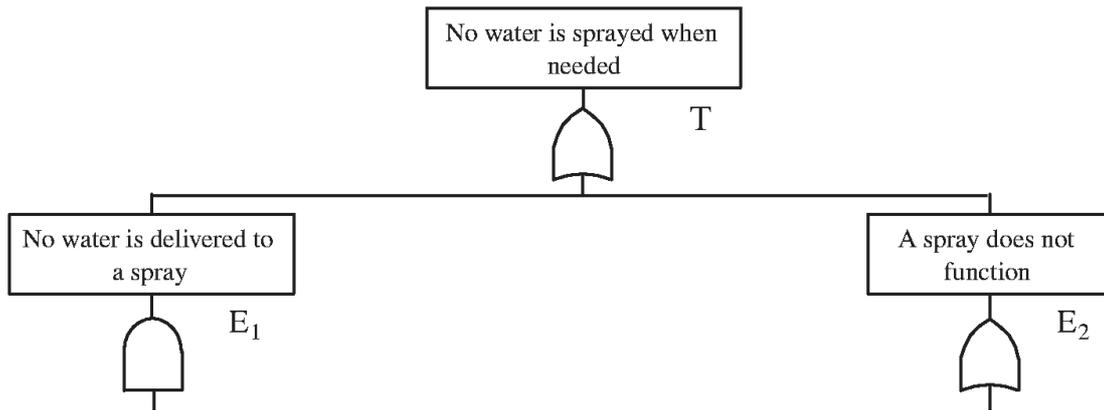


Figura 4.5 – Exemplo de uma *Fault Tree*¹²

Na Figura 4.5, por exemplo, a falha “*No water is sprayed when needed*” ocorre ou na presença da falha “*No water is delivered to a spray*” ou na presença da falha “*A spray does not function*”.

No decorrer desse capítulo, o foco será direcionado para uma análise detalhada sobre o modelo de representação de sistemas RBD. Este modelo é utilizado na ferramenta de análise de dependabilidade descrita neste trabalho.

4.1 Diagrama de Blocos de Confiabilidade

De acordo com [11], o modelo RBD define o relacionamento lógico entre componentes de um sistema. Os relacionamentos típicos são: série, paralelo, *k-out-of-n*, ponte. Segundo [11], um componente de um modelo RBD pode ser representado, graficamente, por um retângulo ou um círculo. Já o nome de cada componente é normalmente colocado junto de sua representação gráfica. A Figura 4.6 ilustra um exemplo de um modelo RBD.

¹² Fonte: Zuo(2003, p.60)

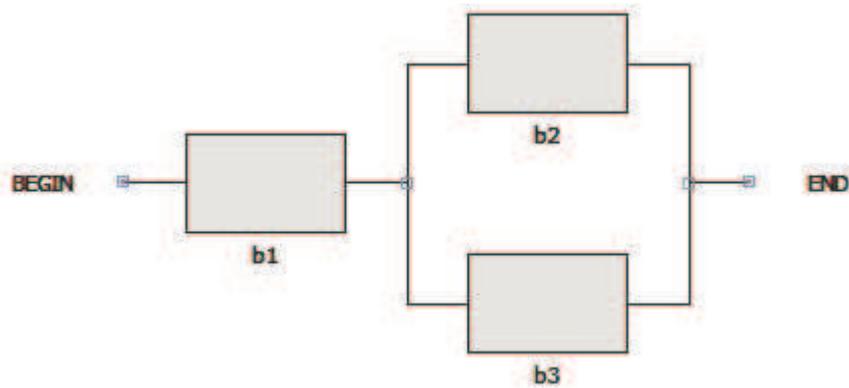


Figura 4.6 – Modelo RBD

Cada componente em um modelo RBD possui métricas de dependabilidade próprias. Segundo [23], componentes do mesmo tipo que aparecem mais de uma vez em um modelo RBD são considerados cópias com parâmetros independentes e idênticos.

Em um dado instante de tempo, considerando a disponibilidade, cada componente de um modelo RBD pode estar ativo (disponível) ou não. Para o melhor entendimento semântico da modelagem RBD, [11] afirma que o mesmo pode ser considerado como um fluxo de sinais, direcionado da esquerda para a direita. Um componente ativo deixa o sinal passar e um inativo, ao contrário, impede sua passagem. Dessa forma, um sistema, representado por um modelo RBD, está ativo caso exista no mínimo um caminho para a passagem da informação do início até o fim do modelo. Vale salientar que todos os eventos probabilísticos relativos a métricas de dependabilidade são independentes.

Tomando como exemplo a Figura 4.6, a indisponibilidade do bloco “b1” implica que todo o sistema também se torna indisponível. Uma vez que o “b1” esteja ativo, o sistema complexo fica indisponível somente se tanto “b2” quanto “b3” não estiverem ativos.

Em algumas situações, a ligação lógica entre componentes de um sistema não representa a real ligação física entre os mesmos. Um exemplo dessa situação é a modelagem da ligação física de dois resistores em paralelo. A ligação lógica mais adequada, considerando a modelagem RBD, seria ligá-los em série. Essa modelagem é correta, pois, mesmo ligados fisicamente em paralelo, a falha de um dos resistores compromete o correto funcionamento de todo o sistema.

Dando seguimento a este capítulo, a confiabilidade será calculada considerando as configurações de um modelo RBD: série, paralelo, *k-out-of-n* e ponte.

4.1.1 Configuração Série

A configuração série é uma das mais comuns em modelos RBD. Neste arranjo, os blocos estão conectados logicamente um seguido ao outro. A Figura 4.7 ilustra esta configuração.

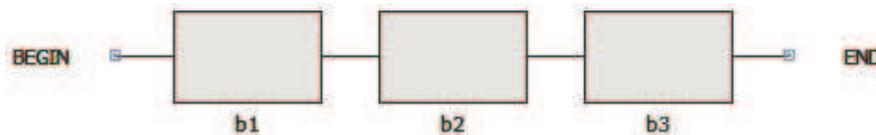


Figura 4.7 – Configuração em série

Segundo [6], para que um sistema formado por blocos em série falhe, é necessário que apenas um de seus componentes individuais falhe. Considerando que E_i é o evento do i -ésimo bloco em série não apresentar falhas durante um intervalo de tempo t , obtém-se a seguinte equação:

$$P(E_i) = R_i(t).$$

Onde $P(E_i)$ é a probabilidade associada ao evento E_i e $R_i(t)$ é a sua confiabilidade. Segundo [6], a confiabilidade do sistema inteiro formado por n blocos em série, $R_s(t)$, é dada por:

$$R_s(t) = P(\bigcap_{i=1}^n E_i). \quad (4.1)$$

Assumindo que os eventos E_i são independentes, a equação 4.1 é simplificada, fazendo uso da equação 2.3, da seguinte forma:

$$R_s(t) = P(E_1) \times P(E_2) \times \dots \times P(E_n) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_n(t). \quad (4.2)$$

A forma generalizada da equação 4.2 é dada por:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t).$$

4.1.2 Configuração Paralela

Para [11], a configuração paralela, também denominada de redundância, define que um sistema falhará apenas no caso em que todos os seus componentes também falharem. A Figura 4.8 ilustra esta configuração.

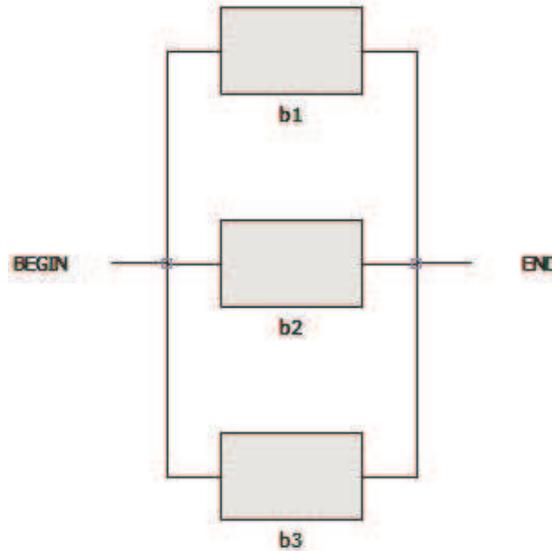


Figura 4.8 – Configuração em paralelo

A necessidade que todos os blocos apresentem falha para que o sistema formado por n blocos em paralelos falhe é representada pela equação proposta por [6]:

$$F_p(t) = F_1(t) \times F_2(t) \times \dots \times F_n(t). \quad (4.2)$$

Onde $F_p(t)$ é a probabilidade de um arranjo redundante falhar durante um intervalo de tempo t . A equação 4.2 é reescrita da seguinte forma:

$$F_p(t) = (1 - R_1(t)) \times (1 - R_2(t)) \times \dots \times (1 - R_n(t)) = \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (4.3)$$

A confiabilidade de um bloco redundante, $R_p(t)$, é dada por:

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (4.4)$$

4.1.3 Configuração *k-out-of-n*

A configuração *k-out-of-n* é uma generalização do arranjo paralelo. Basicamente, esta configuração possui n blocos em paralelo e para que um sistema formado por este arranjo não falhe é necessário que pelo menos k dos n blocos estejam em funcionamento. Atribuindo 1 ao valor de k , o arranjo *k-out-of-n* é similar a um arranjo paralelo.

De acordo com [6], para a definição matemática da confiabilidade deste arranjo lógico, é necessária a definição da variável aleatória discreta X , que define o número de blocos que não apresenta falhas, em um determinado intervalo de tempo. Os eventos probabilísticos de dependabilidade são independentes para cada bloco da configuração *k-out-of-n* e todos os n blocos possuem a mesma taxa de falha. Dessa forma, a variável X possui distribuição binomial representada da seguinte forma:

$$P(X = x) = \binom{n}{x} R(t)^x (1 - R(t))^{n-x}.$$

Onde x é um valor especificado para a variável aleatória X , variando no intervalo $[0, n]$.

Uma vez definida a variável X , a confiabilidade do arranjo *k-out-of-n* é dada pela equação definida por [11]:

$$R_{k-out-of-n}(t) = P(X = k) + P(X = k + 1) + \dots + P(X = n), \text{ ou}$$

$$R_{k-out-of-n}(t) = \sum_{i=k}^n P(X = i).$$

4.1.4 Configuração Ponte

O arranjo ponte é representado pela Figura 4.9 a seguir.

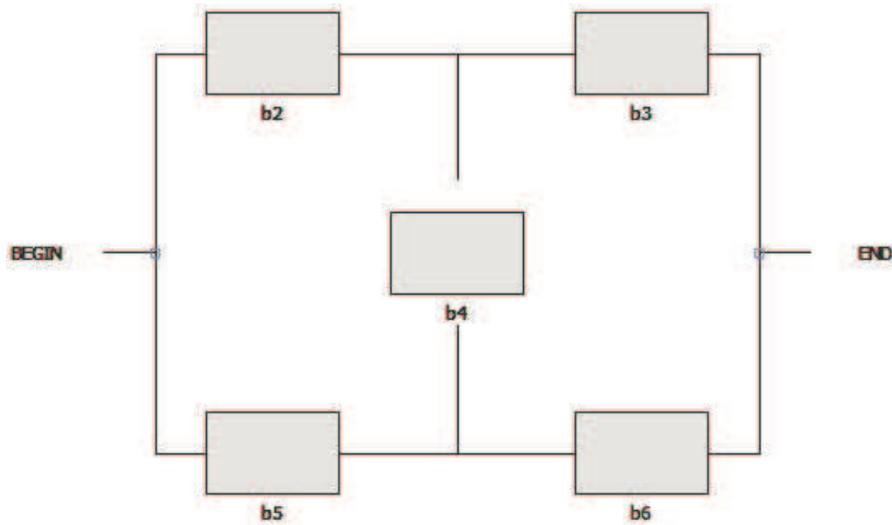


Figura 4.9 – Configuração em ponte

O cálculo de confiabilidade dessa configuração é baseado em conceitos de probabilidade condicional [17]. Basicamente, os cálculos se apóiam na análise dos casos onde o bloco central (“b4”) apresenta falha (não deixando o fluxo de informação seguir), ou está funcionando normalmente. As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os modelos RBD resultantes quando o bloco “b4” opera ou não.

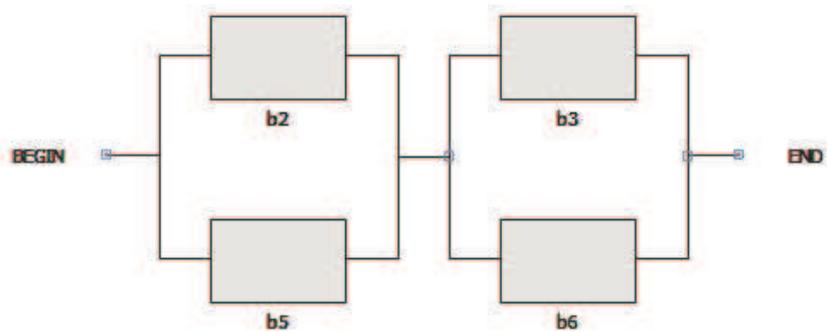


Figura 4.10 – Configuração quando “b4” opera

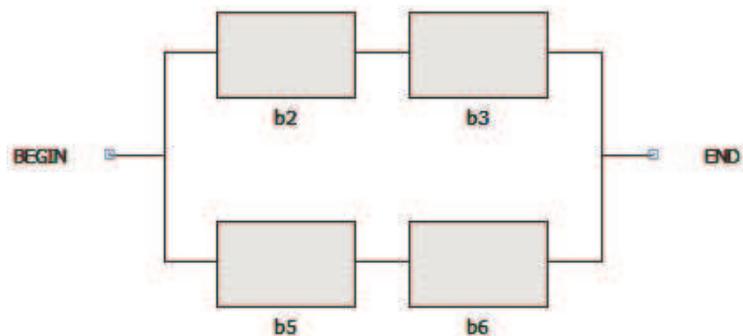


Figura 4.11 – Configuração quando “b4” falha

Considerando C o evento relacionado com o funcionamento ou não do bloco central (“b4”). A confiabilidade desta configuração é representada pela seguinte equação:

$$R_{ponte}(t) = P((R_{ponte}(t) \cap C) \cup (R_{ponte}(t) \cap \bar{C})). \quad (4.5)$$

Uma vez que os eventos $R_{ponte}(t) \cap C$ e $R_{ponte}(t) \cap \bar{C}$ são independentes, a equação 4.5 é simplificada da seguinte forma:

$$R_{ponte}(t) = P(R_{ponte}(t) \cap C) + P(R_{ponte}(t) \cap \bar{C}). \quad (4.6)$$

Considere os eventos E_1 e E_2 que representam o correto funcionamento dessa configuração quando o bloco central falha ou não, respectivamente. Percebe-se que tais eventos estão associados a probabilidades condicionais. Utilizando a equação 2.2, obtêm-se os seguintes relacionamentos:

$$P(E_1) = \frac{P(R_{ponte}(t) \cap C)}{P(C)} \quad (4.7)$$

$$P(E_2) = \frac{P(R_{ponte}(t) \cap \bar{C})}{P(\bar{C})} \quad (4.8)$$

Com a utilização das equações 4.6, 4.7 e 4.8, a confiabilidade desse arranjo é dada por:

$$R_{ponte}(t) = P(E_1)P(C) + P(E_2)P(\bar{C})$$

Os valores de $P(E_1)$ e $P(E_2)$ são calculados tomando como base as Figuras 4.10 e 4.11 e podem ser facilmente obtidos por meio dos resultados obtidos nas demonstrações das configurações série e paralelo.

5. Metodologia

O desenvolvimento da ferramenta descrita neste trabalho foi previamente planejado. Primeiramente, um estudo aprofundado dos conceitos de dependabilidade, focando nos atributos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, foi realizado. O livro *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, citado como referência bibliográfica deste trabalho, foi a principal fonte para o entendimento de tais conceitos. A correta compreensão desses conceitos foi fundamental para que os cálculos realizados pela ferramenta fossem precisos.

Com o embasamento matemático apropriado, o desenvolvimento seguiu com o estabelecimento dos requisitos da ferramenta, definidos com maiores detalhes no capítulo 6. Após a definição das funcionalidades, a arquitetura da ferramenta foi proposta, fazendo uso de diagramas de classe UML [7]. Isso proporcionou que a codificação fosse modular e os reparos no software implicassem custos menores.

A codificação da ferramenta foi feita utilizando a linguagem de programação *Java* [26] e fez uso do ambiente de desenvolvimento *NetBeans* [26]. Todos os componentes de interface gráfica foram construídos tomando como base a biblioteca *JGraph* [10]. A utilização dessa biblioteca facilitou bastante a criação da ligação lógica dos blocos presentes no modelo RBD.

Os testes da ferramenta foram direcionados para o cálculo dos parâmetros de dependabilidade. Para isso, diversos modelos RBD foram criados utilizando a ferramenta desenvolvida e a ferramenta *Sharpe* [5]. Os parâmetros de dependabilidade para tais modelos foram gerados e comparados. O cronograma de desenvolvimento da ferramenta, estabelecido no início dos trabalhos, está presente na Tabela 5.1 e foi cumprido integralmente.

Tabela 5.1 – Cronograma de desenvolvimento da ferramenta

Atividade	Mês															
	Agosto				Setembro				Outubro				Novembro			
Levantamento Bibliográfico	█	█	█	█												
Definição dos Requisitos				█	█											
Definição de Arquitetura						█										
Implementação							█	█	█	█	█	█	█			
Testes											█	█	█	█	█	

6. Ferramenta

A ferramenta descrita neste trabalho é parte constituinte do projeto DESDAC, executado no Centro de Informática (UFPE), sob direção do professor Paulo Romero Martins Maciel. O projeto DESDAC visa desenvolver um ferramental integrado em um software para análise de parâmetros de dependabilidade de *Data Centers*. Segundo [16], a disponibilidade de *Data Centers* é crítica considerando o crescimento explosivo dos serviços fornecidos pela Internet.

Nesse contexto, a ferramenta, que, através de modelos RBD, realiza análise de blocos ligados logicamente, está inserida no projeto DESDAC. Além da modelagem RBD, este projeto fornece cálculo de métricas de dependabilidade através de simulações estocásticas com modelos SPN.

6.1 Funcionalidades

A ferramenta desenvolvida cumpriu os objetivos estabelecidos no início deste trabalho. A principal meta atingida refere-se ao cálculo preciso de métricas de dependabilidade. As métricas analisadas foram: confiabilidade, MTTF, MTTR e disponibilidade. A análise da precisão dos cálculos da ferramenta está presente no capítulo 7, que mostra os resultados da ferramenta modelando um problema real de dependabilidade. A interface gráfica projetada para facilitar a criação de relacionamentos lógicos entre os componentes de um modelo RBD proporcionou qualidade e usabilidade para a ferramenta. As conexões lógicas implementadas foram: série, paralelo, *k-out-of-n* e ponte.

Um novo modelo RBD criado pela ferramenta, por definição, possui um bloco ligado a dois nós, indicando seu início e fim, como ilustrado na Figura 6.1. A cor deste bloco é cinza, indicando que seus parâmetros iniciais de dependabilidade não foram editados. Os parâmetros de dependabilidade que podem ser configuráveis são: taxa de falha e taxa de reparo. Esses valores são constantes, uma vez que os cálculos baseiam-se em uma distribuição exponencial de probabilidades.

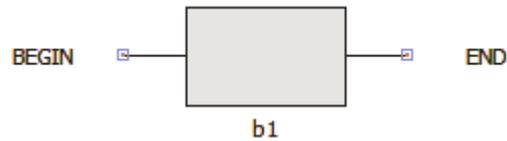


Figura 6.1 – Novo modelo RBD

Uma vez que um novo modelo é criado, ele pode ser expandido incrementalmente. A ferramenta possibilita a visualização de cada passo, permitindo que novos blocos sejam adicionados em série ou em paralelo a cada bloco já presente no modelo. A Figura 6.2 mostra as etapas incrementais da construção de um modelo RBD.

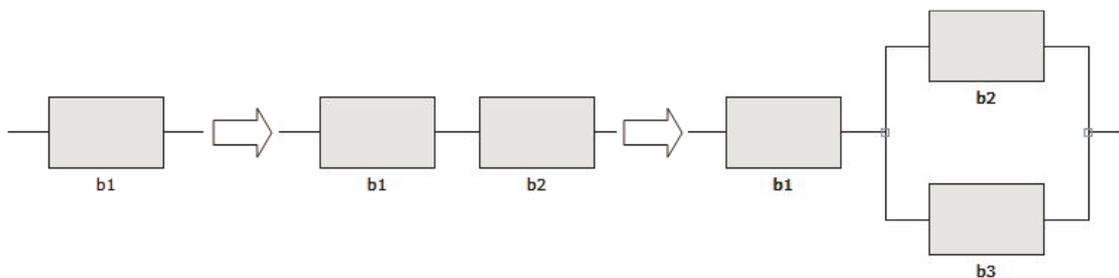


Figura 6.2 – Processo de construção de um modelo RBD na ferramenta

Com o modelo RBD construído, os parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade precisam ser editados para que o cálculo das métricas de dependabilidade do modelo possa ser realizado. No caso da ferramenta proposta neste trabalho, cada bloco com suas propriedades de dependabilidade editadas possui cor vermelha.

6.2 Arquitetura do Software

Sommerville [25] afirma que softwares podem sempre ser decompostos em sub-sistemas que fornecem um conjunto de serviços. O processo de identificação destes sub-sistemas e seus relacionamentos é denominado projeto de arquitetura. Para [25], a arquitetura do software é uma saída desse processo. Modelos UML são os mais utilizados na representação de tais arquiteturas.

A arquitetura do software da ferramenta, proposta neste trabalho, é representada por um diagrama de classes, visualizado na Figura 6.3. [7] define

diagrama de classes como um modelo UML que mostra a estrutura estática das classes de um sistema. As classes representam “elementos” que podem ser manipulados dentro de um sistema computacional. Classes podem estar relacionadas com outras de diversas formas: associação, dependência, generalização ou agregação.

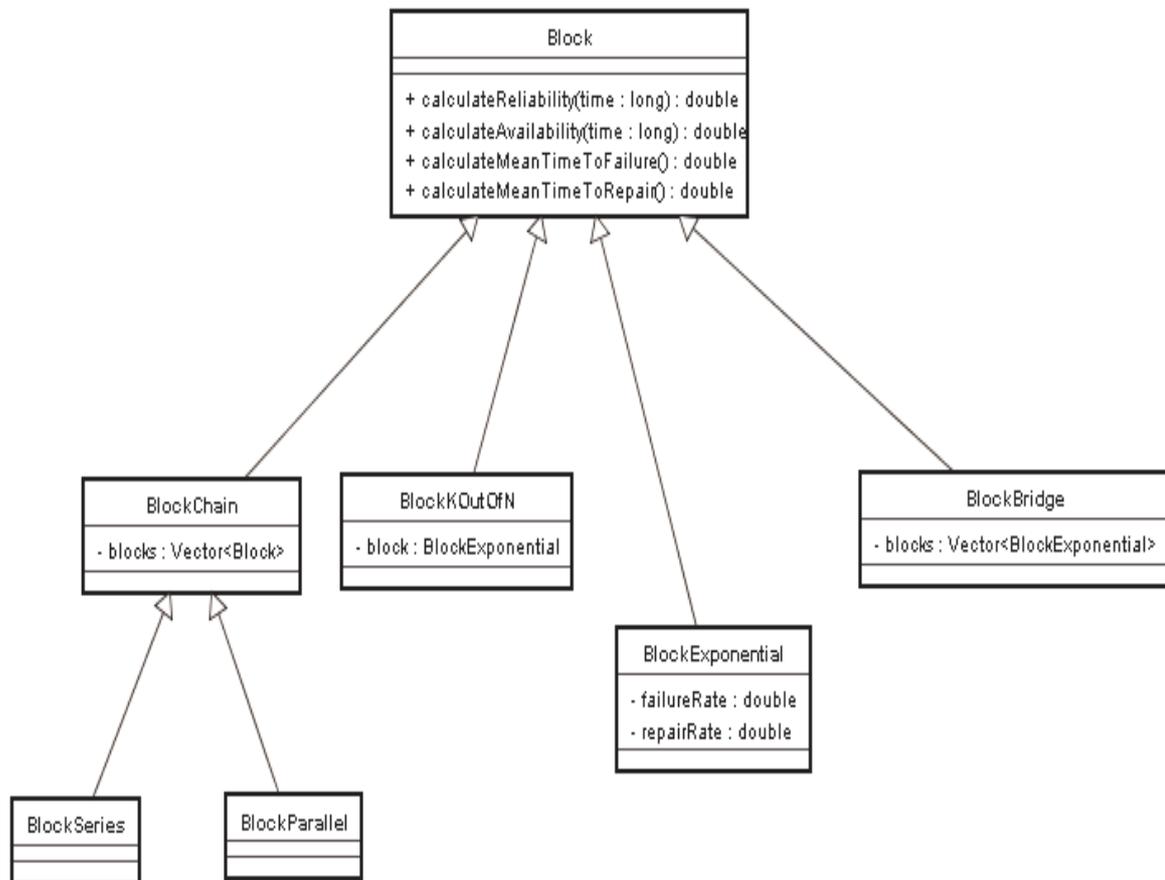


Figura 6.3 – Diagrama de classe da ferramenta

O relacionamento generalização, ou herança, é utilizado no diagrama ilustrado na Figura 6.3. [7] afirma que o relacionamento de generalização permite uma classificação hierárquica. Este relacionamento define dois tipos de classe: classe-base e sub-classe. A sub-classe é do mesmo tipo da classe-base e possui as mesmas características, exceto por algumas funcionalidades específicas. No caso da ferramenta, todas as classes estão “subordinadas” à classe *Block*, isto é, toda a classe é do mesmo tipo de *Block*, sendo assim

denominadas sub-classes. Já as classes *BlockSeries* e *BlockParallel* também são do tipo *BlockChain*.

O diagrama de classes se assemelha a uma árvore, onde suas folhas representam as configurações lógicas implementadas para modelos RBD. O modelo RBD representado na Figura 6.4 é internamente mapeado em uma classe *BlockSeries* que contém uma lista com 2 blocos: um *BlockExponential* e um *BlockParallel*. Este, por sua vez, é composto por uma lista com dois blocos do tipo *BlockExponential*. A Figura 6.5 ilustra melhor como o modelo RBD proposto é mapeado nas classes da ferramenta.

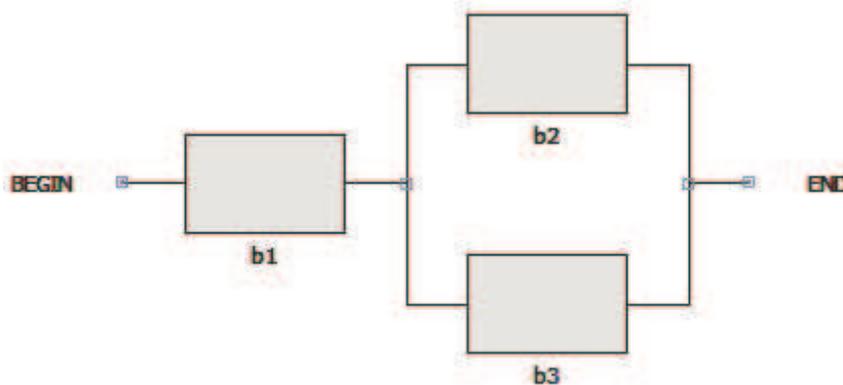


Figura 6.4 – Modelo RBD

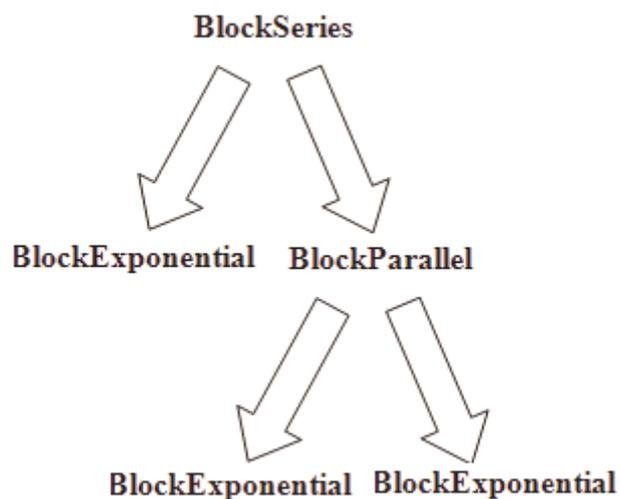


Figura 6.5 – Classes que representam o modelo da Figura 6.4

Todas as classes possuem suas próprias implementações das funções (definidas na classe *Block*) que calculam parâmetros de dependabilidade¹³. O cálculo da confiabilidade do modelo RBD representado pela Figura 6.4, por exemplo, é realizado multiplicando-se as confiabilidades do primeiro bloco (*BlockExponential*) e do segundo bloco (*BlockParallel*). Já a confiabilidade do *BlockParallel* é dada pela fórmula definida na equação 4.4.

¹³ As funções de cálculo de dependabilidade são: `calculateReliability`, `calculateMeanTimeToFailure`, `calculateMeanTimeToRepair`, `calculateAvailability`

7. Estudo de Caso

A precisão dos cálculos de dependabilidade da ferramenta precisa ser validada através de um estudo de caso. A metodologia empregada para a validação da ferramenta é definida por [15]. Segundo o autor, a metodologia é composta por três fases: Análise do Problema, Modelagem do Sistema e Avaliação do Sistema. Estas fases ocorrem de forma seqüencial.

A Análise do Problema visa descrever o problema, estabelecendo o escopo do mesmo. Nesta fase existe a preocupação de definir um sistema que implementa o problema identificado e seus sub-sistemas. Na fase de Modelagem do Sistema, um modelo de dependabilidade abstrato é escolhido. Após a seleção do modelo, os componentes do sistema são mapeados na representação abstrata.

Uma vez estabelecidos o problema e um modelo abstrato para a simulação de parâmetros dependabilidade, o sistema é avaliado. A avaliação compara os resultados obtidos através da simulação do modelo com os resultados reais inerentes ao problema descrito.

7.1 Análise do Problema

O problema identificado neste estudo de caso está relacionado com a alimentação energética de *Data Centers*. De acordo com [1], quando *Data Centers* estão inseridos em ambientes críticos, os sistemas de alimentação energética para tais situações devem ser altamente disponíveis. Os pontos de falha únicos na distribuição da energia desses sistemas devem ser minimizados tanto quanto possível, se não eliminados por completo.

A crescente preocupação de manter disponíveis os serviços oferecidos por *Data Centers*, que funcionam 24 horas por dia e 7 dias por semana, faz com que as métricas de dependabilidade sejam essenciais para o sucesso comercial de diversas corporações. Em especial, [2] cita empresas financeiras e companhias aéreas como principais usuárias de *Data Centers* para manter seus serviços ativos.

De acordo com [1], um típico sistema de alimentação de *Data Centers* é ilustrado na Figura 7.1. Basicamente, o sistema é formado por dois componentes: *No-break* e Unidade de distribuição de energia (PDU).

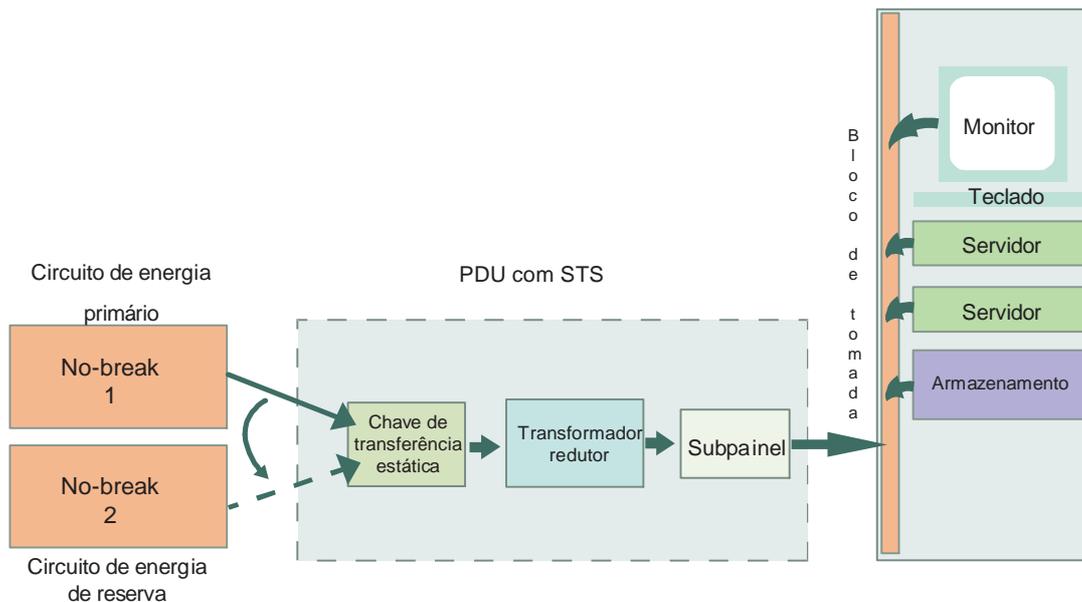


Figura 7.1 – Sistema de alimentação de um data center¹⁴

Este trabalho analisa a configuração de três arranjos diferentes de sistemas de alimentação. O primeiro deles é ilustrado na Figura 7.1, onde dois *No-breaks* garantem redundância para o fornecimento de energia em caso de falha do sistema elétrico. Ao inserir a redundância, é necessária a presença de uma chave de transferência estática (STS) para que a troca da fonte de energia seja efetuada. Uma configuração mais simples que não apresenta redundância de *No-breaks* é também analisada. Por último, uma configuração sem pontos de falha únicos é empregada, como ilustrada na Figura 7.2. O estudo de caso terá como foco único a análise de métricas de dependabilidade das configurações mencionadas para circuitos de alimentação de *Data Centers*.

¹⁴ Fonte: APS by Schneider Eletronic, (p.5)

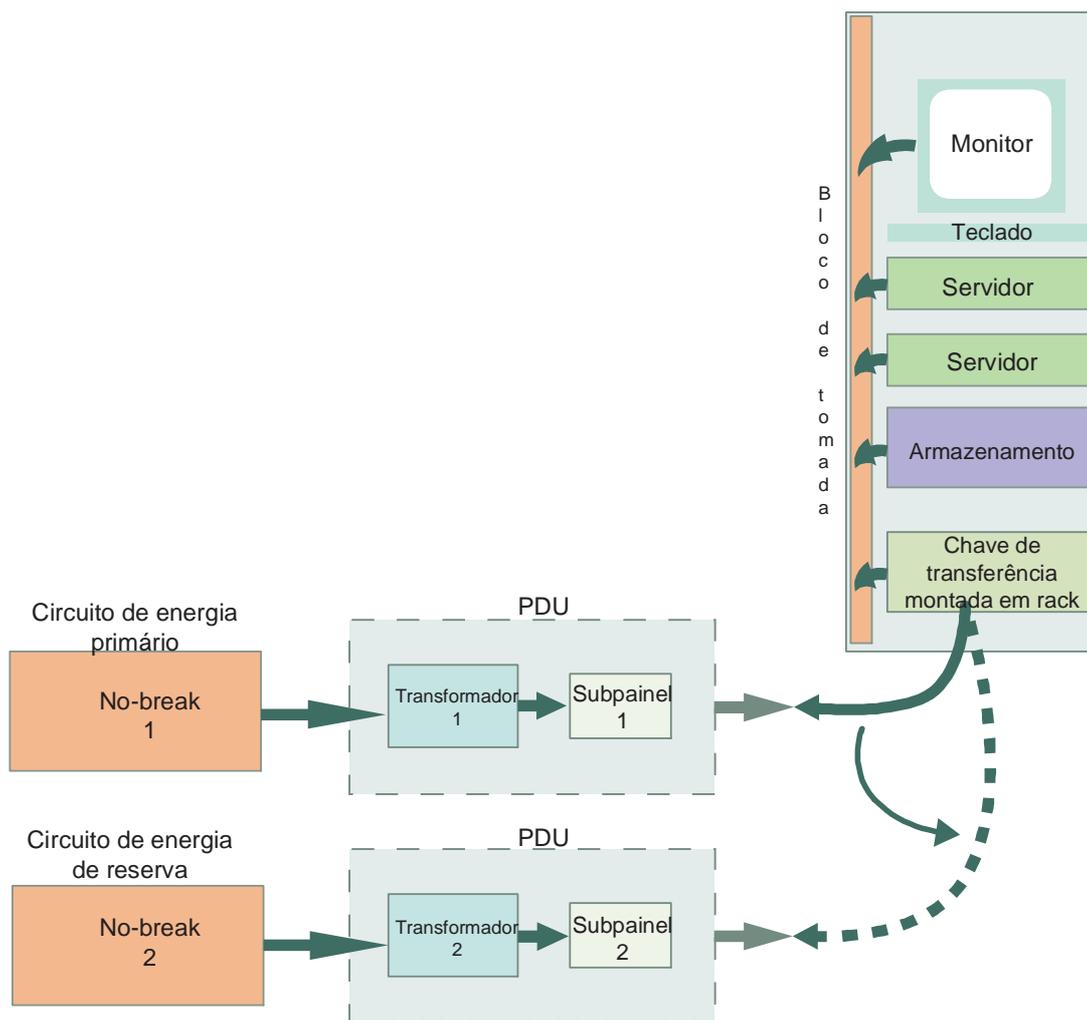


Figura 7.2 – Sistema de alimentação de Data Center sem ponto de falha único

7.2 Modelagem do Sistema

Uma vez que o objetivo deste estudo de caso é analisar a ferramenta desenvolvida, a modelagem empregada para o cálculo de parâmetros de dependabilidade foi o RBD. O modelo empregado adota distribuições de falha e do tempo de reparo exponenciais. Como mencionado, três casos são considerados.

Os componentes utilizados na modelagem dos três casos são os seguintes:

- *No-break* 675 kW/ 750 kVA
- Chave de transferência estática (STS)

- Transformador redutor
- Disjuntor
- 6 terminais
- 8 terminais

As taxas de falha e reparo dos componentes citados são encontradas no anexo A.

7.2.1 Caso 1

O Caso 1 não considera redundância de *No-breaks*. O modelo RBD, contendo as taxas de falha (λ) e taxas de reparo (μ) para cada bloco, que representa o Caso 1, é ilustrado pela Figura 7.3.

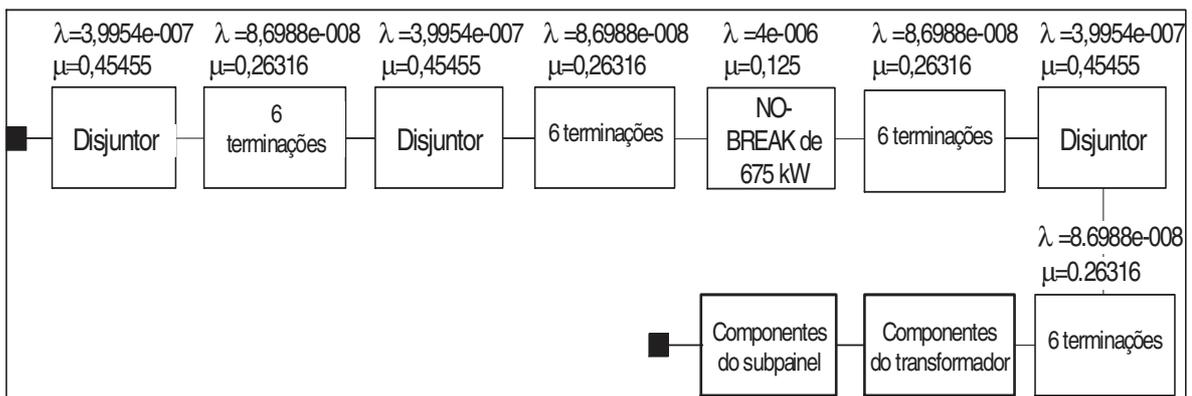


Figura 7.3 – Modelo RBD para Caso 1

Os componentes do transformador e do subpainel são formados pelos seguintes modelos RBDs, apresentados nas Figuras 7.4 e 7.5.

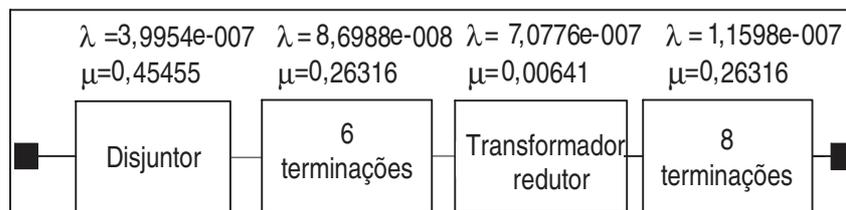


Figura 7.4 – Modelo RBD de componente transformador

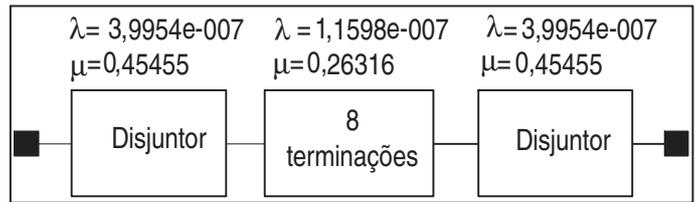


Figura 7.5 – Modelo RBD de componente subpainel

7.2.2 Caso 2

O Caso 2 apresenta redundância nos componentes de *No-break*, além da inserção de um módulo STS. O modelo RBD que representa o Caso 2 é apresentado na Figura 7.6.

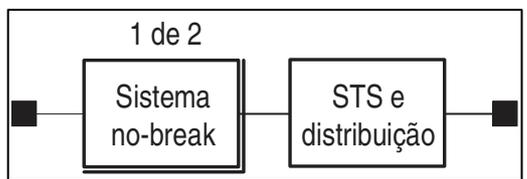


Figura 7.6 – Modelo RBD para Caso 2

A indicação “1 de 2” acima do componente Sistema *no-break* faz referência à redundância deste módulo. Os modelos RBDs de Sistema *no-break* e STS e distribuição estão presentes nas Figuras 7.7, 7.8 e 7.9.

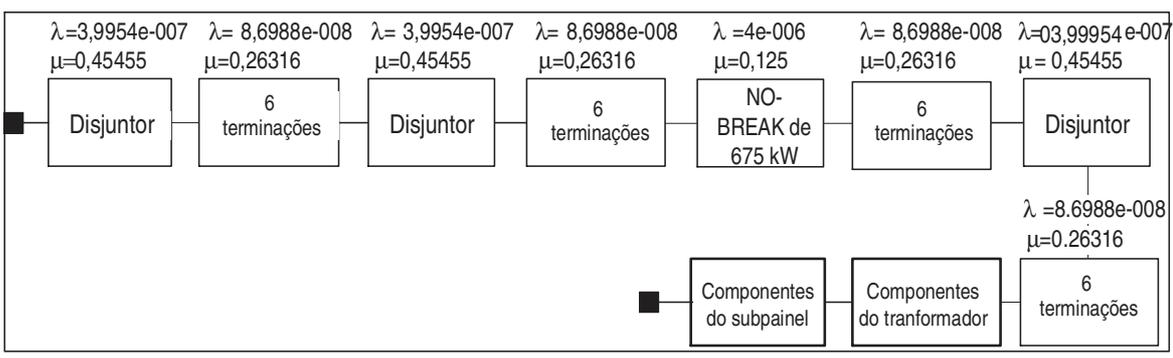


Figura 7.7 – Modelo RBD de Sistema *no-break*



Figura 7.8 – Modelo RBD de STS e distribuição

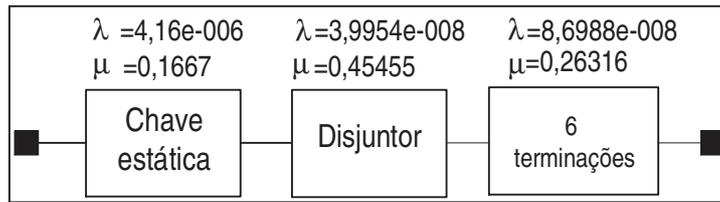


Figura 7.9 – Modelo RBD de Sistema STS

7.2.3 Caso 3

O Caso 3 apresenta uma configuração para o circuito de alimentação ideal. Esse arranjo apresenta, como o Caso 2, redundância do Sistema *No-break*. Entretanto, o Caso 3 fornece redundância no próprio sistema de fornecimento de energia elétrica, não sendo necessário o bloco para chaveamento de energia (STS), eliminando todos os pontos de falha únicos. O modelo RBD que representa o Caso 3 é ilustrado na Figura 7.10.

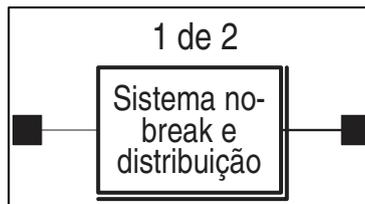


Figura 7.10 - Modelo RBD para Caso 3

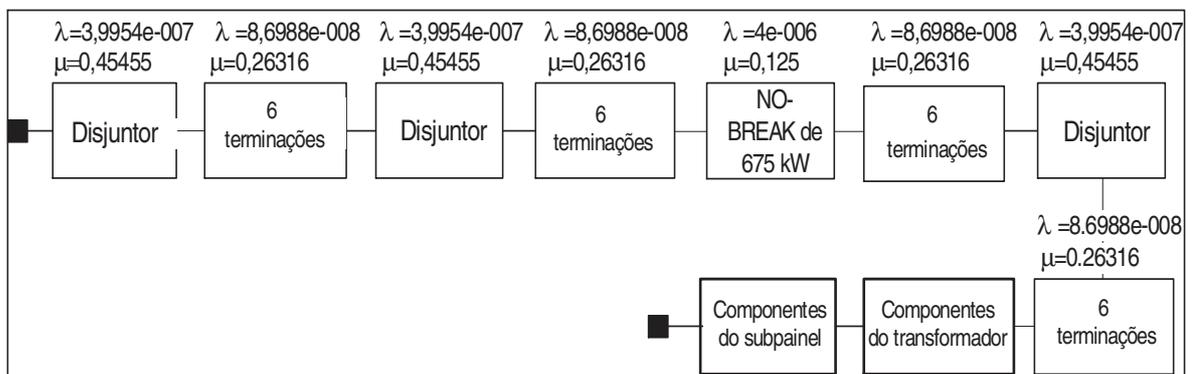


Figura 7.11 - Modelo RBD de Sistema *no-break* e distribuição

7.3 Avaliação do Sistema

A ferramenta é avaliada utilizando os modelos RBD que representam os Casos 1, 2 e 3. Dessa forma, os modelos são simulados por um período de um ano

(8760 horas) e os seguintes parâmetros de dependabilidade são calculados: disponibilidade, MTTR e MTTF.

A Figura 7.12 apresenta o gráfico da evolução da disponibilidade para os Casos 1, 2 e 3, de acordo com os resultados obtidos pela ferramenta. A Figura 7.13 apresenta a disponibilidade do Caso 3 com uma maior resolução.

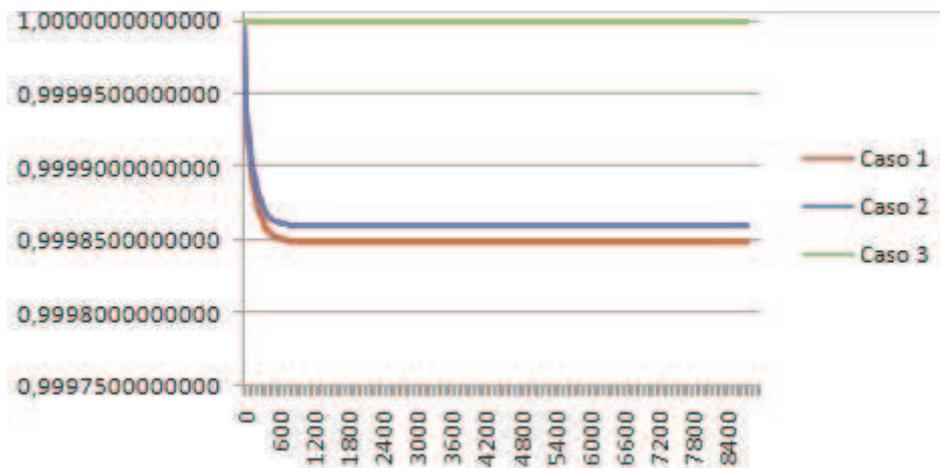


Figura 7.12 – Disponibilidade para Casos 1, 2 e 3

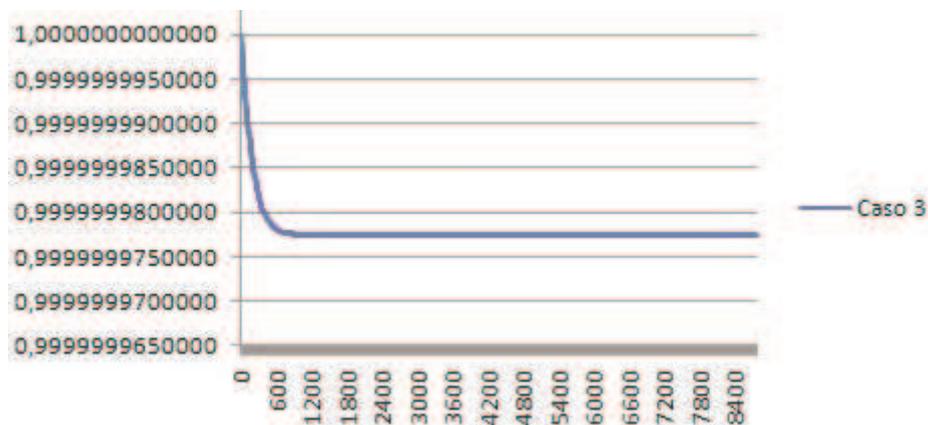


Figura 7.13 – Disponibilidade para Caso 3

A avaliação da precisão da ferramenta no cálculo de parâmetros de dependabilidade é realizada através da análise do erro percentual. A equação a seguir define o erro percentual empregado:

$$ERRO = \frac{|Valor_{Ferramenta} - Valor_{Real}|}{Valor_{Real}} * 100$$

A Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 apresentam os valores dos parâmetros de dependabilidade obtidos pela ferramenta e os valores reais relativos ao sistema analisado para os Casos 1, 2 e 3.

Tabela 7.1 – Análise de erro para Caso 1

	Ferramenta	Estudo de Caso	ERRO
Disponibilidade (1 ano)	99,98498%	99,98498%	0%
MTTF	128.669	128.665	0,0031%
MTTR	19,3	19,3	0%

Tabela 7.2 – Análise de erro para Caso 2

	Ferramenta	Estudo de Caso	ERRO
Disponibilidade (1 ano)	99,98596%	99,98596%	0%
MTTF	145.516	145.513	0,0021%
MTTR	20,4	20,4	0%

Tabela 7.3 – Análise de erro para Caso 3

	Ferramenta	Estudo de Caso	ERRO
Disponibilidade (1 ano)	99,9999977%	99,9999977%	0%
MTTF	856.517.452	856.898.029	0,04441%
MTTR	19,3	19,3	0%

8. Conclusão

O trabalho presente neste relatório visa, através de uma ferramenta de software, fornecer cálculos precisos de métricas de dependabilidade, em especial, confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. Adotando distribuição exponencial de probabilidades, tanto para confiabilidade quanto para manutenibilidade, a ferramenta permite a construção de modelos RBD para a simulação de sistemas compostos por blocos ligados logicamente.

A ferramenta mostrou-se bastante eficiente na modelagem RBD de um estudo de caso real. O sistema de alimentação de um *Data Center* foi analisado e os parâmetros de dependabilidade foram calculados, tendo como base o tempo de simulação de um ano. Os resultados obtidos pela ferramenta e os dados reais do estudo de caso foram comparados, resultando em um erro percentual inferior a 0,04441%, fazendo da ferramenta proposta uma alternativa confiável para análise de métricas de dependabilidade.

Referências

- [1] APS by Schneider Eletronic, Comparação da disponibilidade de diversas configurações energéticas redundantes de montagem em rack.
- [2] APS by Schneider Eletronic, Reliability Analysis of the APC InfraStruXure Power System.
- [3] Boyce, W. E, DiPrima, R. C., Equações Diferencias Elementares e Problemas de Valores de Contorno. 8ª edição. Teresópolis: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2006.
- [4] Department of Defense, United States of America, Department of Defense Handbook: Designing and Developing Maintainable Products and Systems, 1997.
- [5] Dr. Kichor S. Trivedi's home page: <http://people.ee.duke.edu/~kst/> (29 de outubro de 2009)
- [6] Ebeling, C. E., An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. Illinois, Waveland Press, 1997.
- [7] Eriksson, H. E., Penker, M., Lyons. B., Fado, D., UML 2 Toolkit. Indianapolis: Wiley Publoshing, Inc., 2004.
- [8] Fernandes, S. M. M, Avaliação de Dependabilidade de Sistemas com Mecanismos Tolerantes a Falha: Desenvolvimento de um Método Híbrido Baseado em EDSPN e Diagrama de Blocos. Tese de Doutorado. Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco.
- [9] Galdino, S. M. L., ISPN: modelagem e avaliação estocástica intervalar. Tese de Doutorado. Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco.
- [10] JGraph's home page: <http://www.jgraph.com/jgraph.html> (29 de outubro de 2009)
- [11] Kuo, W., Zuo, M. J., Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [12] Laprie, J. C., Avizienis, A., Randell, B., Fundamental Concepts of Dependability.
- [13] Lathi, P. Linear System and Signals. 2ª edição. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [14] Maciel, P., Lins, R., and Cunha, P. (1996). Introdução às Redes de Petri e Aplicações. X Escola de Computação, Campinas, SP.
- [15] Maciel, P. M. M., Rosa, N. S., Fernandes, S. M. M., Realiability and Availability of Communication Network.

[16] Marwah, M., Maciel, P., Quantifying the Sustainability Impact of Data Center Availability.

[17] Meyer, P. L., Probabilidade. Aplicações à Estatística. 2ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983.

[18] Montgomery, D. C., Runger, G. C., Applied Statistics and Probability for Engineers. 3ª edição. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

[19] Pitman, J., Probability. New York: Springer Texts in Statistics, 1993.

[20] Pham, H., Handbook of Reliability Engineering. Devon: Springer, 2003.

[21] Relex home page: <http://www.relex.com/products/> (4 de novembro de 2009)

[22] ReliaSoft's home page: http://www.reliasoft.com.br/BlockSim/BlockSim_7.htm (4 de novembro de 2009)

[23] Sahner, R., Trivedi, K. S., Puliafito, A., Performance and Reliability of Computer Systems: An Example-Based Approach Using the SHARPE Software Package. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[24] Snell, J. L., Introduction to Probability. Cingapura: McGraw-Hill Book Company, 1989.

[25] Sommerville, I., Software Engineering. 7ª edição. Edinburgh: Pearson Education Limited, 2004.

[26] Sun Microsystems' home page: <http://java.sun.com/> (29 de outubro de 2009)

Apêndice A

A tabela a seguir define as taxas de falhas e reparação para componentes presentes nos Casos 1, 2 e 3, presentes no estudo de caso.

Componente	Taxa de falhas	Taxa de reparação	Fonte de dados	Comentários
No-break 675 kW/ 750 kVA	4,0000E-06	0.125	A taxa de falhas foi tomada da <i>Power Quality Magazine</i> ; a taxa de reparação é baseada no suposto de que são necessárias 4 horas para que o pessoal técnico chegue ao estabelecimento e 4 horas para reparar o sistema.	É utilizada para fornecer a PDU com uma tensão constante de 480 VCA
Chave de transferência estática (STS)	4,1600E-06	0.1667	Gordon Associates - Raleigh, NC	Inclui controles
Transformador redutor	7,0776E-07	0.00641	O tempo médio entre falhas (MTBF) foi tomado do Gold Book do IEEE, standard 493-1997, Página 40; O MTTR é a média indicada em dados do Marcus Transformer.	É utilizado para reduzir a tensão de entrada de 480 VCA a tensões de saída de 208 VCA, que são as requeridas para cargas de 120 VCA.
Disjuntor	3,9954E-07	0.45455	Gold Book do IEEE, standard 493-1997, Página 40	É utilizado para isolar componentes do fornecimento elétrico para manutenção ou contenção de falhas.
6 terminais	8,6988E-008	0.26316	6 x valor IEEE Calculado a partir do valor do Gold Book de IEEE, standard 493-1997, Página 41	Upstream do transformador, há um terminal para cada condutor. Como há 2 sets de terminais entre os componentes, se utiliza um total de seis terminais.
8 terminais	1,1598E-007	0.26316	8 x valor IEEE Calculado a partir do valor do Gold Book de IEEE, standard 493-1997, Página 41	Downstream do transformador, há um terminal para cada condutor mais o neutro. Como há 2 sets de terminais entre os componentes, se utiliza um total de oito terminais.

Assinaturas

Recife, de dezembro de 2009.

Paulo Romero Martins Maciel
(Orientador)

André Feitoza de Mendonça
(Aluno)

Nome do arquivo: MonografiaFINAL(4).docx
Diretório: C:\Documents and Settings\andre_\Meus documentos
Modelo: C:\Documents and Settings\andre_\Dados de aplicativos\Microsoft\Modelos\Normal.dotm
Título:
Assunto:
Autor: Andre
Palavras-chave:
Comentários:
Data de criação: 30-11-2009 09:05:00
Número de alterações:3
Última gravação: 30-11-2009 10:00:00
Salvo por: afm4
Tempo total de edição: 67 Minutos
Última impressão: 30-11-2009 22:30:00
Como a última impressão
Número de páginas: 63
Número de palavras: 11.717 (aprox.)
Número de caracteres: 63.278 (aprox.)