



Pós-Graduação em Ciência da Computação

“Avaliação de Dependabilidade de Infraestruturas de Data
Centers Considerando os Efeitos da Variação de
Temperatura”

Por

Rafael Roque de Souza

Dissertação de Mestrado



Universidade Federal de Pernambuco
posgraduacao@cin.ufpe.br
www.cin.ufpe.br/~posgraduacao

Recife, Agosto/2013



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática
Pós-graduação em Ciência da Computação

Rafael Roque de Souza

**“Avaliação de Dependabilidade de
Infraestruturas de Data Centers Considerando os
Efeitos da Variação de Temperatura”**

*Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação
em Ciência da Computação do Centro de Informática
da Universidade Federal de Pernambuco como requisito
parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da
Computação.*

Orientador: *Paulo Romero Martins Maciel*

Recife, Agosto/2013

Catálogo na fonte
Bibliotecária Jane Souto Maior, CRB4-571

Souza, Rafael Roque de

Avaliação de dependabilidade de infraestruturas de data centers considerando os efeitos da variação de temperatura / Rafael Roque de Souza. - Recife: O Autor, 2013.

91 f.: il., fig., tab.

Orientador: Paulo Romero Martins Maciel.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, 2013.

Inclui referências.

1. Redes de Computadores. 2. Dependabilidade. 3. Data Center. 4. Redes de Petri Estocástica. I. Maciel, Paulo Romero Martins (orientador). II. Título.

004.6

CDD (23. ed.)

MEI2013 – 127

Dissertação de Mestrado apresentada por **Rafael Roque de Souza** à Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, sob o título “**Avaliação de Dependabilidade de Infraestrutura de Data Centers Considerando os Efeitos da Variação de Temperatura**”, orientado pelo **Prof. Paulo Romero Martins Maciel** e aprovada pela Banca Examinadora formada pelos professores:

Prof. Eduardo Antônio Guimarães Tavares
Centro de Informática / UFPE

Prof. Luiz Affonso Henderson Guedes de Oliveira
Departamento de Engenharia de Computação e Automação/ UFRN

Prof. Paulo Romero Martins Maciel
Centro de Informática / UFPE

Visto e permitida a impressão.
Recife, 30 de agosto de 2013.

Prof. Edna Natividade da Silva Barros
Coordenador da Pós-Graduação em Ciência da Computação do
Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco.

*Dedico este trabalho à minha querida e amada Mãe,
Lourdes Roque.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pelo seu amor incondicional, pela saúde, pela coragem, pela força que me proporcionou para nunca desistir dos meus objetivos, e a cada dia superar novos desafios.

À minha família, especialmente meus pais, José Alípio (In Memory), Maria Lourdes Roque, as minhas irmãs Andreia Roque e Raquel Roque. A minha namorada, Geysel (Fia), por compreender minha ausência e por estes anos estar sempre ao meu lado.

Agradeço ao meu orientador, Paulo Maciel, por ter me dado a oportunidade de crescimento e por ter acreditado em mim, além de ter me incentivado, sempre com bastante objetividade, sobre a pesquisa e escrita. Os seus sábios conselhos, dedicação foram de grande contribuição em cada passo na construção deste trabalho, e para minha capacitação como pesquisador. Sem dúvida, posso me considerar um privilegiado por ser orientado por ele.

Aos Professores Eduardo Tavares e Luiz Affonso Henderson Guedes de Oliveira, por terem aceitado o convite para compor esta banca.

Ao Centro de Informática (CIn) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que forneceu suporte durante a realização desta pesquisa. À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), que me promoveu recursos financeiros para execução deste trabalho.

Aos meus amigos do grupo de pesquisa MoDCS, por toda informação passada e pelos muitos momentos de descontração: Jean Teixeira, Rubens Matos, Julian Araújo, Erica Teixeira. A João Ferreira, Jamilson Dantas, Kádna Camboim, agradeço por sua importante contribuição na dissertação e nos artigos. Agradeço em especial a Gustavo Callou, que não mediu esforços para me ajudar ao longo do mestrado. As pessoas que conheci no CIn: Airton, Lenin, Renê, João Emanuel, Jamilson Batista. Ao pessoal da secretaria de pós graduação. Enfim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para essa conquista. A todos, meu sincero agradecimento.

*Porque Deus amou o mundo de tal maneira
que deu o seu Filho unigênito, para que todo
aquele que nele crê não pereça, mas tenha
a vida eterna.*

— (João 3:16)

Resumo

Os *data centers* estão em constante crescimento, a fim de atender às demandas de novas tecnologias, como *cloud computing* e *e-commerce*. Em tais paradigmas, períodos de inatividade podem levar a perdas financeiras de milhões de dólares e danificar permanentemente a reputação de uma empresa. Vários fatores afetam a disponibilidade de sistemas de TI em *data center*, entre eles, as variações de temperatura ambiente.

Este trabalho propõe modelos para contemplar o efeito de variação de temperatura nas infraestruturas do *data center*. Além destes modelos, também é proposta uma metodologia para auxiliar na elaboração e avaliação dos diferentes cenários. Esta metodologia permite a análise através de vários modelos intermediários que ajudam a encontrar o efeito de variação de temperatura na disponibilidade das infraestruturas de TI do *data center*.

Nesta abordagem, a avaliação é realizada com modelos de rede de Petri estocásticas, modelo de Arrhenius, modelo de energia, e diagrama de blocos de confiabilidade. Por fim, três estudos de casos real, bem como, exemplos são apresentados com a finalidade de mostrar a aplicabilidade deste trabalho.

Palavras-chave: disponibilidade, *data center*, temperatura, redes de Petri estocástica.

Abstract

Data centers are constantly growing in order to meet the demands of new technologies such as cloud computing and e-commerce. In such paradigms, periods of downtime can lead to financial losses of millions of dollars and permanently damage a company's reputation. Several factors affect the availability of IT systems in data centers, among them temperature variations within the data center room. This work proposes an approach for evaluating the effect of such temperature changes on data center IT systems. In addition to these models, it is also proposed a methodology to assist in the elaboration and evaluation of different scenarios. In this approach, the evaluation is accomplished with stochastic Petri net (SPN), Arrhenius, Energy and RBD models, which simulate the impact of temperature on the availability of variously specified IT and cooling architectures. Three case studies are included to demonstrate the applicability of the proposed models.

Keywords: availability, data center, temperature, and stochastic Petri nets.

Lista de Figuras

2.1	Infraestrutura de TI.	21
2.2	Infraestrutura de Energia. Adaptado de [12].	22
2.3	Infraestrutura de Refrigeração. Adaptado de [14].	23
2.4	Relação entre Falha, Erro e Defeito.	24
2.5	Curva da Banheira. Adaptado de [21].	26
2.6	Estados Reparáveis do Sistema [37].	27
2.7	Diagrama de Blocos em Série. Adaptado de [14].	28
2.8	Diagrama de Blocos em Paralelo. Adaptado de [14].	29
2.9	Diagrama de Blocos Série-Paralelo.	30
2.10	Diagrama de Blocos Paralelo-Série.	30
2.11	Diagrama de Blocos Série-Paralelo (Possível de Combinação).	31
2.12	Diagrama de Blocos Série-Paralelo (Resultado da Combinação).	31
2.13	Redução em Série. Adaptado de [37].	32
2.14	Transições com Tempo [8].	33
2.15	Modelo de Simples Componente [14].	36
2.16	Falha comum na dependência de marcação.	37
2.17	Composição de Modelos [12].	38
2.18	Composição de Modelos com Redução de Sistemas.	38
2.19	<i>Cold Standby</i> [14].	40
4.1	Metodologia.	47
4.2	Modelo de Energia.	49
4.3	Componentes do <i>Rack</i>	55
4.4	Modelo RBD para um <i>Rack</i>	55
4.5	Configurações de <i>Data Center</i>	57
4.6	Modelo SPN da Configuração C1.	58
4.7	Sub-Rede SPN da Configuração C1.	58
5.1	Configurações do <i>Data Center</i>	64
5.2	Modelo SPN para Configuração C1.	66
5.3	Resultados do Primeiro Estudo: Disponibilidade(9s) de cada configuração.	69
5.4	Configurações do <i>Data Center</i>	71

5.5	Resultado do Segundo Estudo de Caso: Disponibilidade(9s) de Cada Configuração.	75
5.6	Configurações do <i>Data center</i>	78
5.7	Resultado do Terceiro Estudo de Caso: Perdas Financeiras das Configurações em Cada Modo Operacional.	81

Lista de Tabelas

2.1	Atributos da Composição de Modelos.	38
2.2	Atributos do componente de agregação.	39
2.3	Atributos da Transição.	40
4.1	Parâmetros das infraestruturas de TI e Refrigeração.	59
4.2	Atributos de Transição.	59
5.1	A Potência do Sistema de Refrigeração em Cada Configuração.	63
5.2	Temperatura Ambiente.	65
5.3	Parâmetros das infraestruturas de TI e Refrigeração.	65
5.4	Atributos das Transições.	67
5.5	Expressões para Quantificar a Disponibilidade.	67
5.6	Resumo dos Resultados das Configurações.	68
5.7	Parâmetros Modelo de Energia.	72
5.8	Temperatura da sala do <i>Data Center</i>	72
5.9	Expressões para Quantificar a Disponibilidade.	73
5.10	Resumo dos Resultados das Configurações.	74
5.11	Temperatura da sala do <i>Data Center</i>	79
5.12	Parâmetros da Infraestrutura de TI e Refrigeração.	79
5.13	Expressões para Quantificar a Disponibilidade.	80
5.14	Resumo dos Resultados das Configurações	82

Lista de Acrônimos

AC	<i>Aquisition Cost</i>
BTU	<i>mean Bookings Price</i>
BP	<i>British Thermal Unit</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
COP	<i>Coefficient of Performance</i>
CRAC	<i>Computer Room Air Conditioning</i>
EC	<i>Employees Cost</i>
EFM	<i>Energy Flow Model</i>
FL	<i>Financial Losses</i>
GSPN	<i>Generalized Stochastic Petri Nets</i>
I	<i>Income</i>
NRH	<i>Number of Reservations per Hour</i>
MC	<i>Maintenance Cost</i>
MNRT	<i>Mean Non-Repair Time</i>
MO	Modos Operacional
MTBF	<i>Mean Time Bethwen Failure</i>
MTR	<i>Mean Time to Restore</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
OC	<i>Operational Cost</i>
P	<i>Profit</i>
PDU	<i>Power Distribution Unit</i>

RBD	<i>Reliability Block Diagram</i>
SHARPE	<i>Symbolic Hierarchical Automated Reliability and Performance Evaluator</i>
SEER	<i>Seasonal Energy Efficiency Ratio</i>
SPN	<i>Stochastic Petri Nets</i>
TimeNET	<i>Timed Net Evaluation</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	15
1.1 Contexto	15
1.2 Motivação	17
1.3 Objetivos	18
1.4 Estrutura da Dissertação	19
2 Fundamentação Teórica	20
2.1 Infraestruturas do <i>Data Center</i>	20
2.1.1 Infraestrutura de TI	20
2.1.2 Infraestrutura de Energia	21
2.1.3 Infraestrutura de Refrigeração	22
2.2 Dependabilidade	22
2.3 Diagrama de Bloco de Confiabilidade (RBD)	28
2.4 Redes de Petri Estocástico (SPN)	32
2.4.1 Simples Componente	36
2.4.2 Falha comum na dependência de marcação	36
2.4.3 Composição de modelos	37
2.4.4 <i>Cold Standby</i>	39
2.5 Considerações Finais	40
3 Trabalho Relacionado	41
3.1 Variação da Temperatura e Transferência de Calor	41
3.2 Modelos Dependabilidade	44
3.3 Considerações Finais	45
4 Metodologia e Modelo	46
4.1 Metodologia	46
4.2 Modelos para Impacto de Variação de Temperatura	48
4.2.1 Modelo de Energia	49
4.2.2 Impacto da Variação da Temperatura no dispositivo de TI - (Modelo de Arrhenius)	53

4.2.3	Modelo RBD para componentes em Paralelo	54
4.2.4	Modelo SPN	56
4.3	Considerações Finais	60
5	Estudo de Caso	61
5.1	Estudo de Caso I	61
5.1.1	Arquiteturas	62
5.1.2	Modelos	63
5.1.3	Resultados	68
5.2	Estudo de Caso II	69
5.2.1	Arquiteturas	70
5.2.2	Modelos	70
5.2.3	Resultados	74
5.3	Estudo de Caso III	75
5.3.1	Métricas de Custo e Lucro	76
5.3.2	Arquitetura	77
5.3.3	Modelos	77
5.3.4	Resultados	80
5.4	Considerações Finais	83
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	84
6.1	Contribuições	85
6.2	Restrições e Trabalho Futuros	85
	Referências	87

1

Introdução

1.1 Contexto

Atualmente, o mundo vem se deparando com constantes transformações no campo das TICs (Tecnologias da Informação e Comunicação), passando a exigir uma maior desenvoltura dos sistemas e dos meios de comunicação para operá-los. Estas necessidades fomentaram uma maior demanda das aplicações e serviços da Internet, levando a muitas melhorias no paradigma (ainda sob evolução) de *cloud computing* (ou computação em nuvem).

Assim, tem-se observado uma mudança na forma como interagimos com os serviços e aplicações através da Internet, a qual tem impulsionado o surgimento de serviços que possam cada vez mais atender à necessidade do usuário, permitindo que possa utilizar memória, capacidade de armazenamento e efetuar cálculos em servidores compartilhados, onde os acessos a muitas aplicações não precisam ser instalados ou armazenados no computador do usuário. Na verdade, os usuários não costumam saber sobre a localização do *data center* que está fornecendo o serviço. Estes serviços em *cloud computing* seguem o princípio de infraestrutura compartilhada, serviço sob demanda, serviços escalonáveis e pagos de acordo com o uso.

No entanto, é relevante salientar as características dos ambientes do *cloud computing*, como por exemplo, para se alcançar os altos níveis de disponibilidade necessários para infraestruturas do *data center*, mecanismos de redundância são essenciais. A depender do contexto, pode-se tornar uma melhor aplicação de redundância, utilizando dispositivos mais baratos com uma disponibilidade menor do que os dispositivos mais caros, o que poderá resultar em melhores resultados em função da dependabilidade [7].

A fim de proporcionar acesso adequado a esses serviços e aplicativos, a *cloud computing* exige infraestruturas do *data center* com níveis de alta disponibilidade e confiabilidade. Tradicionalmente, para aumentar a disponibilidade dos serviços fornecidos, as infraestruturas incluem redundância dos dispositivos. No entanto, isso pode levar a aumentos significativos na demanda de energia necessária para alimentar as infraestruturas de Tecnologia da Informação (TI) e refrigeração. A consequência disso é o aumento dos custos operacionais. A modelagem é uma forma eficaz de avaliar essas questões no contexto de diferentes infraestruturas do *data center*.

Desenvolvimentos tecnológicos, embora tenham reduzido o tamanho e aumentado o poder computacional dos servidores, têm, em contra partida, uma maior dissipação de calor, bem como um maior consumo de energia. Este fato ocorre devido ao poder computacional que gera uma maior dissipação de potência na forma de calor. Quando a temperatura é mais elevada do que a recomendada, os componentes de *hardware* de TI podem falhar com mais frequência [6]. Tais falhas de *hardware* ocorrem devido ao aumento da temperatura na sala de TI do *data center*, tendo um grande impacto sobre a disponibilidade e confiabilidade da infraestrutura de TI.

O aumento da dissipação de energia e conseqüentemente geração de calor eleva os limites da temperatura do dispositivo, provocando instabilidade na infraestrutura de TI, o que geralmente reduz a confiabilidade e a disponibilidade. O aumento de temperatura, por sua vez, pode levar a uma redução da vida útil do dispositivo de TI. Alguns trabalhos mostram que a cada 10 *graus Celsius* de aumento da temperatura ambiente, a taxa de falha de um dispositivo eletrônico praticamente dobra [45].

Portanto, é justo expressar que a mudança da temperatura tem um efeito considerável sobre a disponibilidade da infraestrutura de TI. A falha das unidades de refrigeração das salas com computadores (*Computer Room Air Conditioning - CRAC*) ou qualquer outro componente da infraestrutura de refrigeração do *data center* pode reduzir a capacidade de extração de calor do ambiente e resulta em aumento da temperatura. Estas características podem levar a perdas financeiras de milhões de dólares por hora em empresas que utilizam o serviço em *cloud computing* [35].

Nos últimos anos, alguns trabalhos têm estudado o impacto da temperatura sobre a confiabilidade do centro de dados (*data center*). Patterson [36] analisa a

eficiência energética, bem como sugere temperaturas para operação do *data center*. Pakbaznia [34] estuda a colocação de servidores ativos, juntamente com o fornecimento de ar frio. López [26] propõe um modelo para o estudo da transferência de calor no *data center*. Ghosh [23] estuda a posição para colocar servidores dentro do *rack*. Callou [13] propõe modelos para quantificar o impacto da sustentabilidade, dependabilidade e custo na infraestrutura de refrigeração do *data center*. Estes e outros trabalhos são discutidos no Capítulo 3.

Nesta dimensão, os modelos propostos são capazes de relacionar a interdependência entre as infraestruturas e quantificar o impacto do sistema de TI sobre o sistema de refrigeração, bem como o impacto que o sistema de refrigeração tem sobre o sistema de TI. Diferentes infraestruturas de TI e refrigeração com vários níveis de redundância são considerados. Por isso, uma falha no sistema de refrigeração pode resultar em uma temperatura não apropriada no ambiente do *data center*. Para tanto, vale ressaltar que são complexas estas infraestruturas, onde nem sempre é trivial realizar a análise de dependabilidade [25].

1.2 Motivação

O crescente avanço tecnológico provê uma maior capacidade de processamento, armazenamento dos servidores do *data center*, bem como vem reduzindo o tamanho dos dispositivos de TI. A temperatura é um efeito deste avanço, no qual cada dispositivo passa a gerar uma maior carga de dissipação e calor. O aumento de temperatura torna-se uma causa pertinente na investigação entre as possíveis causas de redução de confiabilidade e de disponibilidade.

Um dispositivo de TI é composto por semicondutores, em que o fluxo de corrente percorre os elementos internos do circuito durante a operação, assim, a temperatura do dispositivo é proporcional ao fluxo de corrente. Portanto, o fluxo de corrente gera uma dissipação de potência na forma de calor. A elevação da temperatura é uma causa comum de falha em um dispositivo eletrônico que, por sua vez, é normalmente projetado para funcionar dentro dos limites de temperatura especificados pelo fabricante [10].

Este trabalho visa auxiliar os projetista de *data center* com modelos que permitem estimar o impacto que a variação de temperatura tem sobre a disponibilidade das infraestruturas do *data center*. A fim de conseguir isso, modelos de redes de Petri estocástico (*Stochastic Petri Nets* - SPN) são propostos para representar as

relações de causas temporais entre os sistemas TI e refrigeração [20].

Os modelos propostos permitem quantificar tanto o impacto do sistema de TI sobre o sistema de refrigeração, bem como o impacto do sistema de refrigeração na disponibilidade do sistema de TI. Uma vez que o funcionamento imperfeito do sistema de refrigeração pode resultar em uma temperatura incorreta no ambiente do *data center*. Diferentes arquiteturas de refrigeração e TI com múltiplos níveis de redundância são considerados neste trabalho. Nesta dimensão foram utilizados os diagrama de bloco de confiabilidade (*Reliability Block Diagrams* - RBD), por permitir a representação de forma combinacional e expressar as métricas através de expressões analíticas [47]. Foram utilizado o modelo de energia e o de Arrhenius para relacionar o incremento de temperatura com a redução do tempo de falha dos dispositivos.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é a proposição de um conjunto de modelos para avaliar o impacto da variação de temperatura na disponibilidade da arquitetura de TI do *data center*. Este trabalho propõe meios que auxiliam a avaliação de dependabilidade de infraestruturas de *data center* considerando os efeito da variação de temperatura. De uma forma mais específica, para se avaliar as arquiteturas de *data center*, o presente trabalho se propõe a:

- elaborar uma metodologia para avaliar os efeitos da variação de temperatura na infraestrutura de TI;
- definir modelos de dependabilidade para avaliação das infraestruturas de TI e refrigeração do *data center*;
- criar modelos para estimar o impacto da variação da temperatura na infraestruturas de TI do *data center*;
- definir métricas de custo e lucros associados ao *data center*;
- elaborar estudos de casos para avaliar e apresentar aplicabilidade dos modelos;
- avaliar as infraestruturas, a fim de comparar as alternativas, baseado nas métricas de dependabilidade, variação de temperatura e custos.

1.4 Estrutura da Dissertação

O capítulo 2 mostra os fundamentos para um melhor entendimento do trabalho, enfatizando aspectos básicos sobre dependabilidade, como conceitos e definições relacionadas. Na sequência, são apresentados modelos gerais para análise de dependabilidade, detalhando diagrama de bloco para confiabilidade. Por fim, são apresentados os métodos de avaliação que foram utilizados. O Capítulo 3 descreve brevemente alguns trabalhos relacionados que foram encontrados na literatura sobre variação da temperatura nas infraestruturas do *data center*. O Capítulo 4 apresenta os modelos propostos para quantificar o impacto da variação de temperatura nas infraestruturas de TI dos *data centers*. O Capítulo 5 é composto pela descrição de três estudos de caso, baseados nos modelos propostos, para avaliação do impacto da variação de temperatura nas infraestruturas dos *data centers* e apresenta os resultados sobre cada estudo. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho, assim como as principais contribuições e, posteriormente, são apresentadas propostas para trabalhos futuros.

2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos básicos sobre *data center*, incluindo as infraestruturas que o compreendem. Também são introduzidos os conceitos básicos sobre dependabilidade, incluindo seus atributos e informações relacionadas. Além disso, é exposta uma visão geral dos modelos: Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD) e Redes de Petri Estocástica (SPN).

2.1 Infraestruturas do *Data Center*

O *data center* é composto por um conjunto integrado de componentes, que são divididos nas infraestruturas de energia, refrigeração e TI. Esta seção apresenta um sistema genérico de *data center* e também descreve informações e funcionamento sobre cada infraestrutura [4].

2.1.1 Infraestrutura de TI

É uma plataforma que permite fornecer serviços de processamento e armazenamento de dados em larga escala para organizações de qualquer porte. Estes benefícios permitem alcançar estruturas de grande flexibilidade, alta segurança para processar e armazenar informações, tornando, assim, possível o paradigma de *cloud computing*. Esta plataforma é composta por *hardware* e *software*.

Os componentes de *hardware* consistem de roteador, *switch*, servidor e dispositivo de armazenamento de dados. Os dispositivos de armazenamento (por exemplo, sistemas de armazenamento) são normalmente conectados através de uma rede para área de armazenamento (*Storage Area Network* - SAN). A arquitetura de rede utiliza os roteadores, *switch* e protocolos para gerenciar toda comunicação interna e

externa. A Figura 2.1 representa uma infraestrutura básica de TI, composta por 1 *router border* - (roteador de borda), 1 *router* - (roteador), 9 *switch* e 40 *rack*, onde cada *rack* contém 10 servidores.

O *software* fornece serviços como sistemas operacionais, aplicativos e utilitários para o gerenciamento do sistema de TI. A utilização de *software* para virtualização do servidor também traz vários benefícios como um melhor aproveitamento do *hardware*, segurança, custo e adaptação a diferentes cargas de trabalho.

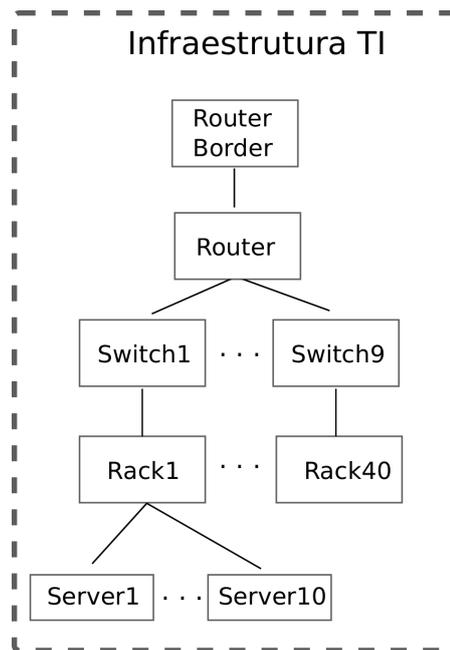


Figura 2.1 Infraestrutura de TI.

2.1.2 Infraestrutura de Energia

A infraestrutura de energia é responsável pelo recebimento da energia elétrica da concessionária e distribuição na frequência e voltagem correta para as infraestruturas de TI e refrigeração. A Figura 2.2 ilustra uma infraestrutura base de energia, a qual recebe energia da concessionária, passando pelas seguintes etapas: na primeira etapa, a energia é recebida pela fonte de alimentação ininterruptas (*Uninterruptible Power Supply* - UPS); na segunda etapa, a energia passa para as unidades de distribuição de energia (*Power Distribution Unit* - PDU), que são compostas por um *Step Down Transformer*, que é responsável por reduzir a tensão primária, fornecendo, assim, uma menor tensão secundária e um painel eletrônico (*Subpanel*); na terceira e última etapa, a energia é distribuída para o sistema de

TI através de régua de energia (*power strip*). A UPS pode oferecer condições de *backup* de energia em caso de falhas de curta duração. Geradores ou outras fontes de energia local devem ser usados para cortes mais longos, ou até mesmo para satisfazer as partes críticas da demanda total de energia [12], [47].

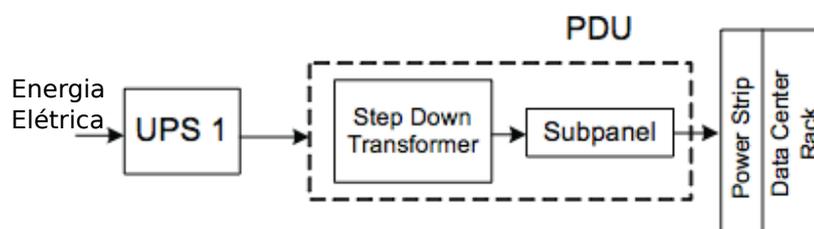


Figura 2.2 Infraestrutura de Energia. Adaptado de [12].

2.1.3 Infraestrutura de Refrigeração

O sistema de refrigeração controla a temperatura da sala do *data center*, retirando o calor em excesso gerado pela dissipação de potência do sistema de energia e do sistema de TI e, conseqüentemente, refrigerando a sala. A temperatura é regulada no sistema de refrigeração, que mantém a temperatura padrão entre 20 e 22 graus Celsius [6]. A infraestrutura de refrigeração é composta basicamente por unidades de ar condicionado da sala de computadores (*Computer Room Air Conditioning* - CRACs), *chillers* e *cooling tower*.

A Figura 2.3 apresenta o funcionamento da infraestrutura de refrigeração. O calor é retirado do ambiente pelo CRAC, o qual é levado através da água em circulação para o evaporador do *chiller*, que, seguidamente, o condensa, recebendo os vapores comprimidos e quentes do evaporador, passando para o estado líquido, que é enviado para o *cooling tower*, que o libera para o ambiente externo. O *cooling tower* recebe o “ar” do ambiente externo, que é resfriado novamente no condensador do *chiller*, passando a esfriar novamente toda a água. A água resfriada é emitida ao evaporador, que passa para o CRAC, que, seguidamente, resfria a sala.

2.2 Dependabilidade

O conceito de dependabilidade surgiu mais precisamente em 1992, após a publicação do livro *Dependability: Basic Concepts and Terminology* [25]. A dependabilidade (*Dependability*) de um sistema deve ser entendida como a capacidade

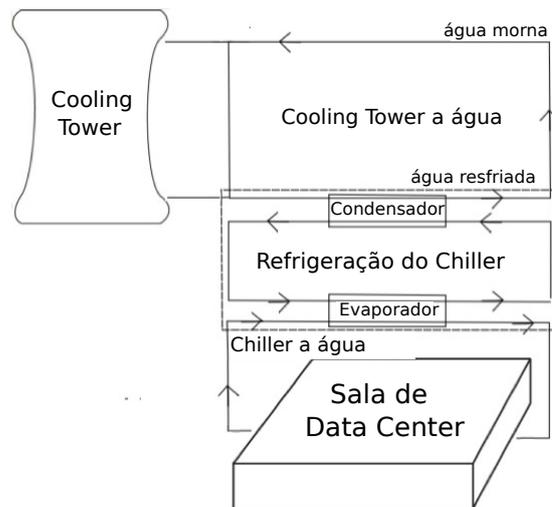


Figura 2.3 Infraestrutura de Refrigeração. Adaptado de [14].

de evitar falhas de serviço que são mais frequentes e mais graves do que aceitável [7].

A falha do sistema representa o evento que ocorre quando a entrega do serviço não ocorre corretamente [25]. A tradução linear dos termos em inglês *fault* e *failure* (ambas podem ser traduzidas para falha) podem não deixar claro o que significam em algum contexto. Devido a isto, neste trabalho serão adotados os termos ‘falha’ para descrever *failure* e ‘defeito’ para descrever *fault*.

Uma falha pode ser entendida como um problema físico (*hardware*). Um erro indica que certas funcionalidades do *software* não estão se comportando como especificado, por sua vez, geram instabilidade nas aplicações. Um defeito pode ser compreendido como um comportamento inesperado do sistema, desviando, assim, das suas especificações iniciais, que, por sua vez, pode ser compreendido como a incapacidade de um sistema funcionar adequadamente.

Um sistema com uma determinada falha, mas que ainda consegue prover seu serviço, é chamado de serviço tolerante a falha, isto é, o sistema não falha, mesmo quando existe defeito em um componente do sistema [3].

A Figura 2.4 ilustra um exemplo para melhor compreensão dos tipos de falhas. Uma falha apresentada no disco rígido (*Hard Disk* - HD) de um servidor (falha física) pode levar a uma interpretação errada da informação em sua estrutura de dados (erro no *software*), podendo, assim, negar autorização de acesso ao serviço para o usuário, a depender do tipo de requisição que foi feita, pois o erro pode ocorrer em uma parte do sistema que não está sendo solicitada no momento, mas

que virá apresentar defeito quando for solicitada.

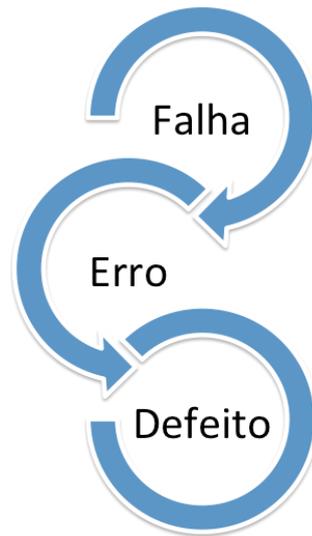


Figura 2.4 Relação entre Falha, Erro e Defeito.

O conceito de dependabilidade pode ser dividido em três partes [7], [25]:

Ameaças: compreendem falhas, erros e defeitos. Falha do sistema representa quando o evento de entrega do serviço não ocorre corretamente.

Atributos: referem-se às medidas quantitativas que são frequentemente cruciais para uma análise dos serviços oferecidos. Atributos de dependabilidade incluem os conceitos de disponibilidade, confiabilidade, segurança, integridade e manutenção.

Os meios: são os métodos pelos quais a dependabilidade é atingida.

Atualmente essas propriedades vêm se tornando foco de muitas áreas, como *software* e *hardware*. No *software*, analisam-se todos os ciclos de desenvolvimentos, desde a análise que antecede a implementação até o teste do *software*. O *hardware* possibilita uma análise antes da sua concepção, bem como uma análise de uma infraestrutura composta por um conjunto de *hardware* (por exemplo, análise de infraestruturas de TI de um *data center*, de modo a analisar a melhor viabilidade entre componentes).

Análise de dependabilidade compreende o cálculo dos índices, como tempo médio de falha (*Mean Time To Failure* - MTTF), tempo médio de reparo (*Mean Time To Repair* - MTTR) e tempo médio entre falha (*Mean Time Between Failure* - MTBF) [37], descritos a seguir:

O MTTF é o tempo médio de falha de um dispositivo representado pela Equação

2.1, onde t representa o tempo e $R(t)$ a função de confiabilidade [37].

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) \times dt. \quad (2.1)$$

O MTTR é o tempo médio em que o sistema está indisponível devido à atividade da manutenção. O MTTR está representado pela Equação 2.2.

$$MTTR = \int_0^{\infty} M(t) \times dt \quad (2.2)$$

onde t representa o tempo e $M(t)$ a função de manutenibilidade, uma vez que a função de manutenibilidade é definida por $M(t) = 1 - F_{D(1)}(t)$, sendo $D(1)$ o tempo de reparo do sistema e $F_{D(1)}(t)$ a função de distribuição cumulativa, mais detalhes consultar [37].

O MTBF é o tempo médio entre falhas de um sistema, representado pela Equação 2.3 [21].

$$MTBF = MTTR + MTTF. \quad (2.3)$$

A Figura 2.5 mostra a variação da taxa de falhas de componentes de *hardware* em função do tempo. A curva da banheira exhibe a taxa de falhas de componentes de *hardware* em três fases distintas [21]:

Na primeira parte, ocorre um curto período em que a taxa de falhas é bastante alta. Falhas ocorridas nesse período são decorrentes de defeitos de fabricação do equipamento. Com o intuito de encurtar esse período, fabricantes submetem os equipamentos a um processo chamado *burn-in*, onde eles são expostos a elevadas temperaturas de funcionamento.

Na segunda fase, as falhas ocorrem aleatoriamente. Valores de confiabilidade de equipamentos fornecidos por fabricantes aplicam-se a esse período. Durante a fase final, a taxa de falhas cresce exponencialmente. O período de vida útil do equipamento normalmente não é uma constante. Ele depende do nível de estresse em que o equipamento é submetido durante esse período.

Em ambientes de alta disponibilidade, deve-se ter certeza de que a primeira fase tenha passado. Em alguns casos, é necessário deixar os equipamentos funcionando em um ambiente de testes durante um certo período de tempo, em que se deve tomar cuidado para que o equipamento seja substituído antes de entrar na fase final.

A dependabilidade do sistema pode ser entendida como a capacidade de pre-

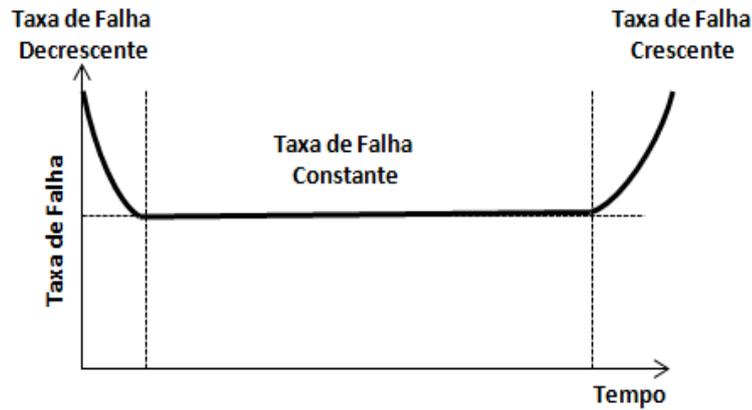


Figura 2.5 Curva da Banheira. Adaptado de [21].

venir falhas de serviço que são mais frequentes do que aceitável, ou pode ser entendida simplesmente como a capacidade do sistema ser confiável [37]. O conceito de dependabilidade engloba os seguintes atributos: confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, segurança. A seguir, são apresentados os atributos de disponibilidade e confiabilidade. Para mais detalhes sobre os atributos, o leitor pode consultar [25], [37].

A confiabilidade é a probabilidade que o serviço tem para continuar operando corretamente. Equação 2.4 representa a confiabilidade, em que T é uma variável aleatória contínua, que representa o tempo de ocorrência de falhas no sistema.

$$R(t) = P\{T \geq t\}, t \geq 0. \quad (2.4)$$

Uma simples definição de disponibilidade pode ser basicamente descrita como uma porcentagem de tempo em que o sistema está ativo. Tal definição é expressa pela Equação 2.5, mais detalhes consultar [37].

$$A = \frac{E[Uptime]}{E[Uptime] + E[Downtime]}. \quad (2.5)$$

Considerando que o sistema inicia sua operação no tempo $t = t'$, e falso se $t = t''$, assim $\Delta t = t'' - t' = Uptime$ (ver Figura 2.6). Portanto, a disponibilidade do sistema pode também ser expressa pela Equação 2.6 [37]:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTR}. \quad (2.6)$$

onde MTR é tempo médio para restaurar (*mean time to restore*), uma vez que

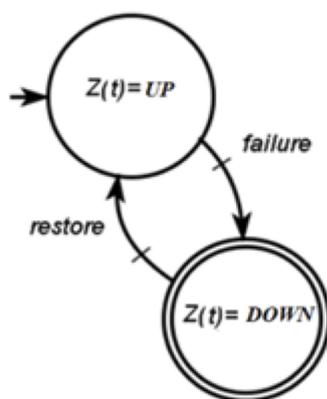


Figura 2.6 Estados Reparáveis do Sistema [37].

é definido por $MTR = MNRT + MTTR$. O $MNRT$ é o tempo médio sem reparação (*mean non-repair time*), assim:

se $MNRT \cong 0$,

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}. \quad (2.7)$$

Enquanto $MTTR \ll MTBF$, a disponibilidade pode ser representada pela Equação 2.8. Maiores detalhes consultar [37].

$$A = \frac{MTTF}{MTTR + MTTF}. \quad (2.8)$$

Outra forma de representar a disponibilidade é através do número de noves (9's) [14], como mostra a Equação 2.9. 100 representa o nível de disponibilidade máxima que o sistema pode atingir e A representa a disponibilidade real do sistema.

$$N = -\log(1 - A/100). \quad (2.9)$$

A disponibilidade instantânea é a probabilidade que o sistema está operacional em um instante de tempo específico, isto é,

$$A(t) = P\{Z(t) = 1\} = E\{Z(t)\}, \geq 0. \quad (2.10)$$

Caso o reparo não seja possível, a disponibilidade instantânea $A(t)$ é equivalente à confiabilidade, $R(t)$. Se a abordagem do sistema de estado estacionário, aumenta com o tempo, então é possível, assim, quantificar a disponibilidade de

estado estacionário, de modo a estimar se o sistema está operacional por um longo período [37].

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t), t \geq 0. \quad (2.11)$$

2.3 Diagrama de Bloco de Confiabilidade (RBD)

São detalhadas nesta seção, as características do Diagrama de Bloco de Confiabilidade (RBD) definido por Way [47] como uma representação das conexões lógicas de componentes necessários para atender uma função do sistema especificado através de blocos de subsistemas ou componentes conectados de acordo com suas funções ou relação de confiabilidade. Além disso, esta técnica foi estendida para calcular métricas de dependabilidade, tais como disponibilidade e manutenibilidade.

O modelo RBD é composto por três elementos básicos, que são: componentes, ligação e nós. Os componentes são representados por blocos, os quais têm vários atributos como, por exemplo, a função de distribuição de falha. Os *links* e nós são construções lógicas para relacionar os blocos e, assim, definirem os caminhos de um sistema. Um caminho é definido como um percurso contínuo e sem sobreposições da entrada à saída de um RBD. Portanto, é possível representar um componente físico em modo de operação, através de um bloco e estimar a confiabilidade de cada bloco individual. Para representar a falha de um componente, é só remover o bloco correspondente e, assim, computar a confiabilidade do sistema [47].

O sistema pode compreender estruturas de blocos em série, blocos paralelos $k - out - of - n$ (k de n) ou combinações de tais estruturas. Um diagrama que tem componentes ligados em série, exige que cada um dos componentes esteja ativo para que o sistema fique em um estado operacional, como mostra a Figura 2.7. No caso de estruturas em série com n componentes, a confiabilidade do sistema é representada pela Equação 2.12.

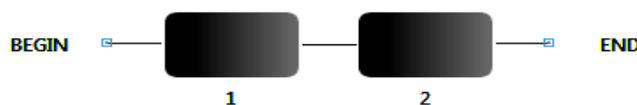


Figura 2.7 Diagrama de Blocos em Série. Adaptado de [14].

2.3. DIAGRAMA DE BLOCO DE CONFIABILIDADE (RBD)

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (2.12)$$

Onde $R_i(t)$ corresponde à confiabilidade do bloco b_i em t tempo. Da mesma forma, outras métricas podem ser calculadas para as estruturas com probabilidade em série.

A Figura 2.8 apresenta um diagrama que tem os componentes ligados em paralelo, o qual exige apenas um componente para que o sistema esteja operacional [42]. A confiabilidade de 2 blocos ligados em paralelo é obtida pela Equação(2.13).

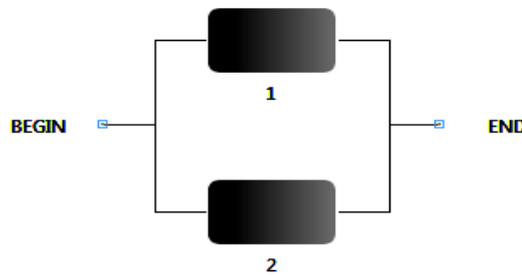


Figura 2.8 Diagrama de Blocos em Paralelo. Adaptado de [14].

$$R_P = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - R_i(t)). \quad (2.13)$$

Onde $R_i(t)$ corresponde ao bloco b_i de confiabilidade no instante de tempo t .

RBDs são principalmente utilizadas em sistemas modulares que consistem em vários módulos independentes, os quais podem ser facilmente representados por um bloco de confiabilidade.

A confiabilidade de n blocos conectados em paralelo é obtida através da Equação (2.14).

$$R_P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \quad (2.14)$$

Blocos conectados em série e blocos conectados em paralelo podem ser combinados para formar um novo bloco. A Figura 2.9 apresenta uma combinação série-paralelo e a Figura 2.10 apresenta uma combinação paralelo-série. A confiabilidade desses blocos é obtida através das Equações (2.12) e (2.14).

A Figura 2.11 mostra a conexão de blocos em série e paralelo, que são com-

2.3. DIAGRAMA DE BLOCO DE CONFIABILIDADE (RBD)

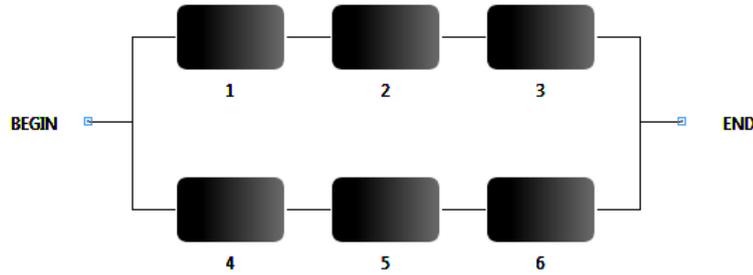


Figura 2.9 Diagrama de Blocos Série-Paralelo.

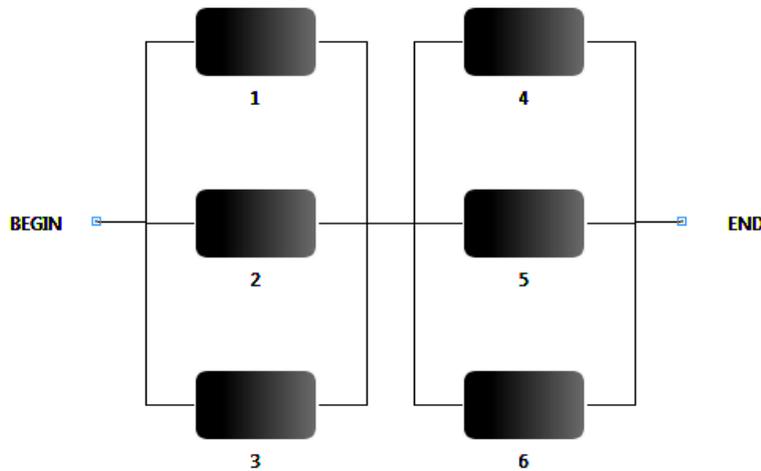


Figura 2.10 Diagrama de Blocos Paralelo-Série.

binados para representar um sistema. Os blocos 1 e 2, conectados em paralelo, são combinados e formam o bloco $P1$ e sua confiabilidade é obtida por meio da Equação (2.15). Os blocos 4 e 5 são combinados e formam o bloco $P2$, cuja confiabilidade é obtida através da Equação (2.16). A Figura 2.12 mostra o resultado da combinação desses blocos.

$$R_{P1} = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - R_i). \quad (2.15)$$

$$R_{P2} = 1 - \prod_{i=4}^5 (1 - R_i). \quad (2.16)$$

Blocos (k de n) representam estruturas em que o sistema pode funcionar se k ou mais componentes estão no estado operacional [49]. Por exemplo, em uma estrutura em que haja cinco componentes e necessita-se de três funcionando para

2.3. DIAGRAMA DE BLOCO DE CONFIABILIDADE (RBD)

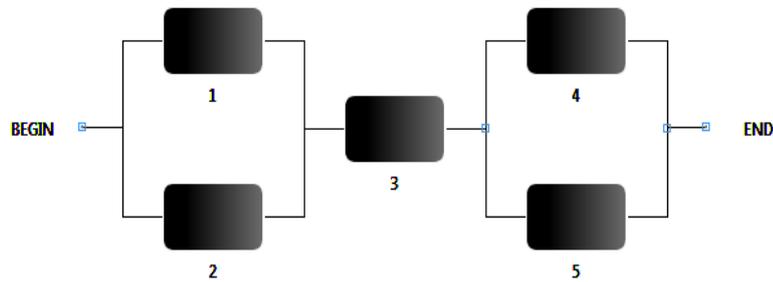


Figura 2.11 Diagrama de Blocos Série-Paralelo (Possível de Combinação).

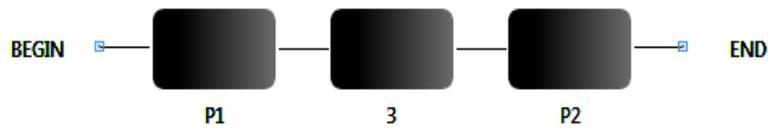


Figura 2.12 Diagrama de Blocos Série-Paralelo (Resultado da Combinação).

prover o serviço esperado, temos uma estrutura (*3 de 5*). As estruturas em série e paralela são casos especiais de estruturas (*k de n*). Uma estrutura em série é uma (*k de n*) e uma estrutura em paralelo é uma estrutura (*1 de n*) [47]. 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 de n*), e todos os n blocos possuem a mesma taxa de falha [49].

Os modelos RBD permite avaliação de dependabilidade por meio de equações de forma fechada (*closed-form*), o que deixa a tarefa de avaliação mais rápida, uma vez que, não é requerido a geração do espaço de estado do processo estocástico e, portanto, não sofre com o problema de explosão de estado. Uma das técnicas para avaliação do RBD é o método de redução, uma vez que, é possível analisar sistemas em série e sistema em paralelo, bem como analisar estruturas mais complexa como, por exemplo (*k de n*). Nesta dissertação foi adotado o método de redução para extrair um único valor de MTTF de um conjunto de componentes ligados em paralelo.

Para um melhor entendimento sobre a técnica de redução, é adotado um sistema em série composto por n componentes, apresentado na Figura 2.13(a), onde a sua probabilidade de falha é p_i . Estes sistema pode ser reduzido a um único

componente, como é mostrado na Figura 2.13(b), onde sua probabilidade de falha é $P_s = \prod_{i=1}^n p_i$. Para maiores informações o leitor pode consultar [37].

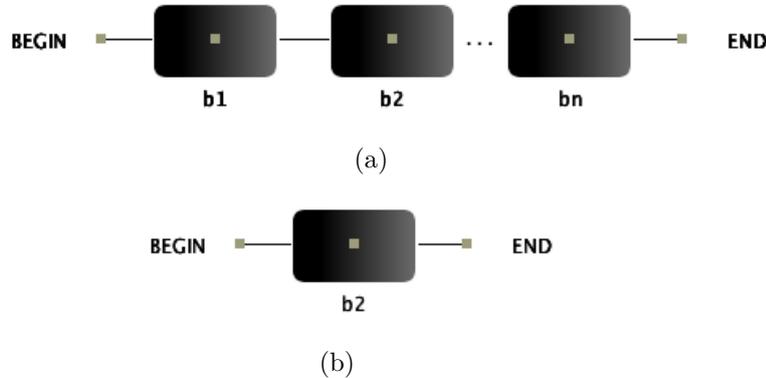


Figura 2.13 Redução em Série. Adaptado de [37].

2.4 Redes de Petri Estocástico (SPN)

As redes de Petri estocástica (SPN) são uma extensão do formalismo Petri net, que se define como uma ferramenta para modelagem e avaliação de dependabilidade de sistema envolvendo concorrência e sincronismo. As variáveis aleatórias são adicionadas para representar a duração das atividades, ou atraso até o evento, permitindo obter métricas de confiabilidade e apresentando um mapeamento direto entre SPN e eventos de processo de Cadeias de Markov (MC)[8].

O conceito de redes de Petri teve início na década de 70 do século XX e vários pesquisadores contribuíram acrescentando diferentes características estocástica, pelas quais foram criadas extensões estocástica. Entre os pesquisadores, podemos citar Noe e Nutt [31] em 1976, Merlin e Farber [28] em 1976 e Zuberek [52] em 1976 que tratam de modelagem do comportamento de sistemas computacionais dinâmicos.

Na década de 80, Molloy [30] e Natkin [29] realizam dois trabalhos, de forma independente e aproximadamente ao mesmo tempo, que contribuíram fortemente para a construção do modelo SPN. Nas teses de S. Natkin [30] no *Conservatório National des Arts et MClers* em Paris, França, e de MK Molloy [29], da Universidade da Califórnia, em Los Angeles, (nos Estados Unidos), foram abordadas definições quase idênticas que ainda tinham o mesmo nome: *Stochastic Petri Net*. Uma melhoria capaz de especificar sistemas, também apresenta uma forma de modelar os sistemas, utilizando análise probabilística.

A extensão SPN teve como melhorias a implantação do tempo em cada transição, sendo este o foco principal. As transições possuem tempo, disparo atômico e retardo de transição de variáveis aleatórias distribuídas exponencialmente, em que o comportamento das variáveis pode ser descrito através de um processo estocástico, juntamente com a utilização de *memoryless*, que é a falta de memória, necessidade de utilizar distribuição exponencial, fazendo-se, assim, isomórficas as Cadeias de Markov. A modelagem básica de uma transição temporizada é apresentada na Figura 2.14, onde a atividade representada na transição como o início da atividade corresponde justamente à habilitação da atividade, e o fim da transição corresponde ao disparo da transição que habilita o lugar P3.

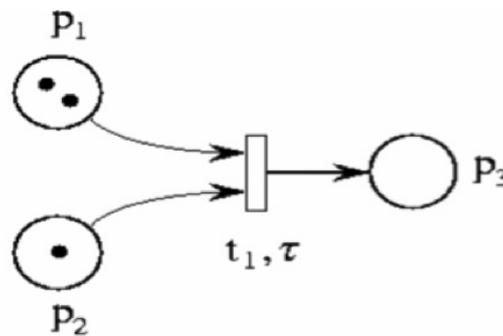


Figura 2.14 Transições com Tempo [8].

Esta característica de tempo nas transições permite diferentes tipos ou característica para o funcionamento de disparo. Podemos citar o disparo em três fases ou disparo atômico. No caso do disparo em três fases, ocorre da seguinte forma:

- Os *token* se eliminam quando é habilitada a transição;
- espera um tempo;
- os *tokens* são aceitos pelo lugar de destino (P3);

Já no disparo atômico, tem-se as seguintes características:

- Os *tokens* permanecem no lugar de entrada até serem disparados pela transição;
- A eliminação/consumo dos *token* de entrada se dá pela aceitação do lugar de destino.

Uma SPN é definida pela 9-tupla $SPN = \{P, T, I, O, H, \Pi, G, M_0, Atts\}$, onde:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ é o conjunto de lugares;
 - $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ é o conjunto de transições imediatas e temporizadas, $P \cap T = \emptyset$;
 - $I \in (\mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N})^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos de entrada (que podem ser dependentes de marcações);
 - $O \in (\mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N})^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos de saída (que podem ser dependentes de marcações);
 - $H \in (\mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N})^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos inibidores (que podem ser dependentes de marcações);
 - $\Pi \in \mathbb{N}^m$ é um vetor que associa o nível de prioridade a cada transição;
 - $G \in (\mathbb{N}^n \rightarrow \{true, false\})^m$ é o vetor que associa uma condição de guarda relacionada à marcação do lugar a cada transição;
 - $M_0 \in \mathbb{N}^n$ é o vetor que associa uma marcação inicial de cada lugar (estado inicial);
 - $Atts = (Dist, Markdep, Policy, Concurrency, W)^m$ compreende o conjunto de atributos associados às transições, onde:
 - $Dist \in \mathbb{N}^m \rightarrow \mathcal{F}$ é uma possível função de distribuição de probabilidade associada ao tempo de uma transição (esta distribuição pode ser dependente de marcação), o domínio de \mathcal{F} é $[0, \infty)$;
 - $Markdep \in \{constante, enabdep\}$, onde a distribuição de probabilidade associada ao tempo de uma transição pode ser independente (*constante*) ou dependente de marcação (*enabdep*— a distribuição depende da condição de habilitação atual);
 - $Policy \in \{prd, prs\}$ define a política de memória adotada pela transição (*prd*— *preemptive repeat different*, valor padrão, de significado idêntico à *race enabling policy*; *prs*— *preemptive resume*, corresponde ao *age memory policy*);
 - $Concurrency \in \{ss, is\}$ é o grau de concorrência das transições, onde *ss* representa a semântica *single server* e *is* representa a semântica *infinity server*.
-

– $W : T \rightarrow IR^+ \cup \{0\}$ é a função peso, que representa o peso (w_t) de transições imediatas e a taxa λ_t de transições temporizadas, onde:

$$\pi(t) = \begin{cases} \geq 1, & \text{se } t \text{ é uma transição imediata;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Se t é uma transição temporizada, então λ_t será o valor do parâmetro da função densidade probabilidade exponencial.

Se t é uma transição imediata, então W_t será um peso, que é usado para o cálculo das probabilidades de disparo das transições imediatas em conflitos.

Os arcos inibidores são usados para prevenir transições de serem habilitadas quando certa condição é verdadeira.

Os modelos SPN permitiu representar a interdependência entre sistemas, a construção de modelos realistas para avaliar sistemas. Portanto, as SPN têm associado à sua transição o tempo que é exponencialmente distribuído, facilitando a construção de processo markovianos equivalente e, assim, podendo analisar o comportamento da rede.

Para se computar métricas de dependabilidade com modelos SPN, podem ser utilizadas análise ou simulação. Em ambos existem técnicas estacionárias e transientes, onde:

- Análise transiente, é onde as métricas podem ser computadas em um determinado intervalo de tempo;
- A análise estacionário nos dá a distribuição de probabilidades estacionária do sistema, ou seja, a fração do tempo que o sistema gasta em cada um dos seus estados quando ele atinge o equilíbrio.
- A simulação possibilita a capacidade de extrair informações de um modelo, onde muitas vezes é um único método. Vale ressaltar, que isto ocorre, por exemplo, quando o espaço de estados de uma rede é muito grande para ser estudado analiticamente.

Nesta dissertação, foi adotado análise estacionária para computar a disponibilidade da infraestrutura de TI do *data center*. Além disso, é apresentado a seguir os métodos utilizados para análise de uma SPN.

2.4.1 Simples Componente

Um simples componente tem dois estados: ativo ou inativo. Para calcular a sua disponibilidade, MTTF e MTTR deve ser representado. A Figura 2.15 ilustra o modelo SPN de um simples componente, o qual tem dois parâmetros (não representado na figura) o chamado X_MTTF e o X_MTTR , que representam os atrasos associados com as transições $X_Failure$ e X_Repair , respectivamente [14].

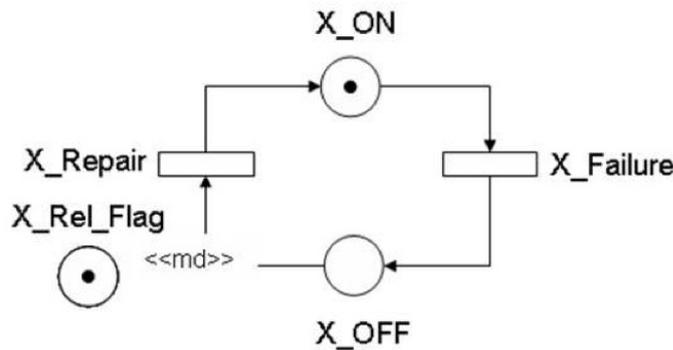


Figura 2.15 Modelo de Simples Componente [14].

O lugar X_ON e X_OFF são os respectivos estados ativos e inativos. No modelo, o arco de X_OFF para X_Repair inclui também uma característica de multiplicidade, que depende de um local de marcação. Isto é definido pela expressão ($\ll md \gg = IF(\#X_Rel_Flag = 1) : 2ELSE 1$), onde o lugar (X_Rel_Flag) representa a avaliação da confiabilidade e disponibilidade. Se a condição ($\#X_Rel_Flag = 1$) for verdade, a avaliação refere-se à confiabilidade. Caso contrário, a avaliação refere-se a disponibilidade [14].

2.4.2 Falha comum na dependência de marcação

A falha comum na dependência de sistema ocorre normalmente quando eventos têm por dependência o funcionamento de outro sistema, que ocorre quando não são estatisticamente independentes. Portanto, um sistema pode afetar outro sistema. Representar este modo de falha em um RBD não é trivial, devido à mudança na estrutura do sistema ao longo do tempo.

Na transição do bloco de um simples componente, pode ser associado à marcação dependente, para relacionar com outro sistema. A Figura 2.16 apresenta dois sistemas simples, em que a falha de um sistema afeta o funcionamento do

outro sistema. O MTTF do sistema $C1_ON$ afeta o sistema $C2_ON$, considerando que de taxa falha λ do $C1_ON$ pode afetar $C2_ON$ da seguinte forma: $C2_Failure = 1/(\lambda \times (\#C1_ON = 1))$, onde $C1_ON = 1$ representa o número de *tokens* no lugar $C1_ON$. Componentes adicionais podem ser levados em conta e seus respectivos MTTRs podem ser ajustados para considerar atraso de uma falha dependente de marcação, semelhante ao componente $C2_ON$.

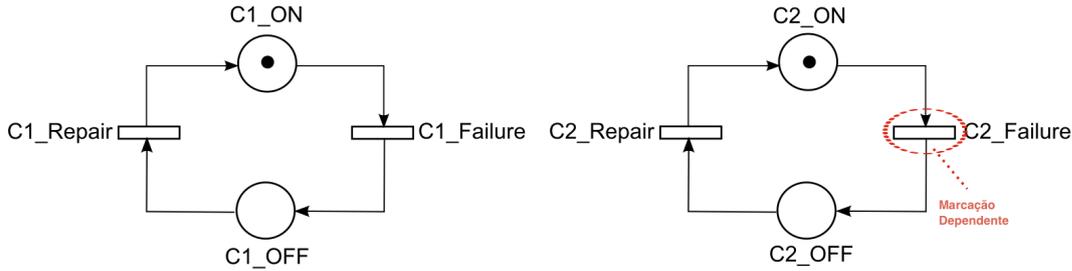


Figura 2.16 Falha comum na dependência de marcação.

2.4.3 Composição de modelos

A Figura 2.17 apresenta a composição de modelos, podendo ser representada através de dois modelos básicos e um modelo de agregação. Seguidamente, os modelos usam a expressão de guarda nas transições imediatas para representar a relação entre os modelos. Como exemplo, a composição em série é apresentada considerando modelo SPN. O mesmo modelo pode representar um sistema em paralelo sem perda de generalidade, mudando apenas a expressão de guarda [12].

A composição dos modelos em série, caracteriza-se pelo funcionamento em que nenhum deles pode falhar, caso falhe um, toda a composição também falha, ou seja, o sistema todo falha. Os dispositivos para esta composição são chamados de $C1$ e $C2$, o sistema como um todo é representado pelos lugares $Device_UP$ e $Device_Down$. Quando o sistema está em $Device_UP$, representa o sistema funcionando. Quando o sistema está inoperante, após a falha do sistema $C1$ ou $C2$, é representado com um *token* em $Device_Down$ [12].

Para a relação dos modelos básicos com o modelo de agregação, é necessário definir funções de habilitação para ambos modelos básicos. Uma expressão de guarda é associada às transições $Device_Repair$ e $Device_Failure$. A transição $Device_Failure$ é representada pela condição que representa um estado falho, similarmente a esta condição, é definido reparo na transição $Device_Repair$. A

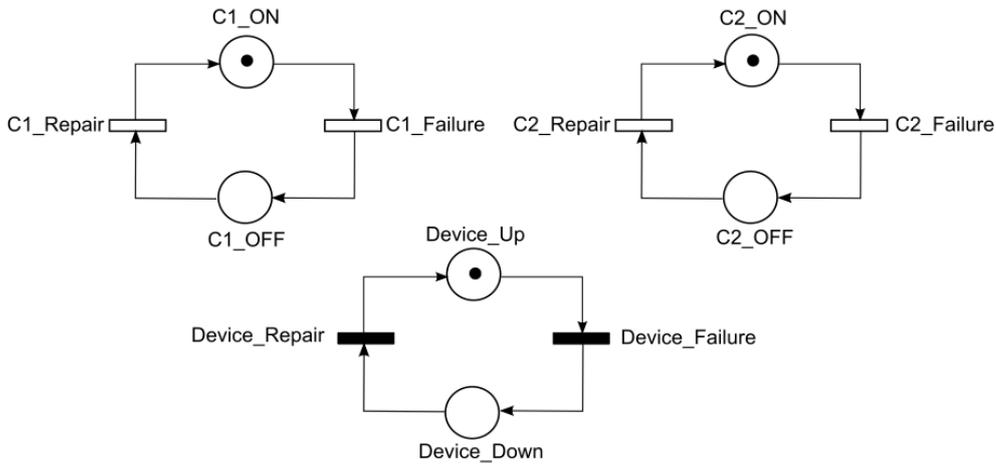


Figura 2.17 Composição de Modelos [12].

Tabela 2.1 apresenta as expressões de guarda do modelo de composição (ver 2.17). Na primeira linha, a transição de falha é habilitada quando C1 ou C2 está em falha.

Tabela 2.1 Atributos da Composição de Modelos.

Transição	Expressão de Guarda
<i>Device_Failure</i>	$(\#C1_ON = 0) \text{ OR } (\#C2_ON = 0)$
<i>Device_Repair</i>	$\text{NOT}((\#C1_ON = 0) \text{ OR } (\#C2_ON = 0))$

Em uma medida de desempenho e de dependabilidade é definido o que vai ser medido. Dependendo do modelo, esta medida pode relacionar um sistema em série ou um sistema em paralelo. A medida tem os seguintes atributos: nome da medida e uma expressão que deve ser avaliada. A Figura 2.18 apresenta outra forma de modelar a composição de modelos de agregação. Este modelo pode ser bem útil a depender da complexidade e tamanho do problema.

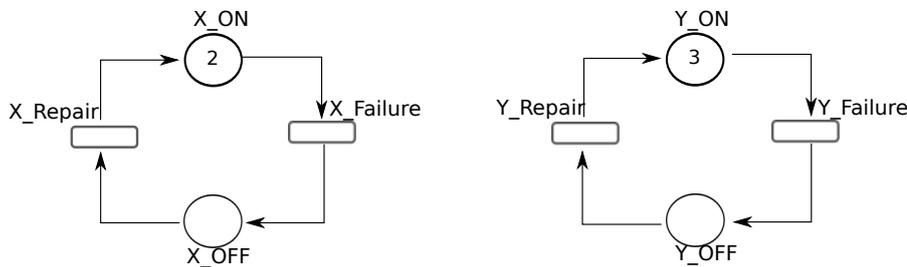


Figura 2.18 Composição de Modelos com Redução de Sistemas.

Neste exemplo, o componente básico *X_ON* é composto por dois subsistemas, e o sistema *Y_ON* composto por três subsistemas. A agregação deste sistema é

apresentada na Tabela 2.2. Portanto, a disponibilidade em série pode ser representada pela expressão de guarda $P\{(\#X_{ON} = 2 \text{ AND } \#Y_{ON} = 3)\}$. Como mencionado anteriormente, se apenas um sistema falhar, o sistema como um todo fica inoperante. Similarmente, é encontrado para um sistema em paralelo, tanto para os subsistemas X_{ON} e Y_{ON} , e também para todo o sistema com a expressão $P\{((\#X_{ON} = 1 \text{ OR } \#X_{ON} = 2) \text{ OR } (\#Y_{ON} = 1 \text{ OR } \#Y_{ON} = 2 \text{ OR } \#Y_{ON} = 3))\}$. Nesta situação, o sistema falha se todos os subsistemas dos dois sistemas falharem.

Tabela 2.2 Atributos do componente de agregação.

Atributo	tipo	Expressão de Guarda
Disponibilidade	Serie	$P\{(\#X_{ON} = 2 \text{ AND } \#Y_{ON} = 3)\}$
Disponibilidade	Paralelo	$P\{((\#X_{ON} = 1 \text{ OR } \#X_{ON} = 2) \text{ OR } (\#Y_{ON} = 1 \text{ OR } \#Y_{ON} = 2 \text{ OR } \#Y_{ON} = 3))\}$

2.4.4 Cold Standby

Um sistema redundante *cold standby* é composto por um módulo de reposição inativo que só é ativado quando o módulo ativo principal falhar. Figura 2.19 ilustra o modelo SPN deste sistema, o qual inclui quatro lugares, isto é, X_{ON} , X_{OFF} , $X_{Spare1_{ON}}$, $X_{Spare1_{OFF}}$, que representam os estados operacionais e falhas dos módulos principais e livres, respectivamente [14]. O módulo de reposição (*Spare1*) é inicialmente desativado, os *tokens* são inicialmente armazenados em locais $X_{Spare1_{ON}}$ e $X_{Spare1_{OFF}}$. Quando o módulo principal falhar, a transição $X_{Activate_{Spare1}}$ é disparada, representando a ativação do módulo de reposição [14].

A Tabela 2.3 ilustra os atributos de cada transição do modelo. O $MT_{Activate}$ corresponde ao tempo médio para ativar o módulo de reparo. A disponibilidade pode ser calculada pela probabilidade $P\{\#X_{ON} = 1 \text{ OR } \#X_{Spare1_{ON}} = 1\}$.

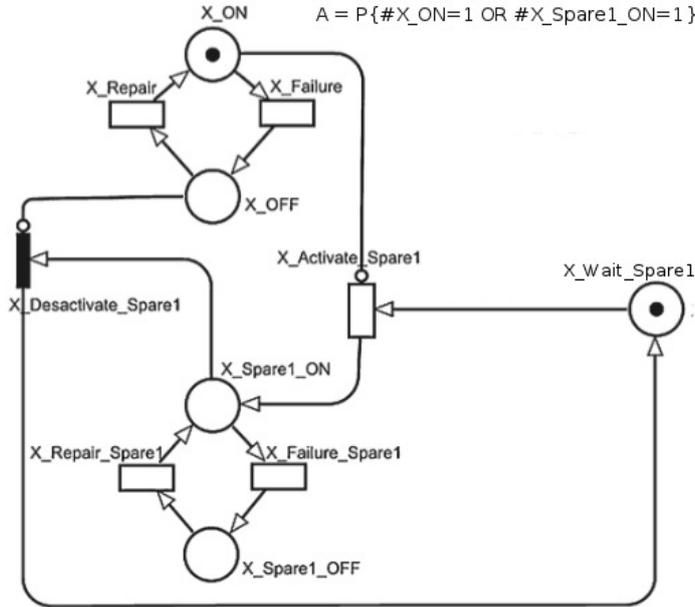


Figura 2.19 Cold Standby [14].

Tabela 2.3 Atributos da Transição.

Transição	Prioridade	Tempo ou Peso
$X_Failure$	-	X_MTTF
X_Repair	-	X_MTTR
$X_Activate_Spare1$	-	$MTActivate$
$X_Failure_Spare1$	-	X_MTTF_Spare1
X_Repair_Spare1	-	X_MTTR_Spare1
$X_Deactivate_Spare1$	1	1

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram abordados os principais conceitos que envolvem esta dissertação. Primeiramente, foi apresentada as estruturas do *data center*. Posteriormente, foram abordados os conceitos de dependabilidade. Por fim, foram mostradas as definições dos modelos formais SPN, RBD, utilizados neste trabalho para avaliação de dependabilidade.

3

Trabalho Relacionado

Neste capítulo, é abordada uma comparação da proposta desta pesquisa com os trabalhos relacionados e, por sua vez, foram selecionados aqueles considerados mais relevantes de acordo com os objetivos aqui abordados. Portanto, é interessante ressaltar que não foram encontrados diante do nosso conhecimento modelos que relacionassem dependência entre arquiteturas de TI e refrigeração. A dependência permite relacionar o impacto que ambas podem causar uma na outra, após aumento da temperatura na sala do *data center*. As seções a seguir apresentam os modelos utilizados para avaliação do efeito da variação da temperatura e avaliação de dependabilidade no *data center*.

3.1 Variação da Temperatura e Transferência de Calor

Atualmente, encontram-se diversos trabalhos que tratam do problema do efeito da variação da temperatura em *data center*, em que se tem como base a solução por meio das equações diferenciais. As equações diferenciais, por sua vez, dificilmente possuem uma solução analítica conhecida. Assim, uma das soluções encontradas é através de métodos numéricos.

O **método numérico** ajuda a resolver as derivadas existentes nas equações diferenciais, trocando por expressões algébricas. Para tal, o método de **dinâmica de fluido computacional** (CFD), permite dar um suporte ao modelo numérico de forma a analisar o fluxo de fluido, transferência de calor e fenômenos associados [2]. Assim, é possível resolver métodos de diferenças finitas e volumes finitos, através da solução das equações de Euler/Navier-Stokes, juntamente com inúmeros métodos

de integração temporal e técnicas de aceleração de convergência. Os parágrafos a seguir descrevem os trabalhos que utilizam a técnica CFD, bem como outras técnicas.

Patterson [36] analisa a eficiência energética, bem como sugere temperaturas para operação do *data center*. A análise utiliza a técnica CFD para estudo do fluxo de ar na sala. Nesse contexto, os resultados reportados apoiam o desenvolvimento de estratégias eficazes de gerenciamento térmico para os *data centers*, mas não considera o impacto da variação de temperatura na disponibilidade do sistema de TI.

Chen [16] propõe uma abordagem que integra sensores sem fio, modelos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) transiente [1], e algoritmos de previsão baseadas em dados para prever a temperatura do sistema em tempo real. A combinação destas técnicas reduz a complexidade computacional da predição de temperatura. No entanto, este documento não aborda o impacto da temperatura sobre a disponibilidade do sistema de TI.

Ghosh [23] descreve um estudo que analisa a quantidade de servidores que estão colocados no interior de um *rack*, assim como a posição em que são colocadas (por exemplo, na parte superior ou na parte inferior da prateleira). O estudo revela que o aumento do número de servidores dentro de um *rack* tem impacto sobre a temperatura do ar. Este trabalho não foca os efeitos da temperatura sobre a disponibilidade do sistema.

López [27] apresentou um modelo de transferência de calor para os *data center* que é mais rápido do que a solução por meio de cálculos CFD. A simulação é feita por meio da equação de Laplace para medições em tempo real. Os dados de entrada da equação são fornecidos por sensores sem fio. No entanto, a adoção de análise numérica pode ter reduzido a qualidade dos resultados obtidos, devido aos muitos pressupostos necessários para calcular esta análise. Além disso, o autor não aborda o impacto da temperatura sobre a disponibilidade das infraestruturas de *data center*.

Ratnesh [15] propõe uma modelagem numérica para o fluxo de ar em salas de *data center* com alta densidade de calor. Visto que a distribuição intuitiva dos CRACs não produz uma refrigeração eficaz, além de levar ao desperdício de energia. A análise da modelagem contempla uma variação da capacidade térmica do sistema de refrigeração para atender à mudança dinâmica da localização dos *racks*, a fim de encontrar um *layout* otimizado do sistema de refrigeração com base

na carga de calor atual, com isso, permitem alcançar a eficiência energética. No entanto, não é considerado o impacto que esta variação da capacidade térmica tem na disponibilidade da infraestrutura do *data center*.

Breen [11] fornece um modelo que representa o fluxo de calor a partir do nível de *rack* até o *cooling tower*. Nesse modelo, é possível tanto avaliar o desempenho do sistema de refrigeração, como identificar os componentes que mais contribuem para a ineficácia do sistema de refrigeração. Uma extensão desse trabalho é feita em [46], apresentando uma análise que incluem os componentes eletrônicos dentro de um *rack*, considerando a dissipação de calor de um processador. Isso permitiu a determinação da influência de diferentes estratégias de coeficiente de desempenho para o sistema de refrigeração. Os autores não consideraram análise de dependabilidade nas infraestruturas do *data center*.

Beitelmal [9] faz análise de uma arquitetura de refrigeração para encontrar uma melhor disponibilidade como base no posicionamento dos equipamentos de refrigeração na sala do *data center*. Nessa análise, o autor leva em consideração o movimento das correntes do fluxo de ar, com a carga fixa de calor. Logo após, é feita mudança no posicionamento dos equipamentos de refrigeração, a fim de encontrar o melhor posicionamento. Para tanto, é utilizada técnica de modelagem CFD para solucionar o melhor posicionamento dos CRACs, o que evita uma redundância desnecessária. Outra forma apresentada, é a migração da carga de trabalho para outros sistemas disponíveis dentro do *data center*, de forma a reduzir a temperatura de entrada dos servidores a um nível aceitável. Os resultados são apresentados em termo de utilização do CRAC, pressão, temperatura e fluxo de distribuição do ar. No entanto, esta análise não contemplou o impacto do posicionamento das unidades de CRACs do sistema de refrigeração sobre a disponibilidade das infraestruturas de *data center*.

Sankar [39] são apresentados modelos de Arrhenius para avaliar o impacto da temperatura no dispositivo do servidor do *data center*. Nesse estudo, relaciona-se a temperatura e a falha dos servidores, considerando análise em três parâmetros que são: chassi do servidor, locais dos servidores em um *rack* e vários *racks* em um *data center*. A avaliação utiliza do modelo de Arrhenius para encontrar estimar falhas de discos rígidos correlacionados com a temperatura de funcionamento do *data center*. Este trabalho não contemplou impacto da temperatura ambiente sobre a disponibilidade da arquitetura de TI.

Pakbaznia [34] tem como objetivo minimizar o consumo de energia total para o

sistema de TI e para o sistema de refrigeração, enquanto atende um limite máximo para a temperatura de cada servidor. Esse trabalho descreve soluções de gestão térmica que melhora a eficiência energética do *data center*. O modelo de gestão térmica decide sobre o número de servidores que vão ficar ativos ao mesmo tempo. Logo após, ajusta a temperatura do ar fornecido pela arquitetura de refrigeração. Portanto, a análise prevê a carga de trabalho com políticas eficientes do tempo de execução para trazer novos servidores *online*, enquanto a carga de trabalho é alta, ou fechar quando a carga de trabalho é baixa. Este trabalho não contemplou o efeito da variação de temperatura na disponibilidade do sistema de TI.

3.2 Modelos Dependabilidade

Ao longo dos últimos anos têm surgido muitos trabalhos científicos nas áreas de infraestrutura de *data center* considerando avaliação de dependabilidade. A avaliação de dependabilidade fornece técnicas para sistemas que podem ser baseados em modelos ou experimentos. Este conceito é abrangente, o qual envolve atributos de disponibilidade, confiabilidade, desempenho, manutenibilidade. O processo de avaliação é através de modelos que devem começar durante o desenvolvimento de um sistema. A seguir, será descrita uma série de trabalhos correlatos, por ordem cronológica, que levam em conta técnicas utilizadas na modelagem. A seguir, são apresentados alguns trabalhos relacionados à dependabilidade do *data center*.

Callou [13] propõe modelos para quantificar o impacto da dependabilidade, sustentabilidade e custos da infraestrutura de refrigeração do *data center*. A análise das arquiteturas foi feita utilizando os modelos SPN e os modelos de fluxo de energia (EFM). A partir desses modelos, foram avaliados e encontrados o custo de aquisição, custo operacional, consumo de exergia, *downtime* e a disponibilidade das arquiteturas de refrigeração. Entretanto, o autor mantém o foco em arquiteturas de refrigeração, não tratando de questões sobre a temperatura.

Zeng [50] propõe modelos para analisar a dependabilidade de uma arquitetura de *control center network* em *smart grid*, bem como diferentes estratégia de *backup* de componentes críticos. A avaliação é feita pelos modelos SPN, em que são consideradas disponibilidade, confiabilidade e estratégias de *backup*. Portanto, a abordagem do autor é direcionada à análise de disponibilidade, confiabilidade em *smart grid*, mas não examinou os efeitos da temperatura sobre a disponibilidade do dispositivo.

Em Wei [48] são propostos modelos de dependabilidade para análise de infraestrutura virtual do *data center* de *cloud computing*. O objetivo principal é obter serviço de alta confiabilidade e disponibilidade, através de abordagem híbrida dos modelos de Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (*Generalized Stochastic Petri Nets* - GSPN) e RBD. A análise, por sua vez, também apresenta uma relação entre a disponibilidade e carga de trabalho e migração de *backup* em tempo real, mas não considera o efeito da variação de temperatura na dependabilidade das arquiteturas do *data center*.

Como apresentado anteriormente, vários estudos têm sido realizados considerando dependabilidade, e variação da temperatura no *data center*, mas, diante do nosso conhecimento, não foram encontrados trabalhos que se concentram no impacto da variação da temperatura externa na disponibilidade do sistema de TI, bem como na própria variação da temperatura interna, causando, assim, o impacto na disponibilidade sistema de TI, como por exemplo, falha do sistema de refrigeração. Portanto, diferente dos trabalhos apresentados, este trabalho propõe modelos como meio de quantificar o impacto da mudança da temperatura sobre a disponibilidade nos equipamentos de TI.

3.3 Considerações Finais

Este capítulo mostrou uma grande variedade de métodos e modelos que são utilizados para análise da variação de temperatura e dependabilidade na sala do *data center*. Por fim, foi apresentada a diferença dos trabalhos relacionados com o trabalho desta pesquisa, em que foram concebidos os modelos de energia, modelo de Arrhenius, modelo RBD e modelo SPN. Concluindo, assim, com uma contribuição muito interessante para o projetista do *data center*, no momento da elaboração de um projeto, considerando o aspecto do impacto da variação da temperatura na disponibilidade do sistema de TI.

4

Metodologia e Modelo

O Capítulo ora exposto apresenta os modelos adotados neste trabalho para quantificar o efeito da variação de temperatura na infraestrutura do *data center*, assim como características, métricas e técnicas de análise para cada modelo. Inicialmente, são apresentados os modelos para análise do efeito da variação de temperatura. Em seguida, são apresentados o modelo diagrama de blocos de confiabilidade (RBD). Seguidamente, são mostrados o modelo de redes de Petri estocástica (SPN).

4.1 Metodologia

É apresentada a seguir a metodologia concebida para avaliar o impacto da variação de temperaturas, sobre a disponibilidade do sistema de TI no *data center*. A metodologia utilizada compreende a realização de nove fases, são elas: entendimento do sistema, definição de métricas e parâmetros, geração dos modelos energia, avaliação dos modelos de energia, resultado dos modelos de energia, geração dos modelos do subsistema, geração de modelo de dependabilidade com modelo Arrhenius, avaliação do sistema e resultado do sistema.

Na Figura 4.1 é descrito o processo conduzido pela adoção de uma estratégia de modelagem híbrida, que considera as vantagens de ambos os modelos combinatórios e baseados em estados.

1. **Entendimento do Sistema:** Esta fase refere-se à compreensão do sistema, tais como a funcionalidade e a interação entre o sistema e o subsistema. Nesta fase, é importante identificar o problema a ser analisado.

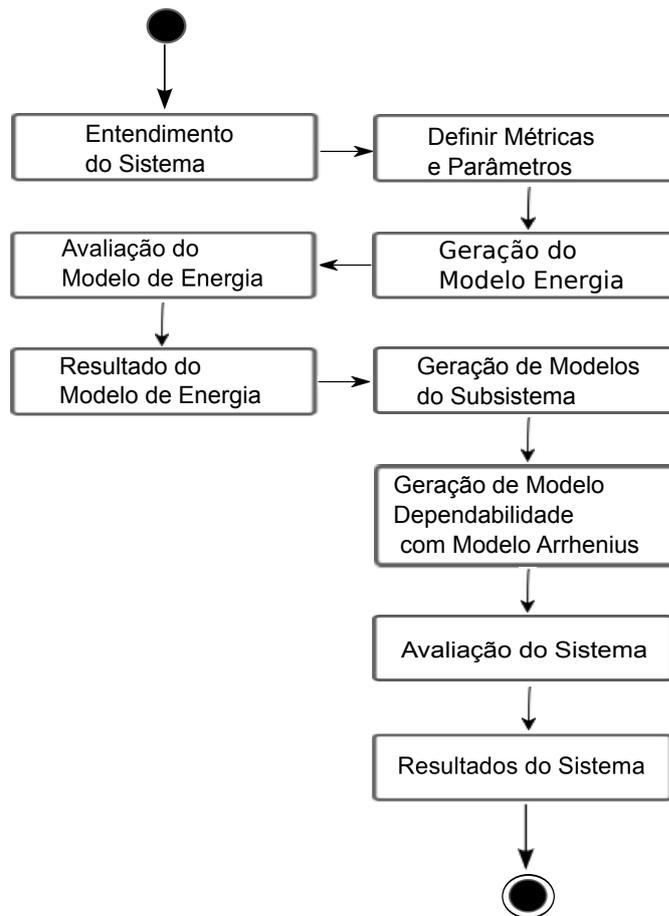


Figura 4.1 Metodologia.

- Definir Métricas e Parâmetros:** é a definição de métricas e parâmetros a serem alcançados, que serão considerados no processo de avaliação. Este trabalho adota as seguintes métricas, por exemplo: disponibilidade, custo de aquisição e custo operacional. Os parâmetros, por exemplo, utilizados são a temperatura desejada para o ambiente de TI no *data center* e a quantidade de calor a ser extraído pelo sistema de refrigeração.
- Geração do Modelos de Energia:** compreende a construção do modelo de energia das infraestruturas do *data center*, considerando os parâmetros definidos na fase anterior. Neste trabalho é considerado o efeito da variação de temperatura ambiente, proveniente do impacto do sistema de TI no sistema de refrigeração, ou pelo impacto do sistema de refrigeração no sistema de TI. Em ambas situações ocorre variação de temperatura ambiente.

4. **Avaliação do Modelo de Energia:** é apresentada, nesta fase, a avaliação do modelo de energia construído na fase anterior.
5. **Resultado do Modelo de Energia:** Nesta fase, é obtido o valor da temperatura ambiente, após ter sido avaliado na fase anterior.
6. **Geração de Modelos do Subsistema:** Nesta fase, são gerados modelos dos subsistemas do *data center*, considerando seu modo operacional. Vale ressaltar que nesta fase não foi considerado a variação de temperatura. Assim, o modelo utilizado foi o RBD por meio do método de redução para extrair um valor de MTTF de um conjunto de componentes. A partir da obtenção do MTTF é seguidamente atribuído ao modelo de Arrhenius.
7. **Geração de Modelo de Dependabilidade com Modelo Arrhenius:** compreende a geração de modelos de dependabilidade composto pelo modelo de Arrhenius. O modelo de Arrhenius computa um novo MTTF para cada dispositivo de TI de forma estática, com base na temperatura fornecida pelo modelo de energia. Seguidamente, este novo MTTF é utilizado pelo modelo SPN, para quantificar o impacto da variação de temperatura sobre a disponibilidade do sistema de TI do *data center*.
8. **Avaliação do Sistema:** Nesta fase, é quantificado o impacto da variação de temperatura na disponibilidade da infraestrutura de TI do *data center*, utilizando os modelos apresentado na fase anterior.
9. **Resultado do Sistema:** São apresentado os resultados da avaliação de todo o sistema contendo as métricas de interesses.

4.2 Modelos para Impacto de Variação de Temperatura

Esta seção apresenta os modelos para computar o impacto da variação de temperatura na sala de TI de um *data center* considerando dois aspectos: o primeiro é variação da temperatura ambiente por motivo da variação da temperatura interna, que pode ser por falha dos dispositivos do sistema de energia, sistema de refrigeração ou sistema de TI. O segundo aspecto, é pelo impacto da temperatura externa no interior do ambiente.

O efeito da variação de temperatura é uma causa muito comum de falha de um dispositivo eletrônico que, por sua vez, é normalmente projetado para funcionar dentro dos limites da temperatura especificados pelo fabricante. Os dispositivos de TI são composto por semicondutores, cuja a dissipação de energia é proporcional à corrente que percorre os elementos internos do circuito.

4.2.1 Modelo de Energia

Esta seção apresenta um modelo para avaliar o impacto da variação de temperatura na sala de TI em função de defeitos em um ou mais CRACs. O modelo também permite estimar o aumento da temperatura na sala do *data center*, após a quebra de um ou mais CRACs na sala de TI, bem como permite estimar o consumo de energia do *data center* e custo operacional ao longo de um período especificado.

A Figura 4.2 ilustra o fluxo de energia entre os sistemas de um *data center*. O sistema é representado por seus subsistemas (sistemas de energia, sistema de refrigeração e sistema de TI). As setas mostram o fluxo de energia a partir de um subsistema para outro.

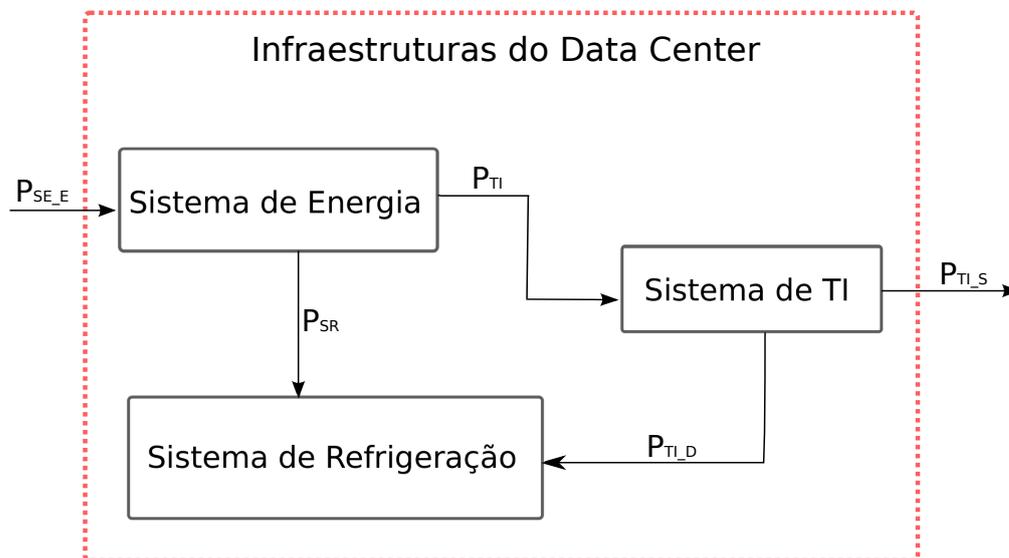


Figura 4.2 Modelo de Energia.

onde P_{TI_S} corresponde à potência útil do sistema de TI. P_{TI_D} denota o calor gerado pelo sistema de TI. Esta energia (calor) deve ser transferida pelo sistema de refrigeração para o lado externo do *data center*. P_{SR} representa a energia fornecida pelo sistema de energia para o sistema de refrigeração (sem a qual não

4.2. MODELOS PARA IMPACTO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

pode funcionar). P_{SE_E} denota a potência total demandada pelo *data center* recebida da companhia provedora de energia elétrica.

A energia consumida pelo sistema de TI em um período de tempo pode ser definida por:

$$Q_{TI} = \int_{t_1}^{t_2} P_{TI}(t)dt, \quad (4.1)$$

onde $P_{TI}(t)$ é a potência demandada pelo sistema de TI. Considerando P_{TI} uma constante, no intervalo $t_2 - t_1$, temos:

$$Q_{TI} = P_{TI} \times (t_2 - t_1). \quad (4.2)$$

Se considerarmos que P_{TI} pode ser expressa em Watts e $t_2 - t_1 = 1$ hora, Q_{TI} pode ser expresso em Watt \times hora (Wh).

A energia (calor) dissipada pelo sistema de TI é calculada por:

$$Q_{TID} = (Q_{TI} \times (1 - \eta_{TI})), \quad (4.3)$$

onde η_{TI} é a eficiência energética do sistema de TI.

Se Q_{TID} é expresso em (Wh), Q_{TID} pode ser representada em (*British Thermal Units* - BTU) multiplicando-se por um fator de 3.413. BTU é uma unidade padrão para representar sistemas de regulação da temperatura. O aumento da temperatura em uma área A_{TI} (sala de TI de um *data center*) devido à energia dissipada pelos dispositivo de TI naquele ambiente pode ser estimada por:

$$\Delta TP_H = \frac{Q_{TID}}{(A_{TI} \times h)}, \quad (4.4)$$

onde h é a condutividade térmica que consiste em uma grandeza física para medir a capacidade de um material conduzir o calor. O fator h é normalmente expresso em (W/m.K) e A_{TI} em (m^2) [41].

A temperatura ambiente (em Kelvin), sem considerar o calor extraído pelo sistemas de refrigeração, pode ser estimada por:

$$TP_{SSA} = T_A + \Delta TP_H, \quad (4.5)$$

onde T_A é (Kelvin), sem considerar o aumento da temperatura causado pelo dispositivo de TI (em Kelvin).

4.2. MODELOS PARA IMPACTO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

A diferença da temperatura (em Kelvin), que deve ser ajustado pelo sistema de refrigeração, é obtida

subtraindo-se $TP_{SSA} - T_A$, portanto:

$$\Delta TP_{SR} = TP_{SSA} - TP_T. \quad (4.6)$$

Nós restringimos o estudo a localizações geográficas com altas temperaturas, em outras palavras, para regiões em que a temperatura que desejamos manter no ambiente TP_T (sala de TI) seja menor do que no exterior.

A quantidade de calor (energia) que o sistema de refrigeração tem para transferir para fora da sala de TI é dada pela Equação 4.7:

$$Q_{SR_E} = \Delta TP_{SR} \times h \times A_{TI}. \quad (4.7)$$

Q_{SR_E} é normalmente expressa em BTUs.

A energia requerida pelo sistema de refrigeração a partir do sistema de energia é calculada por:

$$Q_{SR} = \frac{Q_{SR_E}}{\Delta t}. \quad (4.8)$$

onde COP é o coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração (*coefficient of performance*) [22]. Quando usamos o Índice de Eficiência de Energia Sazonal (*Seasonal Energy Efficiency Ratio* - SEER) em vez do COP, o último pode ser obtido através da aplicação seguinte $COP = \frac{SEER}{3.792}$. A unidade do SEER é BTU/(Wh) e denotado a quantidade de energia (calor) removida de um ambiente e a energia elétrica do sistema de refrigeração expressa em (Wh). Por exemplo, considere um sistema de refrigeração com SEER = 13 e COP = 3.42827, sendo assim, sua capacidade térmica é 3.42827 (BTU/h). A energia (calor) que o sistema de refrigeração tem de transferir para o meio ambiente exterior é normalmente expressa em BTUs, ela é convertida em (Wh), dividindo a energia em BTU por 3.413. Portanto, a potência provida pelo sistema de energia, que fornece energia ao sistema de TI e o sistema de refrigeração em um instante de tempo (t) é:

$$P_{SE_S}(t) = P_{SR}(t) + P_{TI}(t),$$

sendo $P_{SR}(t)$ a energia demandada pelo sistema de refrigeração. Caso o $P_{SR}(t)$ e $P_{TI}(t)$ sejam constantes, temos a seguinte equação:

$$P_{SE_S} = P_{SR} + P_{TI}.$$

Portanto:

$$P_{SR} = \frac{Q_{SR}}{\Delta t}.$$

Se Q_{SR} é representado em (Wh) e $\Delta t = 1$ hora, a unidade de P_{SR} é Watt.

A potência requerida pelo *data center* a um provedor de energia elétrica no momento t , pode ser calculada por:

$$P_{SR_E}(t) = \frac{Q_{SR_S}(t)}{\eta_{SE}}.$$

onde η_{SE} é a eficiência energética do sistema de energia.

Através das equações acima apresentadas e com algumas manipulações, obtém-se a seguinte expressão que descreve a temperatura da sala de TI (TP_f - em Kelvin), podendo, assim, ser encontrado o impacto da temperatura externa dentro da sala de TI, bem como a variação da temperatura dentro da sala em função de defeitos nos dispositivos do sistema de refrigeração. O P_{TI} (expresso em Watt) é uma função de potência instalada de TI, a eficiência energética do equipamento como η_{SE} , o Δt representa o período de tempo, temperatura externa com (TP_E - em Kelvin), temperatura desejada como (TP_T - em Kelvin), a área da sala de TI (A_{TI} - expressa em m^2), a potência do sistema de refrigeração (P_{CSA} - expressa em BTUs), o fator h é a condutividade térmica da parede expressa em $W/(m \cdot K)$ [24].

$$TP_f = \frac{\left((A_{TI} \times h) \times \left(\frac{(3.413 \times P_{TI} \times (1 - \eta_{TI}) \times \Delta t)}{(A_{TI} \times h)} + TP_E - TP_T \right) - P_{CSA} \right)}{(A_{TI} \times h)} + TP_T. \quad (4.9)$$

A energia consumida pelo *data center* no período $t_f - t_0$ é calculada pela Equação 4.10:

$$EC_{t_f-t_0} = \int_{t_0}^{t_f} P_{SE_E}(t) dt. \quad (4.10)$$

E o custo devido à aquisição desta energia consumida é:

$$CEC_{t_f-t_0} = \int_{t_0}^{t_f} (P_{SE_E}(t) \cdot C_E(t)) dt. \quad (4.11)$$

onde $C_E(t)$ é o custo da energia no instante t .

4.2.2 Impacto da Variação da Temperatura no dispositivo de TI - (Modelo de Arrhenius)

Esta seção apresenta a equação de Arrhenius. Esta equação expressa a dependência entre temperaturas e velocidade de reação. O modelo prevê aceleração de falha devido ao aumento da temperatura.

Em 1884, Svante Arrhenius propôs no trabalho *Recherches sur la conductibilité galvanique des électrolytes*, pela primeira vez a equação de Arrhenius (a qual recebeu seu nome) [5]. Alternativamente, expresso pela Equação 4.12:

$$r = A \times e^{\left(\frac{-E_a}{K \times TP}\right)}, \quad (4.12)$$

onde r denota a taxa de reação, TP é a temperatura absoluta (em Kelvin), em que ocorre falhas devido à ruptura dielétrica. K é a constante de Boltzmann ($8,623 \times 10^{-5}$ eVK), “ e ” é uma constante exponencial. A_f é uma constante conhecida como fator de frequência, e E_a é a energia de ativação para ruptura dielétrica de semicondutores. A ruptura dialética dos semicondutores (*gate oxide*), por sua vez, está entre a faixa (0,3eV - 0,7eV) [40]. Este trabalho usa 0,642eV [44].

A energia de ativação é definida como a energia que tem que ser ultrapassada para que uma reação química ocorra, portanto, podendo ser compreendida como a energia mínima necessária para iniciar uma reação química ou a sensibilidade da velocidade de reação para a temperatura. O fator de frequência é uma relação empírica entre a temperatura e a taxa do coeficiente. Considerando a Equação 4.12 e adicionando duas temperaturas, TP que representa a temperatura final (em Kelvin) e TP_0 que é a temperatura inicial ou temperatura desejável para o interior da sala do *data center* (em Kelvin), de tal forma que $TP > TP_0$, a Equação 4.13 é obtida:

$$MTTF_{TP} = MTTF_{TP_0} \times \left(e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{TP} - \frac{1}{TP_0}\right)}\right). \quad (4.13)$$

O arranjo da Equação 4.13 permite calcular o impacto da variação de temperatura na taxa de falha do dispositivo TI. Portanto, para um melhor esclarecimento sobre o modelo de Arrhenius, vamos adotar dois cenários. O primeiro cenário não apresenta variação de temperatura, no entanto, o segundo cenário, apresenta variação de

temperatura.

O primeiro cenário é representado pela Equação 4.14, onde é considerado um *router* com MTTF de 448.000, a temperatura final no valor de $TP = 293.15$ (Kelvin), e a temperatura inicial no valor de $TP_0 = 293.15$ (Kelvin), a energia de ativação no valor de $0,642\text{eV}$, e a constante de Boltzmann ($8,623 \times 10^{-5}$ eVK). Por sua vez, concluímos que não ocorreu variação no tempo de falha do *router*.

$$MTTF_{TP} = 448.000 \times \left(e^{\frac{0,642}{8,617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{293.15} - \frac{1}{293.15} \right)} \right) = 448.000. \quad (4.14)$$

O segundo cenário apresentado pela Equação 4.15 considera a variação de temperatura, onde é similar ao primeiro cenário, mas diferente por conter a temperatura final no valor de $TP = 297.02610$ (Kelvin). Neste segundo cenário concluímos que houve uma variação no tempo de falha do *router* em função da variação de temperatura.

$$MTTF_{TP} = 448.000 \times \left(e^{\frac{0,642}{8,617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{297.02610} - \frac{1}{293.15} \right)} \right) = 321.619. \quad (4.15)$$

4.2.3 Modelo RBD para componentes em Paralelo

O modelo RBD mostra as conexões lógicas entre os componentes de um sistema e permite visualizar a relação existente entre a confiabilidade e disponibilidade geral do sistema em estudo e a confiabilidade e disponibilidade de cada um de seus componentes, como explicado em melhores detalhes no Capítulo 2.

Para avaliação de confiabilidade e disponibilidade de um sistema (por exemplo, uma arquitetura de TI) deve-se ter uma definição do que constitui um defeito. Assim, o sistema pode ter definido diferentes probabilidades para a ocorrência da falha, em que é necessária a construção de diferentes RBD para cada situação. Figura 4.3 ilustra um exemplo de funcionamento de um *rack* composto por 6 servidores, onde um defeito é configurado somente se todos os servidores falharem. A partir desta lógica de falha, é concebido um modelo RBD.

Figura 4.4 mostra um modelo RBD paralelo dos componentes apresentados na Figura 4.3. O modelo paralelo foi definido pois o *rack* só apresenta um defeito se todos os servidores falharem. Para o modelo da Figura 4.4, são utilizado os valores de 120.000 horas para os MTTF e 8 horas para os MTTRs de todos os servidores. A partir deste modelo, assume-se que todos os servidores possuem as mesmas características e atendem a uma situação de lógica de falha proposta.

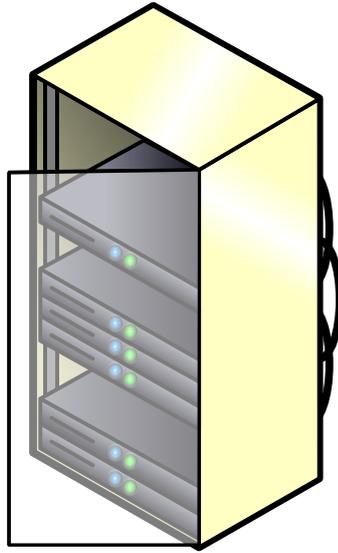


Figura 4.3 Componentes do *Rack*.

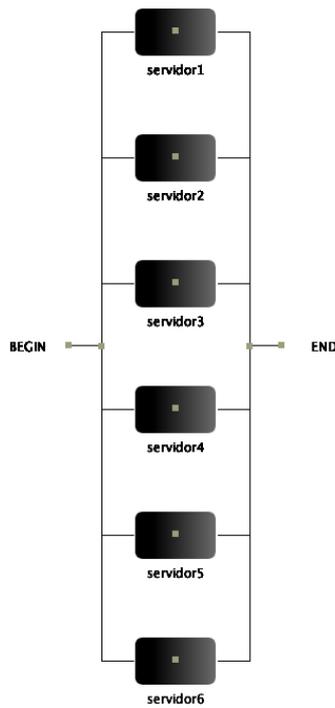


Figura 4.4 Modelo RBD para um *Rack*.

Assim, a Equação 4.16 permitiu computar o MTTF do *rack* [43]. Logo após ser obtido este valor, é seguidamente atribuído ao modelo SPN para computar a disponibilidade na infraestrutura de TI.

$$E[x] = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = \frac{H_n}{\lambda} \simeq \frac{1n(n)}{\lambda} \quad (4.16)$$

onde $E[x]$ representa o MTTF do sistema paralelo (*rack*). λ é taxa de falha de cada componente i para $i = 1, 2, 3, \dots, n$. H_n é a soma parcial de uma série de componentes (série harmônica). \ln é logaritmo neperiano de n componentes.

4.2.4 Modelo SPN

O modelo SPN permite relacionar a dependência entre as infraestruturas de refrigeração e de TI. Considere duas situações: (i) o aumento do número de dispositivo de TI conduz a um aumento do calor produzido, conseqüentemente, a temperatura do ambiente aumenta, (ii) falha de unidades de CRACs reduz a capacidade de refrigeração. Em ambas as situações, a temperatura aumenta, conseqüentemente, a disponibilidade do sistema é reduzida.

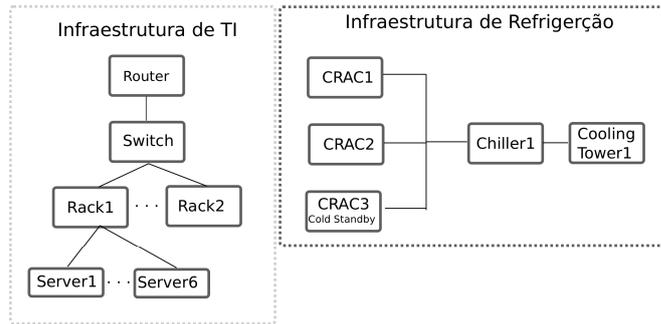
Para uma melhor compreensão, foram definidos três cenários por meio da ferramenta *Power Advisor* [33], seguidamente foram criados os seus respectivos modelos SPN. Assim, este três cenários tem como objetivo único auxiliar em um melhor entendimento sobre os modelos SPN, considerando dependência.

A Figura 4.5 mostra a configuração C1 base em uma visão de alto nível composta por duas arquiteturas, sendo que a arquitetura de TI contém quatro dispositivos (um *router*, um *switch* e dois *racks*, cada um contendo seis servidores) e a arquitetura de refrigeração é composta por cinco dispositivos (um *cooling tower*, um *chiller* e três unidades CRACs).

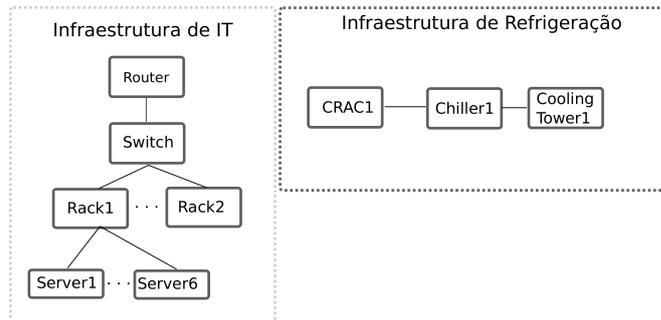
Nesta configuração, não existe variação da temperatura sobre o sistema de TI, pois todo o calor gerado pelos dispositivos é removido pelo sistema de refrigeração. Neste cenário, considera-se que o sistema de refrigeração opera em sua capacidade máxima.

Outras duas configurações foram derivadas da configuração C1, considerando-se diferentes arquiteturas de refrigeração e TI. C2 é similar a C1, mas com duas unidades de CRACs a menos. C3 comparado com C1, contém duas unidades de *rack* a mais. Figura 4.6 mostra o modelo SPN da configuração C1, a arquitetura de TI é ilustrada pela linha tracejada na cor cinza e a arquitetura de refrigeração pelas linhas tracejadas na cor preto.

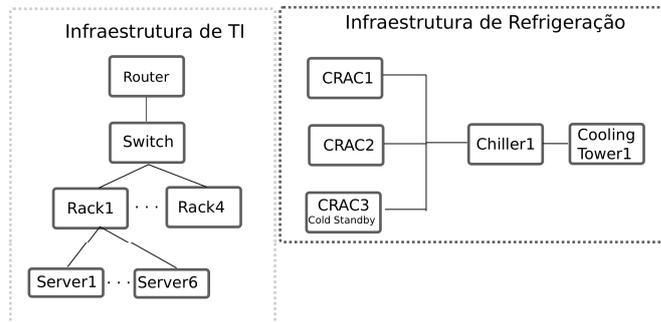
4.2. MODELOS PARA IMPACTO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA



(a) Configuração (C1),



(b) Configuração (C2),



(c) Configuração (C3).

Figura 4.5 Configurações de *Data Center*.

A Figura 4.7 apresenta a sub-rede da configuração C1, a marca atribuída ao lugar *Switch_ON* indica que um dispositivo está ativo, caso contrário, está inativo. Da mesma forma, os dois *tokens* no lugar *Rack_ON* representam os dois *racks*, esta mesma representação serve para todos os dispositivos. As transições exponencial *F_Router* e *R_Router* servem para representar momentos críticos do sistema, que podem ser por erros ou defeitos. O tempo associado a *F_Router* recebe uma expressão condicional com a equação de Arrhenius e, conseqüentemente, um MTTF de acordo com a temperatura do ambiente.

4.2. MODELOS PARA IMPACTO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

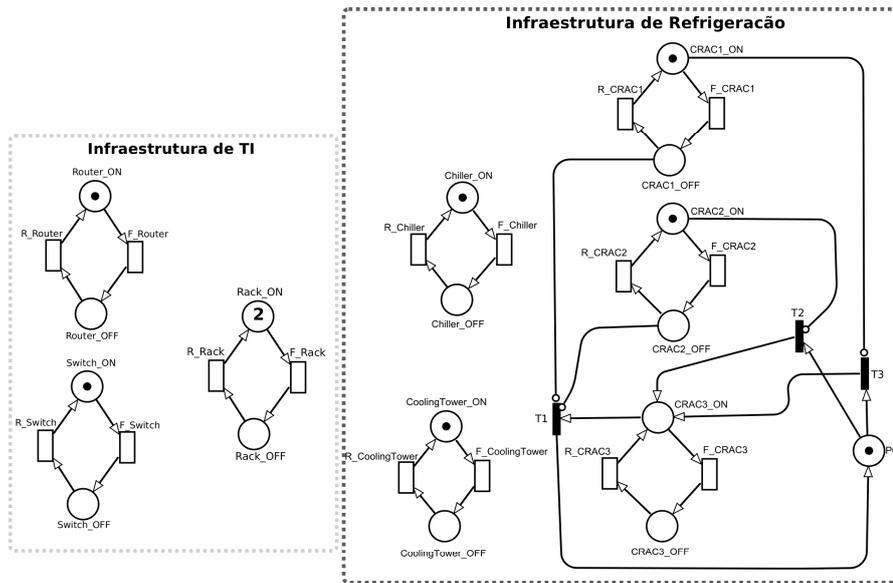


Figura 4.6 Modelo SPN da Configuração C1.

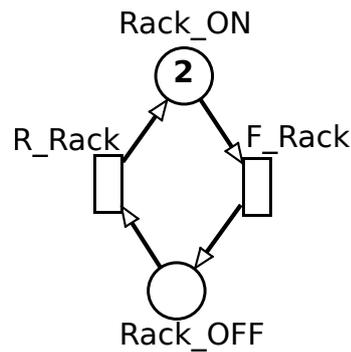


Figura 4.7 Sub-Rede SPN da Configuração C1.

O tempo médio de reparo (MTTR) foi considerado o mesmo para todos os dispositivos de TI, no entanto, o MTTF dos equipamentos depende da variação de temperatura ambiente. Por exemplo, se a temperatura estiver a 20 *graus Celsius*, o equipamento recebe o MTTF padrão, caso contrário, o novo MTTF é calculado pelo modelo de Arrhenius. MTTFs e MTTRs padrão adotados estão presentes na Tabela 4.1, onde foram obtidos em [14] [32] [18] [19] [17].

4.2. MODELOS PARA IMPACTO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Tabela 4.1 Parâmetros das infraestruturas de TI e Refrigeração.

Equipamento	MTTF(horas)	MTTR(horas)
<i>RouterBorder</i>	448.000	8
<i>Router</i>	276.060	8
<i>Switch</i>	215.000	8
<i>Rack com 6 servidores</i>	294.000	8
<i>Chiller</i>	18.000	48
<i>CoolingTower</i>	24.816	48
<i>CRAC</i>	37.059	8

A Tabela 4.2 mostra a expressão atribuída à transição F_Router , F_Switch , F_Rack , a qual tem uma relação de interdependência entre as infraestruturas de TI e refrigeração. A expressão é composta por $NM=4$ que representa quatro dispositivos de TI ativos, logo após, é expressa a relação de funcionamento dos dispositivos de refrigeração. Por exemplo, $\#CRAC1_ON = 1$, significa que CRAC1 está ativo, enquanto $\#CRAC1_ON = 0$ significa que ele está inativo. Isto é realizado através de uma expressão a partir do primeiro IF, verificando-se o funcionamento de todos os dispositivos. No caso de todos os dispositivos estarem funcionando, as transições F_Router , F_Switch , F_Rack recebem o MTTFs padrão. Caso contrário, estas transições terão um novo MTTF calculado pela equação de Arrhenius (Equação 4.13). A disponibilidade é calculada pela probabilidade $P\{(\#F_Router_ON = 1) \text{ and } (\#F_Switch_ON = 1) \text{ and } (\#F_Rack_ON = 2)\}$.

Tabela 4.2 Atributos de Transição.

Transição	Tipo	Tempo e Peso	Prio	SS
F_Router , F_Switch F_Rack	Ex	IF (NM=4) AND ($\#Chiller_ON=1$ AND $\#CoolingTower_ON=1$) AND (($\#CRAC1_ON=1$ AND $\#CRAC2_ON=1$ AND $\#CRAC3_ON=0$) OR ($\#CRAC1_ON=1$ AND $\#CRAC2_ON=0$ AND $\#CRAC3_ON=1$) OR ($\#CRAC1_ON=0$ AND $\#CRAC2_ON=1$ AND $\#CRAC3_ON=1$)):MTTF ELSE :MTTF $\times\{(E_a/k)EXP(1/TP - 1/TP_0)\}$	---	SS SS IS
F_CRAC1 F_CRAC2 F_CRAC3 $F_Chiller$ $F_CoolingTower$	Ex	MTTF	---	SS
R_Router , R_Switch R_Rack	Ex	MTTR	---	SS
F_CRAC1 F_CRAC2 F_CRAC3 $F_Chiller$ $F_CoolingTower$	Ex	MTTF	---	SS
T1, T2, T3	Im	1	1	---

Abreviações: Ex: Exponencial, Im: Imediato, Prio: Prioridade, SS: Single Server, Infinite Server.

4.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a metodologia adotada neste trabalho. Em seguida, o modelo de energia para obter a variação de temperatura ambiente. Também foi apresentado o modelo de Arrhenius para calcular o impacto da variação de temperatura no tempo de falha (MTTF) do dispositivo de TI. Posteriormente foram mostrados os conceitos e modelo RBD concebido. Além disso, são apresentadas as expressões algébricas do modelo RBD para computar o MTTF do sistema paralelo (*rack* paralelo). Por último, é descrito o modelo SPN para relacionar a interdependência entre as infraestruturas do *data center*, bem como avaliar impacto da variação de temperatura na disponibilidade da infraestrutura de TI do *data center*.

5

Estudo de Caso

Neste capítulo serão apresentados três estudos de casos para mostrar aplicabilidade de um conjunto de modelos proposto, assim, tem-se como objetivo avaliar o impacto da variação da temperatura sobre a disponibilidade do sistema de TI do *data center*. Portanto, todas as etapas da metodologia foram utilizadas para auxiliar na avaliação desses estudos.

O primeiro estudo tem como objetivo quantificar o impacto do sistema de refrigeração sobre sistema de TI. O segundo estudo avalia o impacto do sistema de TI no sistema de refrigeração. Em ambos os estudos ocorre variação de temperatura ambiente, onde por sua vez, leva a uma redução da disponibilidade.

O terceiro estudo adota métricas de custo e lucro, a fim de demonstrar como computar perdas financeiras de uma companhia, proveniente da variação de temperatura ambiente do *data center*. Para tal, assume-se um *data center* de uma empresa de hotelaria para representar meios de como calcular o impacto da variação de temperatura sobre a disponibilidade do sistema de TI, considerando as métricas de custo e lucro.

A avaliação é feita para os três estudos de casos por meio de análise estacionária, onde os *software* utilizados para análise foram SHARPE [38] para modelagem RBD e o TimeNet [51] para os modelos de SPN.

5.1 Estudo de Caso I

O principal objetivo deste estudo de caso é quantificar o impacto do sistema de refrigeração sobre a disponibilidade do sistema de TI. Para tanto, é considerado oito diferentes configurações de *data center*, onde cada configuração é composto por arquitetura de TI e arquitetura de refrigeração. Além disso, foram considerados

na avaliação as métricas de disponibilidade e *downtime*.

5.1.1 Arquiteturas

A configuração C1 base, ilustrada em uma visão de alto nível na Figura 5.1, foi definida a partir do *software* da HP *Power Advisor* [33], onde C1 consiste em uma arquitetura de TI com 51 dispositivos (um *router border*, um *router*, nove *switches* e 40 *racks*, cada uma contendo dez servidores) e a arquitetura de refrigeração composta por oito dispositivos (um *cooling tower*, um *chiller* e seis unidades CRACs). Nesta configuração, não há variação da temperatura e, conseqüentemente, não há variação da disponibilidade do sistema de TI por esta causa, pois todo o calor gerado pelo dispositivo de TI é removido pelo sistema de refrigeração.

Outras sete configurações foram derivadas a partir da configuração C1, considerando-se diferentes arquiteturas de refrigeração e diferentes níveis de redundância. A mudança de temperatura na sala do *data center* também é considerada. A falha da unidade de CRAC resulta no funcionamento imperfeito do sistema de refrigeração, o que afeta a temperatura da sala. O aumento desta temperatura afeta diretamente a disponibilidade do sistema de TI.

A configuração C1 possui um sistema de refrigeração que atende todo o calor produzido pelo sistema de TI, no entanto, as demais configurações (C2, C3 e C4) apresentam falha nas unidades de CRACs, o que leva ao um aumento de temperatura ambiente. C2 é C1 sem o CRAC em *cold stantby*, C3 tem quatro CRACs ativos e C4 tem apenas três. A configuração C5 corresponde a C1 incrementado por um *chiller* e um *cooling tower* redundante. Os CRACs são progressivamente removidos das arquiteturas subsequentes (C6, C7 e C8) de um modo semelhante, como acima.

5.1.2 Modelos

A equação 4.9 estima a variação de temperatura na sala do *data center* considerando a potência demandada pelo dispositivos de TI, a potência da capacidade do sistema de refrigeração e as respectivas falhas dos dispositivos de refrigeração. Tabela 5.1 apresenta a potência do sistema de refrigeração (P_{CSA} em BTU/h) para cada configuração. Para computar a variação de temperatura, é necessário definir: a potência demandada do sistema de TI ($P_{TI} = 125.742,40$ W), a condutividade térmica (h) da parede ($1,73$ W/(m · K)) [24], a área ($A_{TI} = 400,00$ m²) da sala do *data center*, a eficiência energética de todos os dispositivos de TI (adotou-se $\eta_{TI} = 0,95\%$) e o período de análise (considerou-se 1 hora). Assim todos sistemas de refrigeração deve extrair 64373,82 BTU/h produzidos pelo sistema de TI.

No entanto, as configurações que apresentam falha de unidades de CRACs não conseguem extrair todos este calor, o que leva ao aumento de temperatura ambiente. Portanto, a temperatura na sala do *data center* aumenta quando menos de cinco CRACs são utilizados. A Tabela 5.2, mostra a temperatura ambiente referente a quantidade de CRACs.

Tabela 5.1 A Potência do Sistema de Refrigeração em Cada Configuração.

Configurações	P_{CSA} (BTU/h)
C1	64373,82
C2	64373,82
C3	51499,06
C4	38624,29
C5	64373,82
C6	64373,82
C7	51499,06
C8	38624,29

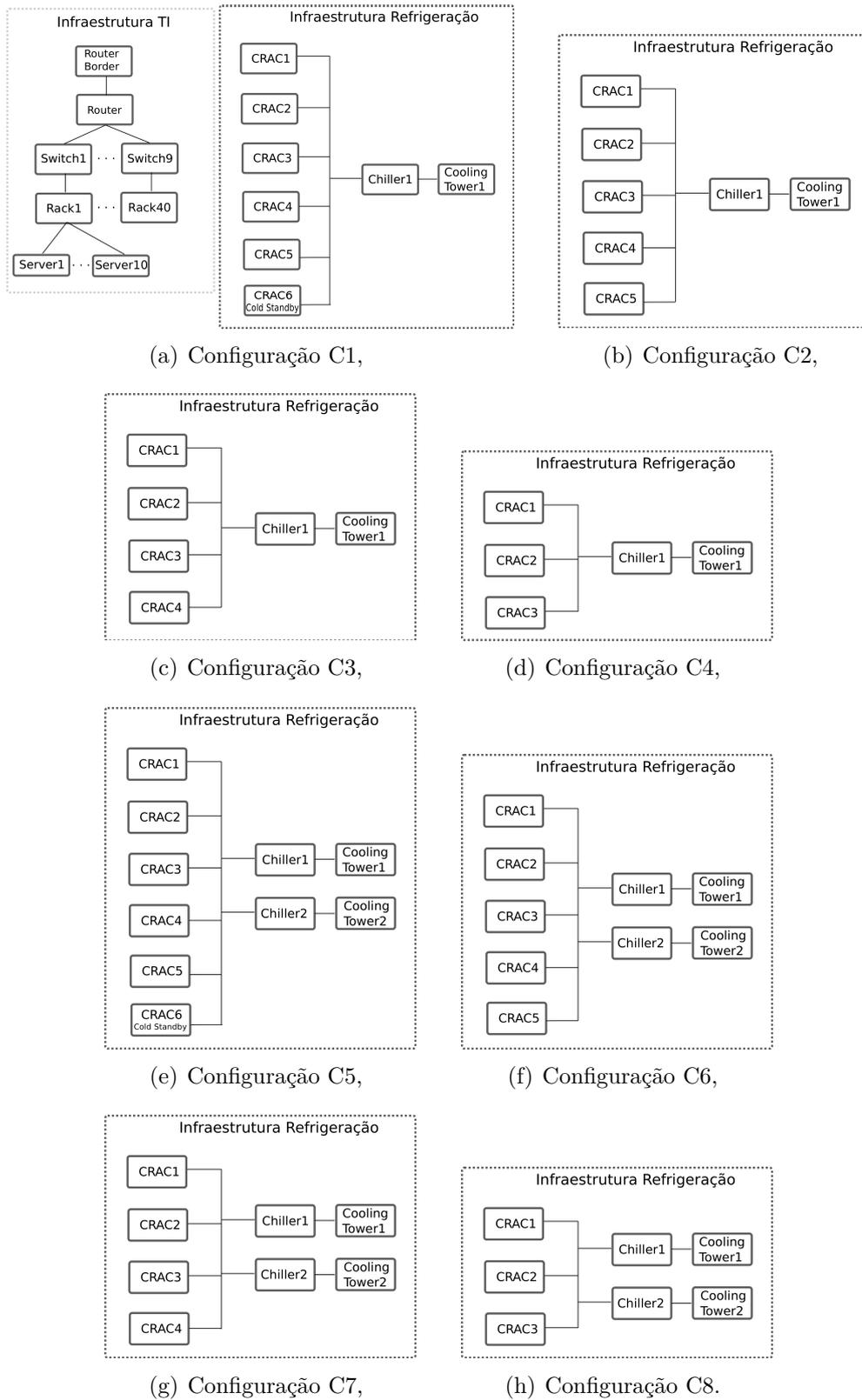


Figura 5.1 Configurações do *Data Center*.

Tabela 5.2 Temperatura Ambiente.

Temperatura Ambiente	Numero de CRACs ativos
20,0° <i>Celsius</i>	5
26,2° <i>Celsius</i>	4
32,4° <i>Celsius</i>	3

A Figura 5.2 e a Tabela 5.4 mostram o modelo SPN da configuração C1. Os valores de MTTFs e MTTRs padrão são apresentados na Tabela 5.3, onde foram obtidos em [14] [32] [18] [19] [17]. No modelo SPN, o sistema é ilustrado pela linha tracejada na cor cinza e o sistema de refrigeração pelas linhas tracejadas na cor preta. Os nove *tokens* no lugar *Switch_ON* representam os nove *switches*. Da mesma forma, os *tokens* no lugar *Rack_ON* representam os *racks* do sistema. Modelos semelhantes foram criados para avaliar as outras sete arquiteturas.

Tabela 5.3 Parâmetros das infraestruturas de TI e Refrigeração.

Equipamento	MTTF _(horas)	MTTR _(horas)
<i>RouterBorder</i>	448.000	8
<i>Router</i>	276.060	8
<i>Switch</i>	215.000	8
<i>Rack</i> com 10 servidores	351.476	8
<i>Chiller</i>	18.000	48
<i>CoolingTower</i>	24.816	48
<i>CRAC</i>	37.059	8

Os atributos adicionados às transições de falha dos dispositivos de TI incluem duas instruções condicionais, que são apresentados na Tabela 5.4. A primeira condição se refere ao funcionamento dos dispositivos de TI e a segunda, ao funcionamento dos dispositivos de refrigeração. Por exemplo, NM=2 significa que tem dois dispositivos de TI ativos, #CRAC1_ON = 1, significa que o CRAC1 está ativo e CRAC1_ON=0 significa que ele está inativo. Por ultimo é inserido a Equação de Arrhenius 4.13, onde é utilizada para calcular o impacto da variação de temperatura no tempo médio de falha do dispositivo de TI, um novo valor do MTTF. Além destas, também são apresentadas as transições de reparo e falha dos dispositivos de refrigeração.

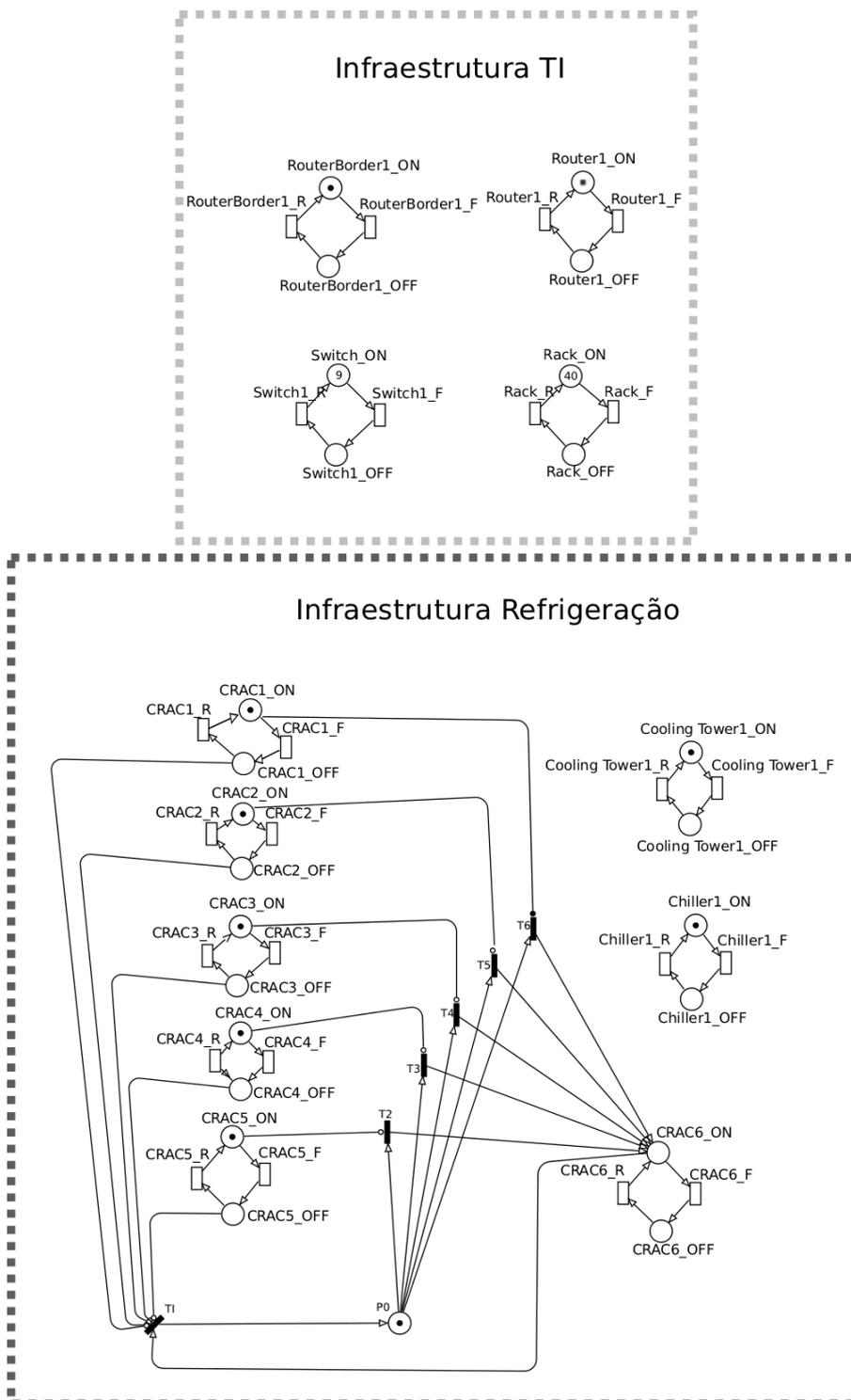


Figura 5.2 Modelo SPN para Configuração C1.

Tabela 5.4 Atributos das Transições.

Transição	Tipo	Tempo ou Peso	Prio	SS
RouterBorder1_F, Router1_F.	Ex	IF(NM=51)AND(#Chiller1_ON=1)AND(#CoolingTower1_ON=1) AND ((#CRAC1_ON=0 AND #CRAC2_ON=1 AND #CRAC3_ON=1 AND #CRAC4_ON=1 AND #CRAC5_ON=1 AND #CRAC6_ON=1) OR (#CRAC1_ON=1 AND #CRAC2_ON=0 AND #CRAC3_ON=1 AND #CRAC4_ON=1 AND #CRAC5_ON=1 AND #CRAC6_ON=1) OR (#CRAC1_ON=1 AND #CRAC2_ON=1 AND #CRAC3_ON=0 AND #CRAC4_ON=1 AND #CRAC5_ON=1 AND #CRAC6_ON=1) OR (#CRAC1_ON=1 AND #CRAC2_ON=1 AND #CRAC3_ON=1 AND #CRAC4_ON=0 AND #CRAC5_ON=1 AND #CRAC6_ON=1) OR(#CRAC1_ON=1 AND #CRAC2_ON=1 AND #CRAC3_ON=1 AND #CRAC4_ON=1 AND #CRAC5_ON=0 AND #CRAC6_ON=1) OR(#CRAC1_ON=1 AND #CRAC2_ON=1 AND #CRAC3_ON=1 AND #CRAC4_ON=1 AND #CRAC5_ON=1 AND #CRAC6_ON=0)) :MTTF×((E _a /k)EXP(1/TP - 1/TP ₀))} ELSE (250);	---	SS
	Ex		---	SS
Switch1_F, Rack_F.	Ex		---	IS
	Ex		---	IS
RouterBorder1_R, Router1_R, Switch1_R, Rack_R.	Ex	MTTR	---	SS
T1,T2, T3, T4, T5, T6	Im	1	1	---
CRAC1_F . . . CRAC6_F Chiller1_F Cooling Tower_F	Ex	MTTF	---	SS
CRAC1_R . . . CRAC6_R Chiller1_R Cooling Tower_R	Ex	MTTR	---	SS

Abreviaturas: Ex: Exponencial, Im: Imediato, Prio: Prioridade, SS: Single Server, IS: Infinite Server, E_a : Energia de Ativação, k : constante de Boltzmann, TP : Temperatura Final, TP_0 : Temperatura Inicial.

Para o cálculo da disponibilidade, três modos operacionais foram considerados. No primeiro modo (MO1), a disponibilidade é calculada supondo-se que todos os dispositivos de TI devem estar funcionando. No segundo (MO2), o sistema é considerado operacional se todos os dispositivos de rede (*router border*, *router* e *switch*) e pelo menos 30 *racks* estiverem funcionando. No terceiro modo operacional (MO3), todos os dispositivos de rede e no mínimo 20 *racks* devem estar funcionando.

A Tabela 5.5 contém as expressões para quantificar a disponibilidade em cada modo operacional. Por exemplo, na linha MO1 tem-se a expressão para o cálculo da disponibilidade do modo operacional MO1. Essa expressão representa a probabilidade de que os lugares *RouterBorder_ON* e *Router_ON* tenham um *token* cada, o lugar *Switch1_ON* tenha nove *tokens* e o lugar *Rack1_ON* tenha quatro *tokens*.

Tabela 5.5 Expressões para Quantificar a Disponibilidade.

MO	Expressões de Probabilidade
MO1	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } (\#Rack1_ON = 40)\};$
MO2	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 30) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 40))\};$
MO3	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 20) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 30) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 40))\};$

Abreviaturas: MO - Modo Operacional.

5.1.3 Resultados

Tabela 5.6 apresenta um resumo dos resultados das configurações avaliadas em cada modo operacional (MO1, MO2 e MO3). Nesta tabela, as métricas disponibilidade, disponibilidade em número de noves ($-\log [1-A/100]$)[14] e *downtime* (em 1 ano).

Como esperado, o *downtime* aumenta quando a temperatura se eleva. Por exemplo, adotando-se MO1, *downtime* de C4 (quando comparado com C1) aumentou 2.024 horas, e o de C8 (em comparação com C5) aumentou para 2.035 horas. Quando se considera MO2, o *downtime* de C4 (em comparação com C1) e C8 (em comparação com C5) aumentaram em 1.851 e 1.861 horas, respectivamente. Os resultados mostram claramente que o aumento da temperatura ambiente pode levar a perdas financeiras para empresa como consequência do respectivo impacto no *downtime*.

Tabela 5.6 Resumo dos Resultados das Configurações.

Configurações	MO	Disponibilidade (9s)	<i>Downtime</i> (h)
C1	MO1	99,93601 (3,194)	5,606
C2		99,92270 (3,112)	6,772
C3		99,91956 (3,095)	7,047
C4		99,91290 (3,060)	7,630
C5		99,99146 (4,068)	0,748
C6		99,97815 (3,660)	1,914
C7		99,97492 (3,601)	2,197
C8		99,96823 (3,498)	2,783
C1	OM2	99,94919 (3,294)	4,451
C2		99,93910 (3,215)	5,335
C3		99,93533 (3,189)	5,665
C4		99,92806 (3,143)	6,302
C5		99,99151 (4,071)	0,744
C6		99,98142 (3,731)	1,627
C7		99,97758 (3,649)	1,964
C8		99,97027 (3,53)	2,604
C1	OM3	99,94955 (3,297)	4,419
C2		99,93951 (3,218)	5,299
C3		99,93573 (3,192)	5,630
C4		99,92845 (3,145)	6,268
C5		99,99151 (4,072)	0,743
C6		99,98148 (3,732)	1,623
C7		99,97762 (3,650)	1,961
C8		99,97030 (3,527)	2,602

Abreviaturas: MO- Modo Operacional.

A Figura 5.3 mostra uma comparação gráfica da disponibilidade de cada configuração nos três modos operacionais. O gráfico demonstra que C1 e C5 são opções interessantes, visto que suas disponibilidades são superiores às outras configurações.

Observe também o impacto da falha nas unidades de CRACs na disponibilidade do sistema de TI. Quando o sistema de refrigeração estiver funcionando com unidades CRACs insuficientes, o sistema de refrigeração não é capaz de extrair calor gerado pelos dispositivos de TI, o que provoca o aumento de temperatura.

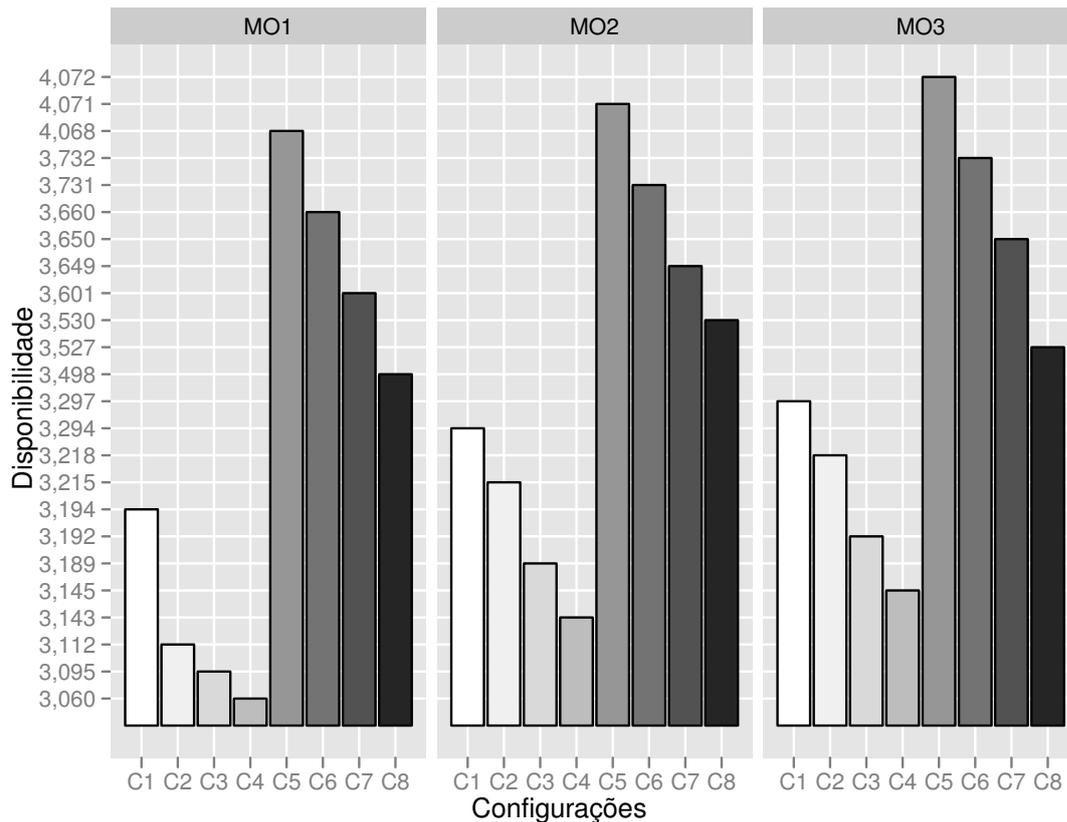


Figura 5.3 Resultados do Primeiro Estudo: Disponibilidade(9s) de cada configuração.

5.2 Estudo de Caso II

O segundo estudo de caso computa o impacto do sistema de TI sobre o sistema de refrigeração. A partir deste impacto é elevado a temperatura ambiente, que por sua vez, reduz a disponibilidade do sistema de TI do *data center*. Portanto, foram considerados três diferentes configurações de *data center*, onde cada configuração é composto por uma arquitetura de TI e outra arquitetura de refrigeração. Além disso, foram considerados na avaliação as métricas de disponibilidade e *downtime*.

5.2.1 Arquiteturas

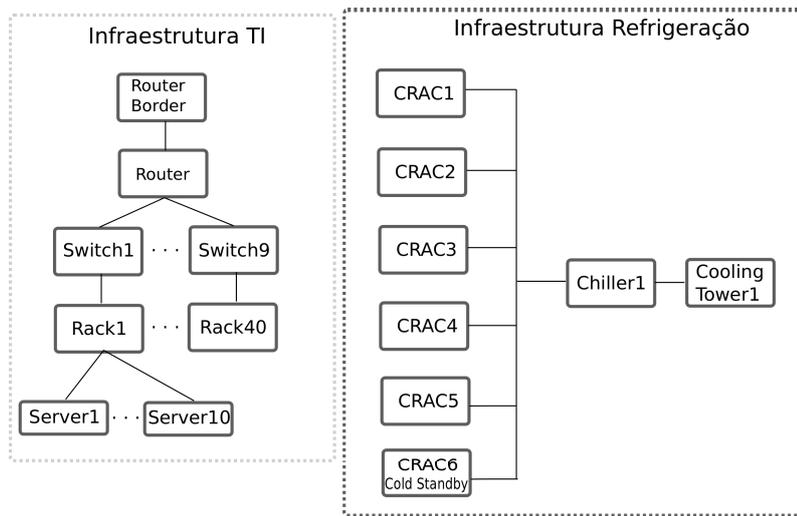
A Figura 5.4 ilustra em uma visão de alto nível das três configurações do *data center*, onde foram definida a partir do *software* da HP *Power Advisor* [33]. A partir da configuração C1 base, que é semelhante a C1 apresentado no estudo anterior, outras duas configurações são geradas com diferentes níveis de redundância nas infraestruturas de TI. O sistema de refrigeração permanece o mesmo em todas as configurações.

Como explicado anteriormente, a infraestrutura de TI da configuração C1 é composta por 51 dispositivos (1 *router border*, 1 *router*, 9 *switch*, e 40 *racks*, em que cada *rack* é composto por 10 servidores), infraestrutura de refrigeração é composta por oito dispositivos (1 *cooling tower*, 1 *chiller*, e 6 unidades de CRACs). C2 corresponde a C1, com mais 10 *racks*, e C3 é C1 com a adição de 20 *racks*.

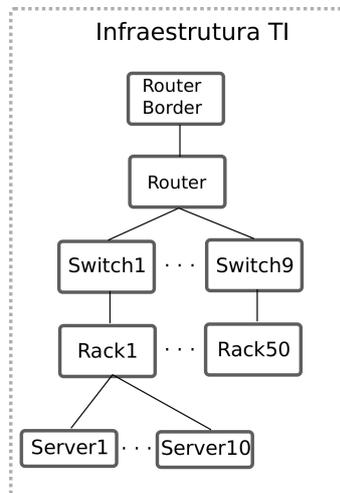
Nós assumimos que C1 opera em uma temperatura ambiente de 20 graus Celsius, isso porque todo o calor produzido pelo sistema de TI é extraído pelo sistema de refrigeração. Em C2 e C3, a capacidade térmica do sistema de refrigeração é excedida devido ao aumento do número de *racks*. O resultado é o aumento da temperatura ambiente, o que afeta diretamente o sistema de TI. O modelo SPN estima o impacto da variação da temperatura sobre a disponibilidade do sistema de TI.

5.2.2 Modelos

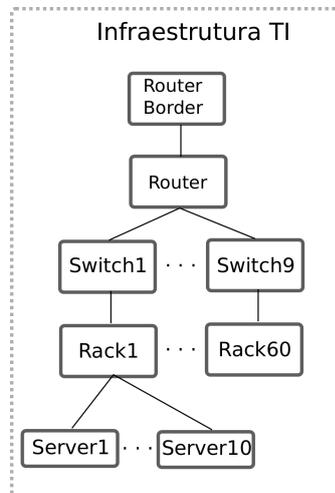
A Tabela 5.7 apresenta a potência demandada do sistema de TI (P_{TI}) para cada configuração. Além disso, é considerada a mesma potência do sistema de refrigeração para todas as configurações, que é 64373,82 (BTU/h). A eficiência energética adotada, a condutividade térmica da parede considerada, a temperatura ambiente, e a área são equivalentes ao apresentado no estudo anterior.



(a) Configuração C1,



(b) Configuração C2,



(c) Configuração C3.

Figura 5.4 Configurações do *Data Center*.

Tabela 5.7 Parâmetros Modelo de Energia.

Configuração	P_{TI} (Watt)
C1	125742,40
C2	141460,20
C3	157178,00

A Tabela 5.8 apresenta a temperatura da sala do *data center*, referente a cada configuração. Assume-se que o sistema de refrigeração de C1 opera em sua capacidade máxima para retirar todo o calor produzido pelo sistema de TI. Assim, a temperatura ambiente permanece em 20 graus Celsius. No entanto, C2 e C3 apresentam falha nos CRACs, o que impede a retirada de todo o calor do ambiente, conseqüentemente, ocorre uma elevação na temperatura ambiente. Com base nos valores de temperatura da Tabela 5.8, calculam-se os novos MTTFs.

Tabela 5.8 Temperatura da sala do *Data Center*.

Configurações	Temperatura
C1	20,0° <i>Celsius</i>
C2	23,9° <i>Celsius</i>
C3	27,8° <i>Celsius</i>

O modelo SPN concebido para o estudo de caso II é similar ao estudo de caso I, mas adota diferentes expressões para computar a disponibilidade. Assim, não é apresentado a figura do modelo SPN referente ao segundo estudo, por ser semelhante ao primeiro estudo. O modelo também permite relacionar a interdependência nas infraestruturas de TI e refrigeração.

A disponibilidade foi computada considerando-se três modos operacionais. O modo MO1, define que o sistema está operacional se todos os dispositivos de TI estiverem funcionando para as três configurações. O modo MO2 define que C1 está operacional se todos os dispositivos de rede estiverem ativos e pelo menos 30 *racks* estiverem funcionais; C2 está funcional, se todos os dispositivos de rede estiverem ativos e pelo menos 40 *racks* estiverem funcionando; e C3 está operacional se todos os dispositivos estiverem funcionando e pelo menos 50 *racks* ativos. Da mesma forma, o modo operacional MO3 define que o sistema está operacional se a

configuração C1 tiver pelo menos 20 *racks* ativos, C2 pelo menos 30 *racks* ativos, C3 pelo menos 40 *racks* ativos, além de todos os dispositivos de rede ativos. A Tabela 5.9 apresenta as expressões das disponibilidade em cada modo operacional.

Tabela 5.9 Expressões para Quantificar a Disponibilidade.

Conf	MO	Expressões de Probabilidade
C1	MO1	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } (\#Rack1_ON = 40)\};$
C1	MO2	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 30) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 40))\};$
C1	MO3	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 20) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 30) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 40))\};$
C2	MO1	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } (\#Rack1_ON = 50)\};$
C2	MO2	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 40) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 50))\};$
C2	MO3	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 30) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 40) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 50))\};$
C3	MO1	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } (\#Rack1_ON = 60)\};$
C3	MO2	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 50) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 60))\};$
C3	MO3	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 1) \text{ AND } (\#Switch1_ON = 9) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 40) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 50) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 60))\};$

Abreviaturas: MO - Modo Operacional; Conf - Configurações.

Tabela 5.10 Resumo dos Resultados das Configurações.

Conf	MO	Disponibilidade (9s)	Downtime (h)
C1		99,93601 (3,194)	5,606
C2	MO1	99,93267 (3,172)	5,898
C3		99,92823 (3,144)	6,287
C1		99,94919 (3,294)	4,451
C2	MO2	99,94587 (3,267)	4,742
C3		99,94144 (3,232)	5,130
C1		99,94955 (3,297)	4,419
C2	MO3	99,94623 (3,269)	4,710
C3		99,94180 (3,235)	5,099

Abreviaturas: Conf - Configurações; MO - Modo Operacional.

5.2.3 Resultados

A Tabela 5.10 apresenta os resultados para as configurações analisadas em cada modo operacional. As configurações C2 e C3 apresentam aumento no *downtime* comparado com C1. Isto ocorreu devido ao impacto da variação de temperatura. A temperatura ambiente em C2 e C3 vai de 20,0° *Celsius* para 23,9° *Celsius* e 27,8° *Celsius*.

O modo OM1, C2 tinha aumentado o tempo de *downtime* em 0,292 horas, e em C3 o aumento foi de 0,681 horas (em comparação com C1). No modo OM2, C2 e C3 apresentam aumentos de tempo de *downtime* de 0,291 e 0,679 horas, respectivamente, quando comparado com C1. O modo OM3, C2 tinha aumentado o tempo de *downtime*, em 0,290 horas e em C3 do aumento em tempo de *downtime* foi 0,679 horas (em comparação com C1). Portanto, a adição de dispositivos de TI pode aumentar a temperatura do *data center*, bem como reduzir a disponibilidade do sistema de TI.

A Figura 5.5 ilustra os resultados de disponibilidade, em número de noves (9s) de cada de configuração nos modos operacionais. Os resultados aqui apresentados mostram o impacto da variação da temperatura sobre a disponibilidade do sistema informático. As configuração C1 é uma alternativa interessante a ser adotada, devido ao fato de que de ter o melhor índice de disponibilidade.

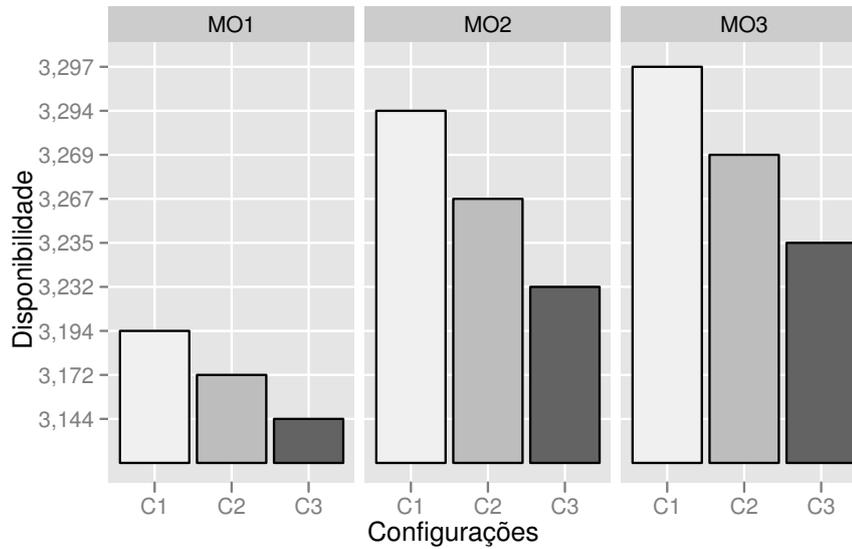


Figura 5.5 Resultado do Segundo Estudo de Caso: Disponibilidade(9s) de Cada Configuração.

5.3 Estudo de Caso III

Este estudo de caso concentra-se na avaliação do impacto da variação de temperatura na disponibilidade do sistema de TI do *data center*, considerando as métricas de custo e lucro. Além de disponibilidade e *downtime*.

Para tal, foi adotado o cenário de um *data center* de uma empresa de hotelaria, levando em conta valores financeiros de custo e lucro que a empresa tem em função da venda de reserva de quarto por meio de seu sistema *online*, que por sua vez, este sistema encontra-se em seu *data center*. Este estudo assumiu que a empresa de hotelaria, é composto por 5 funcionários que prestam suporte ao *data center*, aos quais cada um recebe um valor mensal de \$5.000,00, em que resulta em uma despesa de \$240.000,00 anual para a companhia. A empresa recebe seu faturamento por meios de um sistema de reserva *online* de quartos, onde são considerados a venda de 2 reservas por horas, onde cada reserva custa 120,00 dólares. O custo da energia elétrica para funcionamento do *data center* foi de \$0,11 por kWh. Portanto, este estudo avalia oito diferentes configurações de *data center*, onde cada configuração é composta por uma arquitetura de TI e outra de refrigeração.

5.3.1 Métricas de Custo e Lucro

Esta seção apresenta os aspectos de custos concebidas por este trabalho.

Custo de aquisição (*Acquisition Cost* - AC) é o orçamento necessário para implementar aa infraestruturas de *data center*.

Custo Operacional (*Operational Cost* - OC) representa o custo de manter o sistema operacional.

$$OC = P \times T \times E_{cost} \times A. \quad (5.1)$$

Onde E_{cost} corresponde ao preço da energia por (kWh); T assume com um período de tempo; P é a energia elétrica consumida kW ; A é a disponibilidade.

Receita (*Income* - I) é a receita que a empresa tem por meio da venda de reserva de quarto, através de seu sistema *online*, onde é calculado pela seguinte fórmula:

$$I = BP \times NHR \times (T - Downtime). \quad (5.2)$$

Onde *mean Bookings Price* - BP é o preço médio de reservas de um quarto de hotel, (*Number of Reservations per Hour* - NHR) é o número de reservas feitas por hora e T é o período considerado em horas.

Custo do Funcionário (*Employees Cost* - EC) é a despesa de contratação do pessoal para operar o *data center*.

Lucro (*Profit* - P_f) é o lucro liquido da empresa, após ter subtraído todas as despesas, onde é calculado pela Equação 5.3 :

$$P_f = I - AC - OC - EC. \quad (5.3)$$

Onde EC é o custo associado aos empregados que mantêm o *data center* operacional.

Custo de Manutenção (*Maintenance Cost* - MC) é a soma de todos os custos (ou todas as despesas) do *data center* mencionados acima.

$$MC = AC + OC + EC. \quad (5.4)$$

Adicionalmente, também são calculadas as **perdas financeiras** (*Financial Losses* - FL). Nesta métrica são consideradas as perdas financeiras em função do período de inatividade (ou *downtime*) do sistema *online* de venda de reserva de quarto. Seguidamente é apresentado na Equação 5.5:

$$FL = Downtime \times BP \times NRH. \quad (5.5)$$

5.3.2 Arquitetura

A configuração C1 base, é apresentado em uma visão de alto nível na Figura 5.6, onde foi definida a partir do *software* da HP *Power Advisor* [33]. C1 consiste de um sistema de TI composto por 51 dispositivos (1 *router border*, 4 *router*, 13 *switch*, e 40 *racks*, em que cada *rack* contém 10 servidores), e um sistema de refrigeração composto por oito dispositivos (1 *cooling tower*, 1 *chiller* e 6 CRACs). Outras sete configurações foram derivadas a partir de C1, considerando variação da temperatura ambiente a partir da falha de unidades de CRACs. A falha de CRAC compromete o perfeito funcionamento do sistema de refrigeração.

A partir de C1 até C4, unidades de CRACs foram progressivamente removidas. Configuração C5, corresponde a C1, mas diferente por conter redundância de *chiller* e *cooling tower*. A partir da C5 até C8, unidades de CRACs foram removidas. A falha de CRAC no sistema de refrigeração, resultando em um aumento da temperatura na sala do *data center*.

5.3.3 Modelos

Inicialmente, após a falha de unidades de CRACs, o modelo energia é utilizado para calcular a nova temperatura ambiente. Os valores adotados no modelo de energia foram equivalente ao estudo de caso I, que são: potência do sistema de refrigeração (BTU/h) (ver Tabela 5.1). A eficiência energética adotada ($\eta_{IT} = 0,95\%$);

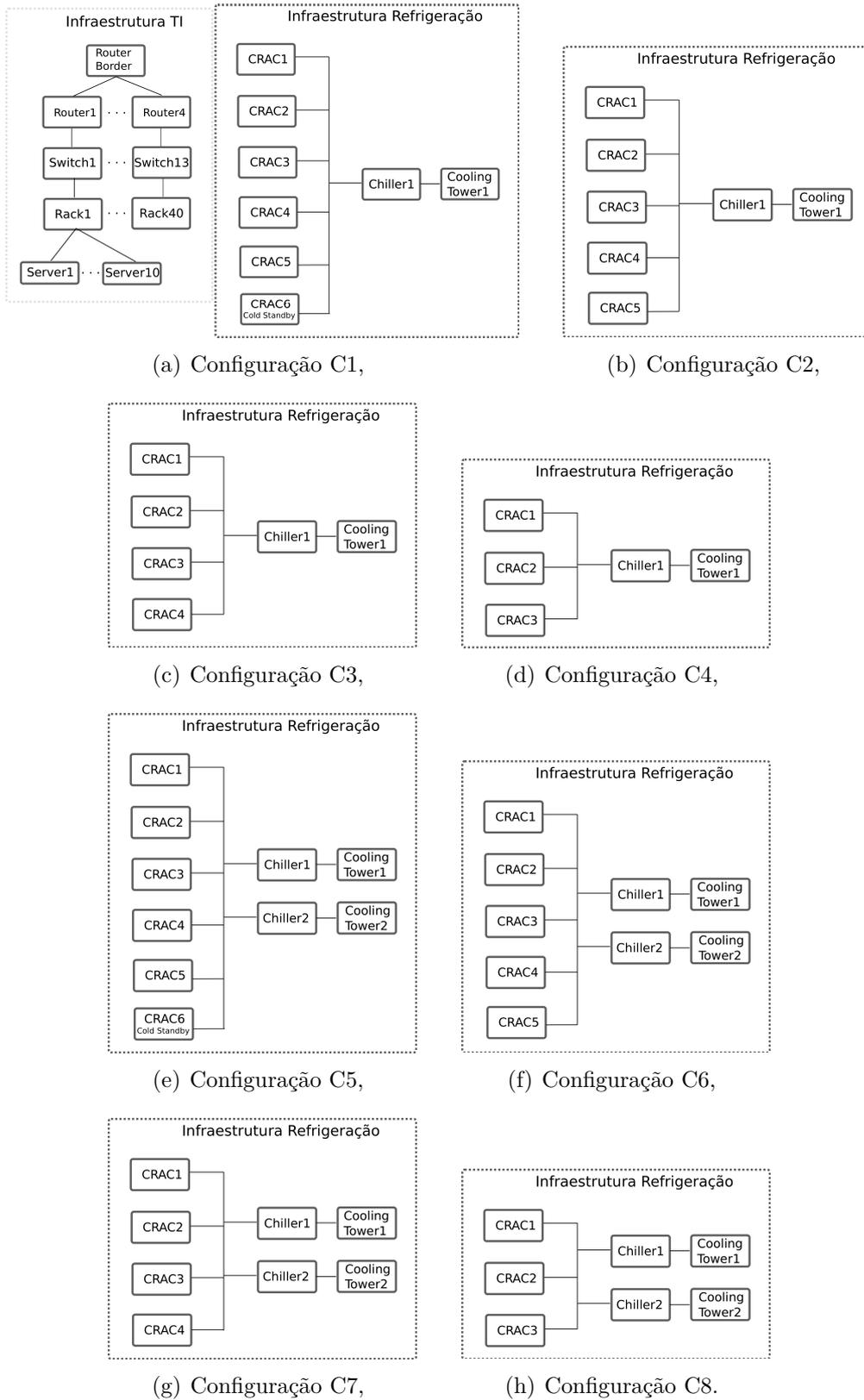


Figura 5.6 Configurações do *Data center*.

a condutividade térmica da parede considerada ($h = 1,73 \text{ W}/(\text{m.K})$), a temperatura padrão do ambiente (20° Celsius), mas com uma diferença na potência do sistema de TI, que é ($P_{TI} = 125841,24 \text{ W}$), adotado em todas as configurações.

A Tabela 5.11 mostra a temperatura da sala do *data center*, onde a falha de CRACs influenciam na temperatura ambiente. Por exemplo, a temperatura ambiente padrão é de $20,0^\circ \text{ Celsius}$ (considerando todas as unidades de CRACs ativos). Após a falha de unidades de CRACs, a temperatura ambiente elevou, em apenas 1 hora, de $20,0^\circ \text{ Celsius}$ para $26,2^\circ \text{ Celsius}$ (considerando 4 unidades de CRACs ativos), e $32,4^\circ \text{ Celsius}$ para a situação, em que se tem 3 unidades de CRACs ativos. Com base nos valores da temperatura na Tabela 5.11 e 5.12, o modelo Arrhenius calcula o novo MTTF.

Tabela 5.11 Temperatura da sala do *Data Center*.

Temperatura	Numero de CRACs Ativos
$20,0^\circ \text{ Celsius}$	5
$26,2^\circ \text{ Celsius}$	4
$32,4^\circ \text{ Celsius}$	3

Tabela 5.12 Parâmetros da Infraestrutura de TI e Refrigeração.

Equipamento	MTTF _(horas)	MTTR _(horas)
<i>RouterBorder</i>	448.000	8
<i>Router</i>	276.060	8
<i>Switch</i>	215.000	8
<i>Rack</i> com 10 servidores	35.147619	8
<i>Chiller</i>	18.000	48
<i>CoolingTower</i>	24.816	48
<i>CRAC</i>	37.059	8

O modelo SPN do terceiro estudo de caso é similar ao primeiro estudo de caso, mas com uma diferença na quantidade dos dispositivos de TI. Por este motivo, não é apresentado o modelo SPN, mas vale ressaltar que o sistema de refrigeração permanece o mesmo. Por exemplo, o lugar *Switch_ON* recebe 13 *tokens* para definir uma quantidade de 13 *switch*, semelhante acontece com o lugar *Router_ON*, onde recebe 4 *tokens* para representar 4 *router*.

A relação de interdependência do sistema de TI e refrigeração foi conseguida a partir das expressões condicionais colocadas nas transições de falha dos dispositivos de TI. As expressões deste modelo são semelhantes aos da Tabela 5.4.

Para computar a disponibilidade, três modos operacionais foram definidos. No primeiro modo MO1, a disponibilidade é computada assumindo que todos os dispositivos de TI estão funcionando. No segundo modo MO2, o sistema de TI está funcional se 1 *router border*, 4 *router*, 13 *switch*, e pelo menos 30 *racks* estejam ativos. No terceiro modo MO3, devem estar operacionais 1 *router border*, 4 *router*, 13 *switch*, e pelo menos 20 *racks*. A Tabela 5.13 mostra a probabilidade das expressões utilizadas para computar a disponibilidade em cada modo operacional.

Tabela 5.13 Expressões para Quantificar a Disponibilidade.

Modo Operacional	Expressão
MO1	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 4) \text{ AND } (\#Switch_ON = 13) \text{ AND } (\#Rack1_ON = 40)\};$
MO2	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 4) \text{ AND } (\#Switch_ON = 13) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 30) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 40))\};$
MO3	$P\{(\#RouterBorder_ON = 1) \text{ AND } (\#Router_ON = 4) \text{ AND } (\#Switch_ON = 13) \text{ AND } ((\#Rack1_ON = 20) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 30) \text{ OR } (\#Rack1_ON = 40))\}$

5.3.4 Resultados

A Tabela 5.14 apresenta um resumo dos resultados da avaliação de diferentes configurações, separados nos modos operacionais (MO1, MO2 e MO3). As métricas avaliadas foram disponibilidade (9s); *downtime* calculado em um período de 8760 (em 1 ano); custo de aquisição, AC (USD); custo operacional, OC(USD); custo manutenção, MC (USD); receita, I (USD); perdas financeiras, FL(USD); e lucro, P(USD). Além disso, o hotel tem 4 funcionários para suporte técnico dos equipamentos.

Em termos de disponibilidade, C1 e C5 apresentam os mais altos resultados em todos os modos operacionais, e MO3 tem a maior disponibilidade. Por exemplo,

a disponibilidade em número de noves para C1 e C5 no MO3 foi 2,944 e 2,992, respectivamente. C5 tem a maior disponibilidade, devido à presença de *chiller* e *cooling tower*, e uma unidade de CRAC (em *cold standby*).

A Figura 5.7 é uma comparação gráfica do *downtime* versus perda financeira para cada configuração nos modos operacionais. C4 e C8 produzem as maiores perdas financeiras em todos os modos operacionais. Isso é devido aos aumentos consideráveis da temperatura na sala do *data center*, que se eleva a partir de 20,0° *Celsius* para 32,4° *Celsius* em apenas 1 hora, após a falha de CRACs. A temperatura aumenta continuamente, por isto, a análise foi determinada em um período de 1 hora, em virtude de estar muito alta a partir de 1 hora. C4 e C8 são as configurações que têm os maiores impactos na disponibilidade, isso porque são as que sofrem mais com a alta temperatura, por exemplo em MO1, o *downtime* aumenta 3,3 e 2,3 horas, respectivamente (comparado com C1). Os resultados indicam C5 como uma interessante configuração a ser adotada, considerando custo e disponibilidade.

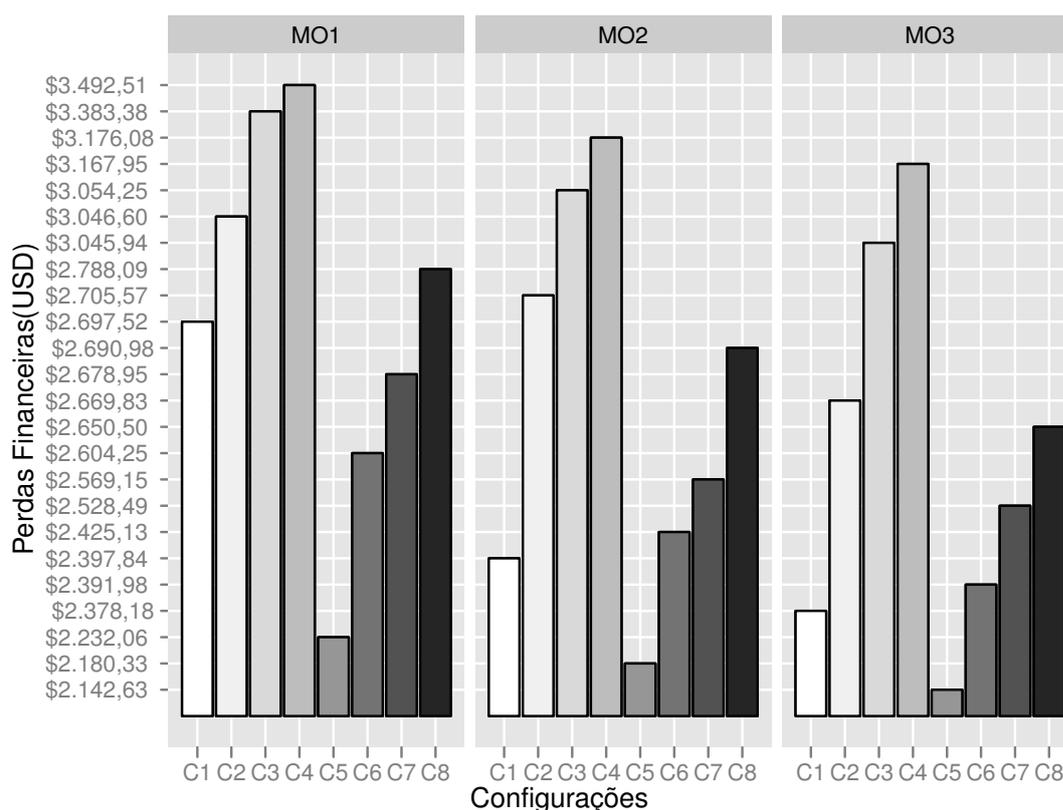


Figura 5.7 Resultado do Terceiro Estudo de Caso: Perdas Financeiras das Configurações em Cada Modo Operacional.

Tabela 5.14 Resumo dos Resultados das Configurações .

Configuração	M • O	Disponibilidade (9s)	Downtime (h)	AC (USD)	OC (USD)	MC (USD)	I (USD)	FL(USD)	P _f (USD)
C1		99,8717 (2,89)	11,24	297.593,86	292.875,74	830.469,60	2.070.593,43	2.697,52	1.240,469,83
C2		99,8551 (2,84)	12,69	287.593,86	292.827,05	820.420,91	2.070.595,13	3.046,60	1.250,174,22
C3		99,8391 (2,79)	14,09	277.593,86	292.780,07	810.373,93	2.070.262,97	3.383,38	1.259,889,04
C4	MO1	99,8339 (2,78)	14,52	267.593,86	292.764,85	800.358,71	2.070.155,33	3.492,51	1.269,796,62
C5		99,8939 (2,97)	9,30	322.593,86	292.940,66	855.534,52	2.071.398,51	2.232,06	1.215,863,99
C6		99,8761 (2,91)	10,85	312.593,86	292.888,75	845.482,61	2.071.031,43	2.604,25	1.225,548,82
C7		99,8726 (2,89)	11,16	302.593,86	292.878,33	835.472,19	2.070.957,75	2.678,95	1.235,485,56
C8		99,8674 (2,88)	11,61	292.593,86	292.863,11	825.456,97	2.070.850,10	2.788,09	1.245,398,14
C1		99,8846 (2,94)	10,10	297.593,86	292.913,73	830.507,59	2.071.208,09	2.425,13	1.240,700,50
C2		99,8713 (2,89)	11,27	287.593,86	292.874,62	820.468,48	2.070.931,49	2.705,57	1.250,463,01
C3		96,8547 (2,84)	12,72	277.593,86	292.825,98	810.419,84	2.070.587,59	3.054,25	1.260,167,75
C4	OM2	96,8489 (2,82)	13,23	267.593,86	292.808,99	800.402,85	2.070.467,43	3.176,08	1.270,064,58
C5		99,8963 (2,98)	9,08	322.593,86	292.947,88	855.541,74	2.071.449,54	2.180,33	1.215,907,80
C6		99,8819 (2,94)	9,99	312.593,86	292.917,54	845.511,40	2.071.235,00	2.397,84	1.225,723,60
C7		99,8778 (2,91)	10,70	302.593,86	292.893,65	835.487,51	2.071.066,04	2.569,15	1.235,578,53
C8		99,8720 (2,89)	11,21	292.593,86	292.876,65	825.470,51	2.070.945,88	2.690,98	1.245,475,36
C1		99,8862 (2,94)	9,96	297.593,86	292.918,36	830.512,22	2.071.240,70	2.391,98	1.240,728,57
C2		99,8730 (2,89)	11,12	287.593,86	292.879,60	820.473,46	2.070.966,74	2.669,83	1.250,493,28
C3		96,8551 (2,84)	12,69	277.593,86	292.827,14	810.421,00	2.070.595,78	3.045,94	1.260,174,78
C4	OM3	96,8493 (2,82)	13,20	267.593,86	292.810,12	800.403,98	2.070.475,45	3.167,95	1.270,071,47
C5		99,8981 (2,99)	8,92	322.593,86	292.953,14	855.547,00	2.071.486,72	2.142,63	1.215,939,72
C6		99,8839 (2,95)	9,90	312.593,86	292.920,28	845.514,14	2.071.254,40	2.378,18	1.225,740,26
C7		99,8797 (2,92)	10,53	302.593,86	292.899,32	835.493,18	2.071.106,14	2.528,49	1.235,612,97
C8		99,8739 (2,89)	11,04	292.593,86	292.882,30	825.476,16	2.070.985,81	2.650,50	1.245,509,65

Abreviações: MO - Modo Operacional; AC - Custo Aquisição; OC - Custo Operacional; EC - Custo com funcionário; MC - Custo com manutenção; I - Receita; FL - Perdas Financeiras; P_f - Lucro.

Estes estudos de casos demonstraram que o modelo de SPN proposto, com dependência é capaz de quantificar o impacto do sistema de refrigeração sobre a disponibilidade do sistema de TI (e o inverso também é verdadeiro). No geral, os resultados obtidos no estudo de caso demonstram um impacto significativo na disponibilidade dos dispositivos de TI, após a variação da temperatura. O modelo SPN, com dependência e o modelo de energia são concebidos por este trabalho e servem como ferramenta de apoio para os projetistas de *data center* para uma melhor elaboração de um projeto, considerando o aspecto da temperatura.

5.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou estudos de casos para avaliação do impacto da variação de temperatura na disponibilidade das infraestruturas de *data center*. Neste capítulo, cenários foram apresentados e três estudos de caso foram realizados.

O primeiro estudo, propôs oito configurações de *data center*, sendo compostas pelas infraestruturas de TI e refrigeração. A partir das configurações foi obtido o impacto do sistema de refrigeração sobre o sistema de TI. Assim, foi possível mostrar a relação de interdependência entre os sistemas, bem como o impacto na disponibilidade do sistema de TI. No segundo estudo, foram propostas três configurações, as quais tiveram como objetivo apresentar o impacto que o sistema de TI tem sobre o sistema de refrigeração, após este impacto, a temperatura da sala aumentou o que levou novamente a redução de disponibilidade do sistema de TI. O terceiro e último estudo de caso tem como ideia apresentar os efeitos da variação da temperatura no *data center*. Estes efeitos foram realizados através do impacto do sistema de refrigeração sobre o sistema de TI, sendo analisados com as métricas disponibilidade, *downtime*, AC, OC, MC, I, FL, P. Com isso, foi possível mensurar o impacto financeiro para uma companhia hoteleira.

A partir desses estudos de caso é possível observar a utilização dos modelos propostos para avaliar infraestruturas de *data center*. Além disso, os modelos são genéricos o suficiente para avaliar diferentes sistemas, considerando o aspecto de variação da temperatura.

6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Diante do constante crescimento tecnológico, a fim de atender as demandas de novas tecnologias, como *cloud computing* e *e-commerce*, tais tecnologias têm exigido uma alta confiabilidade e disponibilidade dos serviços, em função de seus usuários e da própria empresa, haja vista que equipamentos eletrônicos, sistemas de *software*, *hardware* tendem a falhar, tornando-se indisponíveis por tempo indeterminado. Portanto, entre os meios que levam a indisponibilidade, está o efeito da variação de temperatura ambiente.

Este trabalho propõe modelos para avaliar o impacto da variação de temperatura sobre a disponibilidade de arquiteturas de TI do *data center*. O modelo SPN produziu avaliações em duas perspectivas sobre o impacto do sistema de TI no sistema de refrigeração, bem como o impacto do sistema de refrigeração sobre o sistema de TI.

Para ilustrar a aplicabilidade dos modelos, três estudos de casos foram realizados, destacando o grau de dependência que existe entre o sistema de TI e o sistema de refrigeração. O estudo de caso I mostrou o impacto do sistema de refrigeração no sistema de TI, o estudo de caso II demonstrou o impacto do sistema de TI no sistema de refrigeração, e o estudo de caso III apresentou o efeito da variação de temperatura no *data center*, considerando métricas de AC, MC, FL, disponibilidade, *downtime*. Vale ressaltar que os modelos são genéricos o suficiente para avaliar diferentes sistemas, considerando aspecto de variação da temperatura.

A análise dos resultados obtidos estabelece o impacto considerável que a temperatura ambiente do *data center* tem sobre a disponibilidade do sistema de TI. A metodologia de análise adotada incluiu o modelo de energia, o modelo de Arrhenius, redes de Petri estocásticas, incorporando dependência e o modelo RBD. No futuro, pretendemos estender a metodologia para analisar o impacto da umidade

sobre a disponibilidade do *data center* de sistemas de TI.

Além das contribuições mencionada, foi produzido o seguinte artigo:

1. Rafael Souza, Gustavo Callou, Kádna Camboim, João Ferreira and Paulo Maciel. The Effects of Temperature Variation on Data Center IT Systems. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2013). Manchester, United Kingdom.

6.1 Contribuições

As contribuições deste trabalho permitiram contemplar o impacto da variação de temperatura na sala de TI de um *data center*. Como resultado do trabalho apresentado nesta dissertação, as seguintes contribuições podem ser destacadas:

- Uma **metodologia** para apoiar avaliação do impacto da variação de temperatura sobre a disponibilidade do sistema de TI no *data center*.
- O **modelo de energia** permitiu estimar a variação de temperatura ambiente em dois aspectos: (i) impacto da temperatura externa dentro da sala de TI; (ii) estimar o aumento de temperatura na sala, após a quebra de um ou mais CRACs na sala de TI. Além disso, é possível estimar o consumo de energia do *data center* ao longo de um período especificado.
- A relação de interdependência dos sistemas de *data center* foi possível através do **modelo SPN**, o qual permitiu avaliar o impacto do sistema de TI no sistema de refrigeração, bem como o impacto do sistema de refrigeração no sistema de TI. Esta relação de interdependência foi uma peça chave para ilustrar a aplicabilidade do impacto da temperatura tem sobre a disponibilidade do sistema de TI.

6.2 Restrições e Trabalho Futuros

A longo da pesquisa e desenvolvimento deste trabalho, foram encontradas algumas limitações nos modelos propostos. Estas limitações são apresentadas abaixo, além de representarem interessantes opções para trabalhos futuros.

- A metodologia adotada não analisa o efeito da umidade na disponibilidade do sistema de TI. Assim, como trabalhos futuros, pretende-se analisar o impacto da umidade sobre a disponibilidade do *data center*.
- Os modelos propostos não consideram o impacto da temperatura externa no consumo de energia do sistema de refrigeração. Para tanto, destina-se contemplar em trabalhos futuros o impacto da temperatura externa no COP do *chiller*.

Referências

- [1] Anderson, J. and Wendt, J. (1995). *Computational fluid dynamics*, volume 206. McGraw-Hill Science.
- [2] ANDERSON, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 1 edition.
- [3] Anderson, T e Lee, P. (1990). *Fault Tolerance: Principles and Practice*. New York: Springer- Verlag, 2. ed.
- [4] Arregoces, M. and Portolani, M. (2003.). *Data center fundamentals*. Fundamentals Series. Cisco.
- [5] Arrhenius, S. (1884). *Recherches sur la conductibilité galvanique des électrolytes*. P.A. Norstedt & Söner.
- [6] ASHRAE (2004). *Thermal Guidelines for Data Processing Environments*,. 1st Edition, ASHRAE, Atlanta.
- [7] Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B., and Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions on*, **1**(1), 11 – 33.
- [8] Balbo, G. (2001). Introduction to stochastic petri nets.
- [9] Beitelmal, A. and Patel, Chandrakant, D. (2007). Thermo fluids provisioning of a high performance high density data center. *Distrib Parallel Databases*, **21**, 227–238.
- [10] Borgnakke, C. and Sonntag, R. E. (2009). *Fundamentals of thermodynamics; 7th ed., International student version*. Wiley, Hoboken, NJ.
- [11] Breen, T., Walsh, E., Punch, J., Shah, A., and Bash, C. (2010). From chip to cooling tower data center modeling: Part 1 influence of server inlet temperature and temperature rise across cabinet. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2010 12th IEEE Intersociety Conference on*, pages 1 –10.
- [12] Callou, G., Sousa, E., Maciel, P., Tavares, E., Silva, B., Figueirêdo, J., Araujo, C., Magnani, F., and Neves, F. (2011). A formal approach to the quantification

-
- of sustainability and dependability metrics on data center infrastructures. In *Proceedings of the 2011 Symposium on Theory of Modeling & Simulation: DEVS Integrative M&S Symposium*, TMS-DEVS '11, pages 274–281, San Diego, CA, USA. Society for Computer Simulation International.
- [13] Callou, G., Maciel, P., Tutsch, D., and Araujo, J. (2012). Models for dependability and sustainability analysis of data center cooling architectures. *DSDV 2012*.
- [14] Callou, G., Maciel, P., Tutsch, D., Ferreira, J., Araújo, J., and Souza, R. (2013). Estimating sustainability impact of high dependable data centers: a comparative study between brazilian and us energy mixes. *Computing*, pages 1–34.
- [15] Chandrakant, P. R., Rakant, D. P., Ratnesh, S., Cullen, E. B., and Abdllmonem, B. (2002). Thermal considerations in cooling large scale high compute density data centers. In *In ITherm 2002-Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, pages 767–776.
- [16] Chen, J., Tan, R., Wang, Y., Xing, G., Wang, X., Wang, X., Punch, B., and Colbry, D. (2012). A high-fidelity temperature distribution forecasting system for data centers. *The 33rd IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)*.
- [17] CISCO (2006). Cisco 12000 serie router. Available via the: <http://www.cisco.com/go/12000>.
- [18] CISCO (2009). Cisco catalyst 3750 series switches. Available via the: <http://www.cisco.com/en/US/products/hw/switches/ps5023/index.html>.
- [19] CISCO (2010). Cisco 7609-s router. Available via the: <http://www.cisco.com/go/7600>.
- [20] Desrochers, A. A. and Al-Jaar, R. Y. (1995). *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems: Modeling, Control, and Performance Analysis*. ISBN 0-87942-295-5. IEEE Press.
- [21] Ebeling, C. (2004). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. Waveland Press.
-

-
- [22] EMSD (2005). Code of practice for energy efficiency of air-conditioning installations. Technical report, Hong Kong: Electrical and Mechanical Services Department (EMSD), the Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
- [23] Ghosh, R., Sundaralingam, V., and Joshi, Y. (2012). Effect of rack server population on temperatures in data centers. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2012 13th IEEE Intersociety Conference on*, pages 30 –37.
- [24] Inc, T. (2010). Thermophysical conversion tool. thermophysical measurements and instrumentation. [Online] TermTest Inc. <http://www.thermtest.com>.
- [25] Laprie, J. C., Avizienis, A., and Kopetz, H. (1992). *Dependability: Basic Concepts and Terminology*. ISBN:0387822968. Springer-Verlag New York, Inc., springer-verlag new york, inc. edition.
- [26] López, V. and Hamann, H. F. (2010). Measurement-based modeling for data centers. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2010 12th IEEE Intersociety Conference*, pages 1 –8.
- [27] López, V. and Hamann, H. F. (2011). Heat transfer modeling in data centers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**, 5306 – 5318.
- [28] Merlin, P. M. and Farber., D. J. (1976). *Recoverability of communication protocols - implications of a theoretical study*. IEEE Transactions on Communications, Cambridge, MA, USA.
- [29] Molloy, M. K. (1982). Performance analysis using stochastic petri nets. *IEEE Trans. Comput.*, **31**, 913–917.
- [30] Natkin, S. (1980). *Les Réseaux de Petri Stochastiques et leur Application a l’Evaluation des Systemes Informatiques*. Ph.D. thesis, Thèse de Docteur Ingénieur, Conservatoire National des Arts Metier, Paris, France.
- [31] Noe, J. D. and Nutt., G. J. (1976). *Macro e-nets representation of parallel systems*. IEEE Transactions on Computers.
- [32] Packard, H. (2010). Hp proliant dl580 g5. Available via the: www.hp.com/support/DL580G5.
-

-
- [33] Packard, H. (2013). Hp power advisor. Technical report.
- [34] Pakbaznia, E., Ghasemazar, M., and Pedram, M. (2010). Temperature aware dynamic resource provisioning in a power optimized data center. In *Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe*, pages 124–129, 3001 Leuven, Belgium, Belgium. European Design and Automation Association.
- [35] Patterson, D. (2002). A simple way to estimate the cost of downtime. In *Proc. 16th Systems Administration Conf. — LISA*, pages pages 185–8.
- [36] Patterson, M. (2009). The effect of data center temperature on energy efficiency. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. IThERM . 11th Intersociety Conference on*, pages 1167–1174.
- [37] Paulo, M., Kishor, S. T., Matias, R., and Kim, D. (2011). *Dependability Modeling*, volume 1. IGI Global, Pennsylvania.
- [38] Sahner, R., Trivedi, K., and Puliafito, A. (1997). Performance and reliability analysis of computer systems (an example-based approach using the sharpe software. *Reliability, IEEE Transactions on*, **46**(3), 441–441.
- [39] Sankar, S., Shaw, M., and Vaid, K. (2011). Impact of temperature on hard disk drive reliability in large datacenters. In *Dependable Systems Networks (DSN), 2011 IEEE/IFIP 41st International Conference on*, pages 530 –537.
- [40] Semiconductor, O. (2012). Quality & reliability handbook, av. Available via the: www.onsemi.com/publink/Collateral/HBD851-D.PDF.
- [41] Shinde, S. L. and Jitendra, G. (1996). *High thermal conductivity materials*. Number ISBN-10: 0-387-22021-6. New York, USA : Springer.
- [42] TRIVEDI, K. (1994). Reliability analysis techniques explored through a communication network example. in international workshop on computer-aided design, test, and evaluation for dependability.
- [43] Trivedi, K. S. (1982). *Probability and statistics with reliability, queuing, and computer science applications*. Prentice Hall.
- [44] Vishay (2006). Vishay semiconductor. Available via the: www.vishay.com/docs/80116/80116.pdf.
-

- [45] Wakerly, J. F. (2006). *Supplementary material to accompany Digital Design Principles and Practices*. Number ISBN 0-13-186389-4. Pearson Education.
- [46] Walsh, E., Breen, T., Punch, J., Shah, A., and Bash, C. (2010). From chip to cooling tower data center modeling: Part ii influence of chip temperature control philosophy. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2010 12th IEEE Intersociety Conference on*, pages 1 –7.
- [47] Way, K. and Ming, J. Z. (2003). *Optimal Reliability Modeling - Principles and Applications*, volume 1. Wiley.
- [48] Wei, B., Lin, C., and Kong, X. (2011). Dependability modeling and analysis for the virtual data center of cloud computing. In *High Performance Computing and Communications (HPCC), 2011 IEEE 13th International Conference on*, pages 784 –789.
- [49] Xie, M., Poh, K.-L., and Dai, Y.-S. (2004). *Computing System Reliability: Models and Analysis*. Springer.
- [50] Zeng, R., Jiang, Y., Lin, C., and Shen, X. (2012). Dependability analysis of control center networks in smart grid using stochastic petri nets. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, **23**(9), 1721 –1730.
- [51] Zimmermann, A. (2012). Modeling and evaluation of stochastic petri nets with timenet 4.1. In *Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS), 2012 6th International Conference on*, pages 54–63.
- [52] Zuberek, W. M. (1980). Timed petri nets and preliminary performance evaluation. In *Proceedings of the 7th annual symposium on Computer Architecture, ISCA '80*, pages 88–96, New York, NY, USA. ACM.