

Trabalho de Conclusão de Curso

Utilização de modelos estocásticos para o planejamento de estratégias de políticas de manutenção em infraestruturas de refrigeração e de potência em sistemas de data centers

de Leonardo Silva Costa

orientado por Prof. Dr. Almir Pereira Guimarães

> Universidade Federal de Alagoas Instituto de Computação Maceió, Alagoas 24 de Agosto de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS Instituto de Computação

#### UTILIZAÇÃO DE MODELOS ESTOCÁSTICOS PARA O PLANEJAMENTO DE ESTRATÉGIAS DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO EM INFRAESTRUTURAS DE REFRIGERAÇÃO E DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DATA CENTERS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Computação.

Leonardo Silva Costa

#### Orientador: Prof. Dr. Almir Pereira Guimarães

Banca Avaliadora:

Petrúcio Antônio Medeiros Barros Prof. Me, UFAL Rômulo Nunes de Oliveira Prof. Me, UFAL

> Maceió, Alagoas 24 de Agosto de 2023

#### Catalogação na fonte Universidade Federal de Alagoas Biblioteca Central Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos - CRB-4 - 2062

C837u Costa, Leonardo Silva.

Utilização de modelos estocásticos para o planejamento de estratégias de políticas de manutenção em infraestruturas de refrigeração e de potência em sistemas de data centers / Leonardo Silva Costa. – 2023. 58 f. : il. color.

Orientador: Almir Pereira Guimarães. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia da Computação) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Computação. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 56-58.

1. Data center. 2. Políticas de manutenção. 3. Modelos estocásticos. I. Título.

CDU: 004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS Instituto de Computação

#### UTILIZAÇÃO DE MODELOS ESTOCÁSTICOS PARA O PLANEJAMENTO DE ESTRATÉGIAS DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO EM INFRAESTRUTURAS DE REFRIGERAÇÃO E DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DATA CENTERS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Computação.

Aprovado em 24 de Agosto de 2023:

Almir Pereira Guimarães, Prof. Dr., Orientador

Petrúcio Antônio Medeiros Barros, Prof. Me, UFAL

> Rômulo Nunes de Oliveira, Prof. Me, UFAL

# Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e meu irmão, por acreditarem e me fazerem acreditar em mim.

Leonardo Silva Costa

### Agradecimentos

A Deus, por ter me permitido viver a conclusão desta etapa em Seu tempo, atendendo minhas preces.

À minha família, por me dar o suporte necessário para morar em outra cidade e ter condições de realizar este sonho.

Ao meu orientador, o Prof Dr. Almir Pereira Guimarães por me acolher e segurar minha mão durante uma época de caos e perdas dolorosas.

À minha "mãe de criar", eterna Mãe Sônia, que torcia tanto por esta conquista e que celebrou cada novo passo compartilhado em vida.

Aos meus amigos de graduação: Joicy, Jessica, Leony, Valdir, Willieny, Hyago e tantos outros que me incentivaram e/ou me ajudaram nas dificuldades.

Ao Núcleo de Acessibilidade da UFAL, por ter sido um ambiente de aprendizado e motivação para ir até a Universidade durante alguns anos.

À Universidade Federal de Alagoas por abrir as portas para a realização do meu sonho, por fornecer educação pública de qualidade, por ser gratuita e socialmente referenciada.

21 de Agosto de 2023, Maceió, Alagoas

Leonardo Silva Costa

A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de começar de novo. F. Scott Fitzgerald

### Resumo

Com a ascensão de serviços baseados em Internet, surge uma demanda de funcionamento ininterrupto de sistemas de Data center, que são recursos de missão crítica projetados para suportar serviços diários tais como: computação em nuvem, além do acesso às redes sociais, ao comércio eletrônico e ao armazenamento de informações, forçando a disponibilização destes sistemas 24 horas por dia, 7 dias por semana, sob pena de grandes prejuízos, o que exige um dimensionamento correto de suas infraestruturas de comunicação, potência e refrigeração. Dessa forma, além de técnicas de redundância de hardware aplicadas a seus componentes, é de grande importância a adoção de estratégias corretas para o desenvolvimento de políticas de manutenção que possam assegurar esse funcionamento ininterruptamente. Neste trabalho, são utilizados os mecanismos de modelagem SPN e RBD na construção de modelos para a análise do impacto de diferentes políticas de manutenção, baseados nos diferentes níveis de SLA, sobre a disponibilidade estacionária das infraestruturas de refrigeração e de potência, considerando arquiteturas com diferentes níveis de redundância. Um estudo de caso foi elaborado para a análise da disponibilidade estacionária resultante de diversos cenários, que consideram diferentes estratégias de manutenção a partir das infraestruturas/arquiteturas estudadas através da aplicação dos modelos propostos.

Palavras-chave: Datacenter; Políticas de Manutenção; Disponibilidade; Acordo de Nível de Serviço.

### Abstract

With the rise of Internet-based services, there is a demand for uninterrupted operation of Data center systems, which are mission-critical resources designed to support daily services such as: cloud computing, in addition to accessing social networks, to electronic commerce and information storage, forcing the availability of these systems 24 hours a day, 7 days a week, under penalty of great losses, which requires a correct dimensioning of its communication, power and cooling infrastructures. Thus, in addition to hardware redundancy techniques applied to its components, it is of great importance to adopt correct strategies for the development of maintenance policies that can ensure uninterrupted operation. In this work, the modeling mechanisms SPN and RBD are used in the construction of models for the analysis of the impact of different maintenance policies, based on different levels of SLA, on the stationary availability of cooling and power infrastructures, considering architectures with different levels of redundancy. A case study was elaborated for the analysis of the stationary availability resulting from different scenarios, which consider different maintenance strategies from the infrastructures/architectures studied through the application of the proposed models.

# Keywords: Datacenter; Maintenance Policies; Availability; Service Level Agreement.

# Lista de Figuras

1.1	Infraestruturas de um datacenter	14
1.2	Instituto Ponemom. Fonte: Cost of Data center Outages, 2016	15
3.1	Infraestrutura de Potência	20
3.2	Infraestrutura de Refrigeração	20
3.3	Estruturas básicas de Diagrama de Blocos de Confiabilidade	25
4.1	Modelo Base de Política de Manutenção (BPM)	27
4.2	Modelo Espera a Frio (EF)	29
4.3	Modelo de Dependabilidade - Modular com Reparo	30
5.1	Metodologia Proposta	32
6.1	Modelo SPN referente à Infraestrutura de Refrigeração sem redundância $% \mathcal{A}$ .	38
6.2	Modelo SPN referente à Infraestrutura de Refrigeração com redundância $% \mathcal{A}$ .	39
6.3	Modelo SPN referente a Infraestrutura de Potência sem redundância	42
6.4	Modelo SPN referente a Infraestrutura de Potência com redundância	43
6.5	Disponibilidade em Infraestruturas de Refrigeração, Arquitetura sem Re-	
	dundância	45
6.6	Disponibilidade em Infraestruturas de Refrigeração, Arquitetura com Re-	
	dundância	45
6.7	Disponibilidade em Infraestruturas de Potência, Arquitetura sem Re-	
	dundância	46
6.8	Disponibilidade em Infraestruturas de Potência, Arquitetura com Re-	
	dundância	46
6.9	Atuação equipe N1, em relação ao total de manutenções corretivas, Infra-	
	estrutura de Refrigeração sem redundância	47
6.10	Atuação equipe N1, em relação ao total de manutenções corretivas, Infra-	
	estrutura de Refrigeração com redundância	47
6.11	Atuação equipe N1, em relação ao total de manutenções corretivas, Infra-	
	estrutura de Potência sem redundância $\hdots$	47
6.12	Atuação equipe N1, em relação ao total de manutenções corretivas, Infra-	
	estrutura de Potência com redundância	48

# Lista de Tabelas

4.1	. Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo BPM $\ .\ .\ .$	28
4.2	. Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo $\mathrm{MRPR}$ $~.$	30
6.1	. Métricas de Dependabilidade	35
6.2	. Definição de tempo de reposição em diferentes cenários - Infraestrutura	
	de Refrigeração	36
6.3	. Definição de tempo de reposição em diferentes cenários - Infraestrutura	
	de Potência	36
6.4	. Valores de importância para disponibilidade	37
6.5	. Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo SPN referente	
	a Infraestrutura de Refrigeração sem redundância	38
6.6	. Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo SPN referente	
	à Infraestrutura de Refrigeração com redundância	40
6.7	. Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo SPN referente	
	a Infraestrutura Potência sem redundância	42
6.8	. Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo SPN referente	
	a Infraestrutura Potência com redundância	44
6.9	. Análise Sensibilidade - 90% Equipe Atuação Nível Inicial 10% Equipe	
	Atuação Nível Inicial + Equipe com maior Especialização	50
6.10	. Análise Sensibilidade - 80% Equipe Atuação Nível Inicial 20% Equipe	
	Atuação Nível Inicial + Equipe com maior Especialização	51
6.11	. Análise Sensibilidade - 70% Equipe Atuação Nível Inicial 30% Equipe	
	Atuação Nível Inicial + Equipe com maior Especialização	52
6.12	. Análise Sensibilidade - 60% Equipe Atuação Nível Inicial 40% Equipe	
	Atuação Nível Inicial + Equipe com maior Especialização	53

### Lista de Abreviaturas

- **ATS** Painel de Transferência Automática, sigla proveniente do inglês Automatic Trasnfer Switch
- **BPM** Base de Política de Manutenção
- **CRAC** Ar condicionado para sala de computador, sigla proveniente do inglês Computer Room Air Conditioner
- EF Espera a Frio
- **MRPR** Modular com Reparo e Política de Reposição
- **MTBF** Tempo médio entre falhas, sigla proveniente do inglês mean time between failure.
- MTTF Tempo médio para falha, sigla proveniente do inglês mean time to fail.
- MTTR Tempo médio de reparo, sigla proveniente do inglês mean time to repair.
- **PDU** Painéis de Distribuição Inteligentes, sigla proveniente do inglês Panel Distribution Unit
- **SLA** Acordo de Nível de Serviço, sigla proveniente do inglês Service Level Agreement
- SPN Redes de Petri Estocásticas, sigla proveniente do inglês Stochastic Petri nets
- **RBD** Diagramas de Bloco de Confiabilidade, sigla proveniente do inglês reliability block diagrams
- **RDP** Rede de Petri
- **SS** Single Server
- **UPS** sigla proveniente do inglês uninterruptible power supply

# Sumário

1	Visa	são Geral 13				
	1.1	Motivação	14			
	1.2	Objetivo Geral	15			
		1.2.1 Objetivos específicos	15			
	1.3	Estrutura do Trabalho	16			
<b>2</b>	Tra	balhos Relacionados	17			
3	Fun	Fundamentação Teórica				
	3.1	Data center	19			
		3.1.1 Infraestrutura de Potência	19			
		3.1.2 Infraestrutura de Refrigeração	20			
	3.2	Disponibilidade	21			
	3.3	Tipos de Manutenção	21			
	3.4	Redes de Petri	22			
	3.5	Redes de Petri Estocásticas	23			
	3.6	Diagrama de Bloco de Confiabilidade	24			
	3.7	Outras métricas	25			
4	Mo	$delos \ SPN$	<b>27</b>			
	4.1	Modelo Base de Política de Manutenção (BPM)	27			
	4.2	Espera a Frio (EF) $\ldots$	28			
	4.3	Modular com Reparo e Política de Reposição (MRPR)	29			
<b>5</b>	Met	todologia	32			
6	Estu	udo de Caso	35			
	6.1	Infraestrutura de Refrigeração	37			
		6.1.1 Infraestrutura de Refrigeração sem Redundância	37			
		6.1.2 Infraestrutura de Refrigeração com Redundância	39			
	6.2	Infraestrutura de potência	41			
		6.2.1 Infraestrutura de Potência sem Redundância	41			

	6.2.2	Infraestrutura de Potência com Redundância		43	
6.3	8 Result	tados		49	
7 Co	onclusão			54	
Bibliografia 56					

# Capítulo 1 Visão Geral

A possibilidade de conectar dispositivos inteligentes e ficarem permanentemente ligados à Internet e como consequência, conectados a uma estrutura com recursos computacionais ilimitados, tem diversificado a perspectiva na qual as corporações têm analisado as novas formas que os serviços de Tecnologia da Informação são entregues (Zuffo *et al.*, 2013).

Dessa forma, através dessa recente mudança sobre a forma como serviços são disponibilizados na Internet e da promessa da computação em nuvem de ofertar capacidades ilimitadas, vem à tona a preocupação de "como?" e "o que?" irá armazenar tantas informações. Um sistema de *data center* é um ambiente projetado para concentrar servidores, equipamentos de processamento e armazenamento de dados, e sistemas de ativos de rede, tais como *switches*, roteadores entre outros (Arregoces *et al.*, 2003).

Assim, *data centers* são ambientes conhecidos como de missão crítica, ou seja, são ambientes que abrigam equipamentos responsáveis pelo processamento e armazenamento de informações cruciais para a continuidade de negócios nos mais variados tipos de organizações (Marin, 2011). De maneira simplificada, um *data center* é um lugar físico utilizado para empresas e pessoas armazenarem informações essenciais e aplicações. Conforme a Figura 1.1, podemos estruturar um datacenter com três infraestruturas: i) de resfriamento ii) de potência e iii) de comunicação.

Para (Patterson, 2002), o crescimento da demanda pelos serviços proporcionados por estes sistemas instituiu a necessidade de sua disponibilização 24 horas por dia, 7 dias por semana, sob pena de grandes prejuízos financeiros por parte de empresas detentoras destes sistemas, de empresas que utilizam estes sistemas e de usuários destes sistemas, o que torna indispensável um planejamento de manutenção adequado.

Para isso, é preciso um maior entendimento nos conceitos relacionados às estratégias de manutenções, seus impactos na disponibilidade, e analisar o comportamento destes sistemas em diferentes cenários com diferentes parâmetros. É preciso reforçar que a manutenção não consiste apenas em consertar um equipamento quebrado, mas em propiciar o funcionamento dos equipamentos, mantendo suas condições operacionais ideais, e consequentemente, uma alta disponibilidade do sistema. Neste trabalho, são consideradas as



realizações de manutenções preventivas e corretivas.

Figura 1.1: Infraestruturas de um datacenter

Para (Xenos, 1998), a manutenção preventiva é um conjunto de ações executadas em intervalos fixos ou de acordo com critérios preestabelecidos, com o objetivo de reduzir ou eliminar a incidência de falhas ou a degradação das funções de um equipamento. Opostamente, na manutenção corretiva, não há intervalos fixos. Além de ser considerada uma manutenção mais cara, geralmente é realizada quando há falha total em algum dos equipamentos do sistema.

Neste trabalho, serão estudados cenários com as manutenções corretivas e preventivas, considerando diferentes estratégias, variando a periodicidade de realização de manutenções, o percentual de realização de atividades de manutenção por equipes de alto e baixo nível de especialização técnica e parâmetros de tempo de falha nos equipamentos das infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de *data center*, aplicando essas variações em modelos das referidas infraestruturas em arquiteturas tanto com redundância quanto sem redundância e avaliando suas respectivas disponibilidades.

#### 1.1 Motivação

Uma pesquisa realizada pelo Instituto Ponemom (Ponemon, 2016) a partir de 63 sistemas de *data centers* de diversos setores da indústria dos Estados Unidos, mostrou que o custo de tempo de parada (*downtime*) no ano de 2016 quantificava o valor médio de US \$8.851 por minuto (Ver Figura 1.2). Vale salientar que considerando o crescimento da depedência por sistemas de *data centers*, este custo tende a aumentar.

Considerando que a falha de um sistema de *data center* pode provocar a indisponibilidade de serviços bancários, interrupção de redes sociais, de lojas online, prejuízos de ordem financeira e para a imagem de empresas, além de diversos outros problemas, cria-se um contexto que reforça a necessidade para um bom funcionamento correto e contínuo



Figura 1.2: Instituto Ponemom. Fonte: Cost of Data center Outages, 2016

destes sistemas.

Dessa forma, além de técnicas de redundância estática ou dinâmica aplicadas a seus componenetes, é de grande importância a adoção de políticas de manutenção adequadas de maneira a proporcionar suporte para a maximização da disponibilidade estacionária do sistema junto com a minimização do tempo de parada.

A motivação desta pesquisa é criar subsídios que colaborem na criação de estratégias de manutenção e que proporcionem um funcionamento ininterrupto de sistemas de *data center*, através da análise de impacto na disponibilidade das infraestruturas de potência e refrigeração.

#### 1.2 Objetivo Geral

Este trabalho, através de modelos estocásticos, fornece suporte para análise do impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade de infraestruturas de refrigeração e potência de um datacenter, considerando diferentes parâmetros e acordo de níveis de serviço.

#### 1.2.1 Objetivos específicos

- Propor arquiteturas para a infraestrutura de potência e refrigeração de um *data center*, considerando adaptações de mecanismos de redundância, que são largamente utilizados em projetos de sistemas computacionais;
- Definir modelos de que irão proporcionar suporte à análise das diferentes estratégias

de políticas de manutenção para as infraestruturas de potência e de refrigeração;

 Avaliar o impacto de diversas estratégias de manutenção sobre a disponibilidade das infraestruturas de refrigeração e de potência, considerando diferentes abordagens de manutenções preventivas e corretivas.

#### 1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho está detalhada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta os trabalhos relacionados com a temática desta pesquisa. O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica essencial e necessária para a construção de reflexões e conceitos utilizados neste estudo, abordando principalmente: sistemas de data centers, infraestrutura de potência, infraestrutura de refrigeração, disponibilidade e conceitos de modelagem. O Capítulo 4 apresenta modelos de dependabilidade utilizando o mecanismo de modelagem *SPN*. O Capítulo 5 apresenta a metodologia, descrevendo os passos realizados para a construção do trabalho. O Capítulo 6 apresenta um estudo de caso, detalhando os modelos desenvolvidos, definindo seus respectivos parâmetros de funcionamento e verificando o impacto das diferentes estratégias de políticas de manutenção na disponibilidade das infraestruturas de refrigeração e de potência. Por fim, o Capítulo 7 apresenta o que foi realizado neste estudo juntamente com as conclusões sobre os resultados obtidos e as principais contribuições deste trabalho.

### Capítulo 2

### **Trabalhos Relacionados**

O trabalho (Camboim, 2012) propõe modelos hierárquicos e heterogêneos para avaliação do impacto de políticas de manutenção em infraestrutura de redes convergentes. Ela aborda e se embasa na necessidade da exigência de um controle eficaz e escalável e de soluções para gerenciamento, considerando o crescimento contínuo de redes convergentes provocado pela alta demanda por tecnologias modernas de telecomunicações.

O trabalho também insere diferentes níveis de acordo de serviço (SLAs) e diferentes técnicas de modelagem para representar o comportamento do sistema e facilitar a avaliação de dependabilidade. Foram adotadas políticas de manutenção preventiva e corretiva, com equipes de manutenção periódica, com menor grau de especialização, e equipe especialista, respectivamente.

Em (Callou et al., 2010) ocorre a avaliação de diferentes estratégias de SLAs para políticas de manutenção aplicadas à infraestrutura de potência de um sistema de *data center*. São considerados aspectos de dependabilidade e de custos. Para realização do cálculo das métricas, são utilizados modelos analíticos que também adotam uma abordagem híbrida, o que abrange as vantagens de Redes de Petri Estocásticas (SPN) e Diagramas de Bloco de Confiabilidade (RBD).

Por sua vez, o trabalho mostrado em (Figueirêdo, 2011) propõe uma análise de dependabilidade de sistemas *data center* baseada em índices de importância para a confiabilidade (Kuo et al, 2003). O trabalho considera novos índices para quantificar a importância de componentes, relacionando custos, que podem auxiliar projetistas de data center.

Em (Melo et al., 2020) também são adotadas redes de Petri estocásticas *(SPN)* para avaliar o impacto na dependabilidade e propor melhorias nas políticas de manutenção em infraestruturas elétricas de sistema de *data center*. O trabalho também considera uma análise das políticas de manutenção em diferentes contratos de *SLA*.

Para análise, é utilizada uma estratégia de otimização, que considera a distância euclidiana para indicar a solução mais adequada assumindo requisitos conflitantes como custo e disponibilidade. Outra relação com este estudo é que para ilustrar a aplicabilidade dos modelos e da abordagem proposta, também foram realizados estudos de caso comparando diferentes contratos de SLA e políticas de manutenção (preventivas e corretivas).

Em (Guimarães et al., 2022) são realizadas análises do impacto de diferentes abordagens de políticas de manutenção preventiva e corretiva sobre a disponibilidade estacionária de diversas arquiteturas da infraestrutura de refrigeração e potência de um sistema de *data center*, respectivamente, utilizando o mecanismo de modelagem *SPN* através da ferramenta Time Net (Zimmermann, A., 2000).

Portanto, nota-se a relação destes trabalhos com a temática desta pesquisa, por trabalharem com estratégias de políticas de manutenção, disponibilidade e infraestruras de sistemas de *datacenters*, considerando diferentes níveis de *SLAs*, além de também utilizarem mecanismos de modelagem *SPN* e *RBD*.

### Capítulo 3

### Fundamentação Teórica

Este capítulo define conhecimentos essenciais para a compreensão deste trabalho. Inicialmente, um sistema de *data center* e suas respectivas infraestururas de potência e refrigeração, que foram as utilizadas para desenvolver este trabalho, são detalhadas. Em seguida, são apresentados conceitos referentes a Disponibilidade, Tipos de Manutenção, Redes de Petri Estocásticas e Diagrama de Bloco de Confiabilidade.

#### **3.1** Data center

Para (Veras, 2015), um *data center* é um grande sistema composto por vários ativos interconectados, que fornece capacidade para processamento e armazenamentos de dados em larga escala para qualquer tipo de organização de maneira centralizada.

Um *data center* abriga muitos ativos de redes e servidores que trabalham juntos para processar, armazenar e compartilhar dados. Embora os sistemas de *data center* sejam constituídos pelas infraestruturas de comunicação, de potência e refrigeração, neste trabalho iremos tratar com as infraestruturas de potência e refrigeração, que são definidas a seguir.

#### 3.1.1 Infraestrutura de Potência

A infraestrutura elétrica (Fan et al., 2007) é responsável pelo fornecimento ininterrupto de energia, condicionado à tensão e à frequência correta para os equipamentos das infraestruturas de comunicação e de refrigeração.

A Figura 3.1 detalha os componentes fundamentais da infraestrutura de potência. Segundo (Govidan et al., 2010), nesta infraestrutura, a energia entra por meio de uma subestação que serve como sua fonte de alimentação primária. Um gerador, que atua como fonte de alimentação de reserva em caso de falha na subestação, também é empregado.

Um Automatic Trasnfer Switch - ATS, traduzido como painel de transferência automática, é empregado para selecionar automaticamente entre essas duas fontes, levando entre 10 e 20 segundos para o gerador ser ativado.



Figura 3.1: Infraestrutura de Potência

Por fim, a unidade de *Panel Distribution Unit - UPS*, traduzida como painel de distribuição inteligente, é normalmente empregada para preencher o intervalo de tempo entre falha de energia da rede elétrica e ativação do gerador. *UPS* armazena energia usando baterias, que normalmente têm um tempo de execução de cerca de 10 minutos para alimentar as infraestruturas do datacenter. O *UPS* alimenta diversos *PDUs* cujos tamanhos são normalmente entre 100 e 200 KW. OS *PDUs* possuem transformadores que reduzem a tensão e direcionam a energia para vários racks, cada um dos quais abriga equipamentos da infraestrutura de comunicação.

#### 3.1.2 Infraestrutura de Refrigeração

A Figura 3.2 detalha os componentes da infraestrutura de refrigeração. A infraestrutura de refrigeração é basicamente composta pela torre de refrigeração, pelo resfriador e pelos aparelhos de ar-condicionado (Arregoces et al., 2003).



Figura 3.2: Infraestrutura de Refrigeração

Normalmente, as várias unidades de Computer Room Air Conditioner - CRACs transferem o calor dissipado por dispositivos da infraestrutura de comunicação para um sistema de distribuição de água refrigerada. Os resfriadores, que são tipos especiais de compressores, retiram o calor do sistema de água refrigerada e o transfere para o ambiente através de torres de refrigeração.

#### 3.2 Disponibilidade

A disponibilidade de um sistema é definida como a fração de tempo em que o sistema está ativo para aceitar solicitações de serviços dos usuários. Com isso, é possível entender que para manter o funcionamento ininterrupto de um sistema de *data center*, é preciso garantir uma alta disponibilidade no mesmo. Além disso, problemas de disponibilidade podem afetar muitos outros aspectos de desempenho (Gitomer, 1999).

Dessa forma, os *data centers* são ambientes que devem oferecer o máximo de disponibilidade possível, próximos dos 100% ou seja, por se tratarem de ambientes de missão crítica, eles devem garantir a operação ininterrupta dos sistemas e equipamentos, independente se seja uma falha técnica, humana ou uma manutenção preventiva ou corretiva (Fazion, 2016).

Assim, considerando que a disponibilidade é a probabilidade de que o sistema esteja operacional, isto é, a percentagem de tempo na qual o sistema está executando seus serviços (Trivedi, 2001), ela será dada na forma da Equação 3.1, onde D corresponde à disponibilidade e Up\_Time e Down\_Time representam o período operacional e não operacional respectivamente.

$$D = Up\_Time/(Up\_Time + Down\_Time)$$
(3.1)

Para sistemas altamente confiáveis, esse número deve estar muito próximo de 1,000 (ou 100%). No entanto, isso seria uma situação ideal, ou seja, de um sistema que jamais apresentasse falhas. Na prática, esse número deveria ser, no mínimo, de 99,9%, normalmente referido como uma disponibilidade de "três noves", o que se espera da infraestrutura de um *data center*. Cada "nove" adicional aumenta a ordem de grandeza de disponibilidade em um fator de 10, aproximadamente (Faccioni, 2016).

Considerando isso, é preciso criar estratégias de manutenção que possam garantir que o sistema seja altamente confiável e possua uma alta disponibilidade, neste trabalho, iremos ter abordagens com manutenção preventiva e corretiva, detalhando-as no tópico a seguir.

#### 3.3 Tipos de Manutenção

(Tallon, 2013) nos diz que o custo total de manutenção dos *data centers* pode variar de 5 a 7 vezes com relação ao custo de aquisição de hardware. Isto contextualiza a importância de estabelecer políticas de manutenção que possam maximizar e contribuir para o funcionamento do sistema. As definições de manutenção preventiva e corretiva, utilizadas nas estratégias de manutenção detalhadas neste trabalho, são definidas a seguir.

A manutenção corretiva consiste em uma manutenção não planejada que ocorre de maneira aleatória, de reação, na qual ocorre a correção da falha ou do baixo desempenho, podendo ser desde a troca de um simples parafuso de fixação quebrado até a substituição de um sistema elétrico danificado (Moro et al., 2007).

Em consonância, (Viana, 2002) nos diz que a manutenção corretiva não é uma manutenção recomendada, pois o problema é deixado chegar ao extremo, tornando-o, assim, muito mais grave e comprometendo a vida útil do equipamento, bem como a produção em si. Toda intervenção causada pela manutenção em máquinas no processo produtivo torna cada vez pior a programação de produção, da organização, além de atrasar todo o processo produtivo.

A manutenção preventiva compreende conceitos como: planejamento, programação, controle, organização e administração. Consiste no trabalho de prevenção, possibilitando a redução da parada e o aumento do rendimento dos equipamentos em funcionamento. Sendo assim, pode ser executada levando-se em consideração a análise estatística a respeito do estado do equipamento, do local das instalações, das condições elétricas e das orientações do fabricante (Santos, 2009).

As principais vantagens de uma manutenção preventiva são a realização de paradas programadas, a maior vida útil do equipamento e a melhor qualidade do produto final. Por outro lado, encontram-se desvantagens relacionadas ao maior número de funcionários no setor de manutenção, o que gera um maior custo na folha de pagamento e a possibilidade de ocorrer erros no decorrer das intervenções. Apesar disso, as vantagens trazem mais benefícios, principalmente no que se refere ao gasto anual com manutenção (Moro et al., 2007).

Dessa forma, ainda que ambas tenham suas especificidades e objetivos, fica claro que administrar tanto a manutenção preventiva, que por muitas vezes é erroneamente ignorada, quanto a manutenção corretiva, é essencial para manter o funcionamento permanente de qualquer sistema.

#### 3.4 Redes de Petri

Rede de Petri (RdP) é uma ferramenta matemática gráfica para a modelagem e o estudo de sistemas caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos. Basicamente é um grafo bipartido formada por dois conjuntos: transição e lugar, estes dois componentes, também definidos como nós, são interconectados por arcos dirigidos (Murata, 1989)

Na sua forma gráfica, lugares são representados por círculos e transições, por retângulos. Arcos direcionados ligam lugares a transições ou transições a lugares e são marcados com seus pesos. Tipicamente, os lugares representam recursos do sistema modelado enquanto as transições representam atividades do sistema (Rakkay et al., 2009).

Para a modelagem e interpretação de sistemas, utilizam-se marcas ou fichas (tokens) atribuídas aos lugares, que representam a situação do estado do sistema, e a movimentação das marcas por meio dos lugares, junto com regras bem definidas, representa a dinâmica

do sistema a ser modelado (Norris, 1998).

#### 3.5 Redes de Petri Estocásticas

Em meados da década de oitenta surgiram também extensões de RdP estocásticas, incorporando aspectos temporais não determinísticos (Marsan, 1984). As Redes de Petri Estocásticas (SPN) são aplicadas na análise de desempenho das redes de computador e sistemas de comunicação, pois possibilitam a análise de probabilidade de estados do sistema (Machado, 2015; Norris, 1998).

Uma SPN é definida (Maciel et al, 2011) pela 9-tupla SPN = {P; T; I; O; H;  $\prod$ ; G;  $M_0$ ; Atributos}, onde:

- $P = \{p_1, p_2, ..., p_n\}$  representa o conjunto de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, ..., t_n\}$  representa o conjunto de transições imediatas e temporizadas  $P \cap T = \emptyset;$
- *I* ∈ (N<sup>n</sup> → N)<sup>n×m</sup> compõe a matriz que representa os arcos de entrada (que podem ser dependentes de marcações);
- $O \in (\mathbb{N}^n \to \mathbb{N})^{n \times m}$  compõe a matriz que representa os arcos de saída (que podem ser dependentes de marcações);
- *H* ∈ (N<sup>n</sup> → N)<sup>n×m</sup> compõe a matriz que representa os arcos inibidores (que podem ser dependentes de marcações);
- $\prod \in N^m$  é um vetor que associa o nível de prioridade a cada transição;
- G ∈ (N<sup>n</sup> → {true; false})<sup>m</sup> 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);
- Atributos = (Dist; Markdep; Policy; Concurrency; W) compõem o conjunto de atributos associados às transições, onde: Dist representa uma possível função de distribuição de probabilidade associada ao tempo de uma transição; Markdep informa se distribuição de probabilidade associada ao tempo de uma transição é dependente ou ou independente de marcação; Policy define a política de memória adotada; Concurrency é o grau de concorrência das transições e W representa o peso das transições imediatas e a taxa de transições temporizadas.

Assim, *SPNs* são uma variação de RdP e são modelos gráficos usados para descrever sistemas que consistem em eventos e estados discretos. De acordo com (Maciel et al., 1996), a representação gráfica das redes de Petri tem se mostrado muito útil, pois permite a visualização dos processos e comunicação entre eles.

Nas *SPNs*, o tempo dos eventos é modelado por variáveis aleatórias, levando a uma descrição probabilística do comportamento do sistema. É possível simular o comportamento de um sistema ao longo do tempo, avaliar seu desempenho e otimizar seu projeto. Eles são úteis em situações em que o sistema de interesse é muito complexo para os métodos analíticos tradicionais.

Dessa forma, *SPN* foi o método de modelagem ideal para a proposta deste trabalho, considerando as variações de parâmetros como quantidade de equipes, tempos de realização de manutenção, níveis de serviço e quantidade de componentes para garantir redundância nas infraestruturas.

#### 3.6 Diagrama de Bloco de Confiabilidade

Diagrama de bloco de confiabilidade - *RBD* representa a estrutura lógica de um sistema por meio de blocos ligados acordo com suas funções ou uma relação de confiabilidade (Souza, 2017). Em consonância, (Kuo et al. 2003) nos diz que o modelo RBD define o relacionamento lógico entre componentes de um sistema.

*RBD* é uma das técnicas mais usadas para a análise de confiabilidade de sistemas. Sua grande vantagem é a facilidade de analisar a confiabilidade de sistemas (Xie et al., 2004). A confiabilidade de dois blocos conectados em série é obtida através da Equação 3.2, onde C1 representa a confiabilidade do bloco 1 e C2 representa a confiabilidade do bloco 2:

$$Cs = C1 \times C2 \tag{3.2}$$

As estruturas mais correntemente utilizadas em infraestruturas de sistemas computacionais são série, paralelo e série-paralelo (Oggerino, 2001). Para um melhor entendimento, a Figura 3.3 exibe três exemplos, onde os blocos (c1, c2 e c3) são estruturados em série, em seguida, os blocos (c1 e c2) são estruturados em paralelo e finalmente os blocos (c1, c2 e c3), são estruturados em Série-Paralelo, há uma legenda abaixo de cada exemplo nomeando o tipo de estrutura, da esquerda para a direita.

Dessa forma, analisando a Figura 3.3, entende-se que na estrutura em série, se um componente falhar, o sistema inteiro será interrompido, visto que o funcionamento de um componente qualquer, depende de outro. Assumindo uma estrutura com n componentes em série, a confiabilidade (disponibilidade) (Kuo et al., 2003) é obtida através da Equação 3.3, onde  $P_i(t)$  é a confiabilidade ou a disponibilidade do bloco  $c_i$  no tempo t.

1

$$P_{(s)}(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t)$$
(3.3)



Figura 3.3: Estruturas básicas de Diagrama de Blocos de Confiabilidade

Também levando-se em consideração n componentes em uma estrutura em paralelo, a confiabilidade (disponibilidade) do sistema será obtida através da equação 3.4, onde  $P_i(t)$  é a confiabilidade ou a disponibilidade do bloco  $c_i$  no tempo t.

$$P_{(p)}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_i(t))$$
(3.4)

Para calcular a confiabilidade (disponibilidade) de uma estrutura série-paralelo, os resultados das equações relacionadas às estruturas em série devem ser combinados e colocados nas equações relacionados às estruturas em paralelo. Para outros exemplos e equações relacionadas, o leitor dever consultar (Kuo et al., 2003).

#### 3.7 Outras métricas

As medidas mais conhecidas na prática para avaliação de dependabilidade são: Tempo Médio para Falha (Mean Time To Failure - MTTF), Tempo Médio para Reparo (Mean Time To Repair - MTTR) e Tempo Médio entre Falhas (Mean Time Between Failure - MTBF). O MTTF é fornecido pelo fabricante e representa o tempo médio para a falha de um componente. O MTTR é diretamente relacionado à política de manutenção adotada pela organização. Por sua vez, o MTBF é a soma dos tempos de MTTF e MTTR. (Weber, 2011).

Considerando estas definições, pode-se estabelecer as equações de cada medida. Expostas a seguir:

 A Equação 3.5 detalha o MTTF, o tempo médio de ocorrência de falhas no sistema, onde R(t) representa a função confiabilidade (Maciel et al., 2011).

$$MTTF = \int_0^\infty R(t) \times dt \tag{3.5}$$

• A Equação 3.6 detalha o MTTR, considerando-o como o tempo médio de reparo em atividades de manutenção, deixando o sistema indisponível. UA representa a

indisponibilidade e A representa a disponibilidade do sistema, eles são relacionados na Equação 3.7.

$$MTTR = MTTF \times \frac{UA}{A} \tag{3.6}$$

$$UA = 1 - A \tag{3.7}$$

• A Equação 3.8 detalha o MTBF, considerando o tempo médio entre as falhas do sistema, ou seja, o tempo médio entre os estados de manutenção ativos. Normalmente, esta métrica é fornecida pelo fabricante.

$$MTBF = MTTR + MTTF \tag{3.8}$$

Assim, relacionando as Equações construídas anteriormente, podemos estabelecer a disponibilidade estacionária através da Equação 3.9:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{3.9}$$

# Capítulo 4 Modelos *SPN*

Este capítulo apresenta modelos de dependabilidade utilizando o mecanismo de modelagem SPN para quantificar o impacto de diversas estratégias de manutenção considerando tanto um sistema composto de um único componente genérico quanto representações de adaptações de mecanismos de redundância, que são largamente utilizados em projetos de sistemas.

#### 4.1 Modelo Base de Política de Manutenção (BPM)

Incialmente, o modelo Base de Política de Manutenção (BPM), é apresentado na Figura 4.1, através deste modelo será possível quantificar o impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade de um sistema composto de um único componente genérico.



Figura 4.1: Modelo Base de Política de Manutenção (BPM)

Para um melhor entendimento, os lugares podem ser detalhados da seguinte forma, o lugar Nível N1 representa a disponibilidade de uma equipe de manutenção de nível inicial de atuação. Por sua vez, o lugar Nível N2 representa a disponibilidade de uma equipe de manutenção com maior nível de especialização. O lugar X<sub>-</sub>on (neste trabalho, o rótulo X deve ser substituído de acordo com o nome do componente) representa o componente em estado ativo e operacional.

O parâmetro MTTF do componente genérico representa o atraso associado à transição X\_F. Por sua vez, com relação ao parâmetro MTTR, que engloba o tempo administrativo, tempo de deslocamento e tempo médio de reparo de manutenções corretivas deste componente genérico são consideradas duas possibilidades.

Na primeira, há o caso em que o reparo da falha necessitará apenas da intervenção de uma equipe de nível inicial, sendo esta possibilidade representada pelo lugar X\_off1. A outra possibilidade ocorre quando o reparo da falha necessitará da atuação de uma equipe de nível inicial e por outra equipe com maior nível de especialização em caso de dificuldades na atuação da primeira equipe, sendo esta possibilidade representada pelo lugar X\_off2.

Neste modelo foi considerado que em 90% dos reparos será necessária apenas a atuação de uma equipe de nível inicial e em 10% dos reparos será necessária a atuação de uma equipe de nível inicial junto a uma outra equipe com maior nível de especialização. Por sua vez, transições X\_R1 e X\_R2 representam os tempos de reparo quando o componente estiver nos lugares X\_off1 e X\_off2 respectivamente.

Em relação às transições, a Tabela 4.1 detalha os parâmetros associados às transições imediatas deste modelo.

Nome	Peso	Prioridade	Função_Guarda
t1	1	0,9	
t2	1	0,1	

Tabela 4.1: . Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo BPM

#### 4.2 Espera a Frio (EF)

No modelo SPN de dependabilidade apresentado na Figura 4.2 (Guimarães et al., 2013, é explorado e aplicado o mecanismo de redundância espera a frio (Kuo et al., 2003). Em seu funcionamento, pode-se considerar que os lugares X\_on, X\_Sp\_on, X\_off e X\_Sp\_off representam os estados de atividade (X\_on e X\_Sp\_on) e inatividade (X\_off e X\_Sp\_off) dos componentes principal e em espera.

Neste modelo, caso ocorra uma falha do componente principal, a transição X\_ACTSp é habilitada. Vale salientar que seu atraso (delay) representa o tempo de detecção da falha e de ativação do componente em espera. A transição imediata X\_DCTSp representa o retorno ao estado normal de operação após o reparo do componente principal.



Figura 4.2: Modelo Espera a Frio (EF)

As transições X\_F e X\_Sp\_F representam o tempo para falha do componente principal e do componente em espera. Por sua vez, transições X\_R e X\_Sp\_R representam o tempo necessário para reparar estes mesmos componentes. Os tempos de falha e de reparo do componente em espera serão considerados apenas quando este componente estiver em estado de atividade e inatividade, desde que inicialmente este componente está em estado de espera (ver Lugar X\_Espera)

Por fim, as transições temporizadas têm tempo exponencialmente distribuído (exp) e semântica de disparo do tipo single server (ss). Este modelo permite o cálculo da disponibilidade do sistema através da expressão:  $P(\#X_on = 1) \text{ OR } (\#X_Sp_on = 1)$ .

### 4.3 Modular com Reparo e Política de Reposição (MRPR)

Um outro modelo SPN de dependabilidade, é o Modular com Reparo e Política de Reposição (MRPR), apresentado na Figura 4.3 (Guimarães et al., 2020). Este modelo representa uma adaptação do mecanismo de redundância denominado de modular (Chiang et al., 1981) considerando ainda uma política de reposição entre seus componentes. Este modelo pode assumir várias configurações de redundância a partir da definição dos valores de N (número de componentes ativos) e de R (número de componentes em espera).

As N marcações no lugar M\_on representam o número de componentes ativos e operacionais. O número de componentes em espera é representado por R no lugar S\_on. Transições imediatas t2 e t3 representam respectivamente a ocorrência de falhas não detectadas inicialmente, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 20% das ocorrências, e de falhas detectadas inicialmente, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 80%



Figura 4.3: Modelo de Dependabilidade - Modular com Reparo

das ocorrências.

Em relação aos lugares, MD\_off e MND\_off representam os componentes em estado de reparo para o caso de falhas detectadas ou não detectadas inicialmente. A transição MD\_R representa o tempo de reparo para componentes no lugar MD\_off e transição MND\_R representa o tempo de reparo, onde está incluso o tempo para reconhecimento de falhas, para componentes no lugar MND\_off.

Nome	Peso	Prioridade	Função_Guarda
t0	1	2	$((\#S_on \text{ menor que } R)AND(\#M_ON=N))$
t1	1	2	$\#M_{-}$ on menor que N
t2	0,2	3	
t3	0,8	3	
t4	1	7	$((M_on menor que N) AND (\#Falha == 0))$
t5	1	2	$\#M_{-}$ on menor que N
t6	1	2	$((\#S_on \text{ menor que } R) \text{ AND } (\#M_on = N))$
t7	1	5	$((\#MD_{-}off == 0) AND (\#MND_{-}off == 0))$
t8	1	7	$((M_on menor que N) AND (\#Falha == 0))$

Tabela 4.2: . Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo MRPR

A Tabela 4.2 contém os parâmetros das transições imediatas deste modelo. A disponibilidade é calculada pela expressão  $P#M_on = N$ , onde N é o número de componentes ativos. As transições temporizadas deste modelo também possuem distribuições exponenciais e semântica de disparo do tipo *Single Server* (SS).

As transições imediatas t0 e t6 são ativadas quando (#S\_on menor que R AND #M\_on = N) e as transições t1 e t5 são ativadas quando (#M\_on menor que N). Na ocorrência e detecção de falhas, o componente com defeito é substituído pelo componente em espera quando houver componentes em espera disponíveis. Neste caso, transições t4 e t8 irão disparar devolvendo assim a marcação para o lugar M\_on.

Por fim, o reparo de algum componente que estava no estado de espera poderá apenas ocorrer no caso em que nenhum componente que estava em estado ativo esteja sendo reparado. Isto é representado no modelo pela função de guarda detalhada para a transição t7.

## Capítulo 5

### Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada na realização deste trabalho, que consiste na execução de oito atividades que são intituladas como: entendimento do problema; definição de parâmetros; cálculo do índice de importância da disponibilidade; definição de arquiteturas; criação de modelos; validação dos modelos; análise de estratégias de políticas de manutenção e análise dos resultados, como detalhado na Figura 4.1.

![](_page_33_Figure_3.jpeg)

Figura 5.1: Metodologia Proposta

A primeira atividade ocorre o entendimento do problema, isso também engloba a definição dos componentes. Para executar desta atividade, pode-se evidenciar ações como: especificação da estrutura inicial do sistema (componentes e interfaces); definição do ambiente e definição do conjunto de métricas utilizadas para a análise do sistema.

A definição dos parâmetros de interesse, relacionados tanto aos próprios componentes quanto às manutenções preventivas e/ou corretivas adotadas pelo sistema ocorreu na segunda atividade. Para os componentes do sistema, as informações relacionadas ao MTTF de cada componente foram obtidas tanto a partir de seus respectivos fabricantes quanto a partir de estudos científicos relacionados.

Nas manutenções preventivas e/ou corretivas, os parâmetros foram relacionados aos níveis de *SLAs* acordados. Assim, cada nível definiu informações tais como: a perio-

dicidade das manutenções preventivas, tempo de deslocamento, tempo administrativo e tempo médio de reparo relacionados às manutenções corretivas. Estas informações são utilizadas como parâmetros para os modelos de análise do impacto de diferentes políticas de manutenção sobre a disponibilidade estacionária do sistema.

Na terceira atividade, através da Equação 5.1, foi realizado o cálculo do índice de importância para disponibilidade (Barabady et al., 2007) associado a cada um dos principais componentes das infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema data center.

$$A_s = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \tag{5.1}$$

Na Equação 5.1,  $A_s$  representa a disponibilidade estacionária do sistema, e  $A_i$  a disponibilidade estacionária de um componente *i*. A importância para disponibilidade é um valor que varia de 0 a 1, quanto maior o valor, maior é o impacto do componente sobre a disponibilidade estacionária do sistema.

No caso de um sistema em série ou paralelo, o valor de  $A_s$  pode ser obtido através das Equação 3.3 e 3.4, respectivamente. Por fim, a disponibilidade do componente *i* com dois estados é obtida através da Equação 4.2:

$$A = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i} \tag{5.2}$$

Na quarta atividade ocorreu a definição de arquiteturas redundantes associadas às infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de data center. Inicialmente, arquiteturas distintas foram caracterizadas por diferentes adaptações de técnicas de redundância, que são largamente utilizadas em projetos destes sistemas. A partir disso, foram propostas novas arquiteturas através da alocação de mecanismos de redundância aos componentes com maior índice de importância para disponibilidade com o intuito de analisar o impacto da adoção destes mecanismos juntamente com diversas estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade estacionária do sistema.

Na quinta atividade foram criados os modelos para a análise do impacto de diferentes políticas de manutenção, baseadas nos diferentes níveis de SLA, sobre a disponibilidade estacionária do sistema. Nestes modelos, as características do sistema, mecanismos de redundância, nível de interação entre os componentes e as políticas de manutenção determinaram se seriam utilizados *SPN* ou *RBD*. Esta atividade foi executada pela composição de cada componente do sistema de acordo com regras específicas de cada um dos mecanismos de modelagem e pelo mapeamento das métricas desejadas através de expressões representadas pelos elementos de cada modelo.

A vantagem da utilização de modelos não baseados em espaço de estados é que eles são eficientes para a especificação e resolução de problemas. Contudo, a solução destes modelos assume a independência estocástica dos componentes. Por exemplo, em *RBD* os componentes devem ser completamente independentes uns dos outros em termos de comportamentos de falha e de reparo.

A falha em um dos componentes não poderá afetar a operação de outro componente, e os componentes não podem compartilhar recursos de reparo. Modelos baseados em espaço de estados, tais como *SPN*, por sua vez, proporcionam a habilidade de modelar sistemas que violam a suposição feita pelos modelos não baseados em espaço de estados, *RBD*, ao preço da possibilidade de explosão do espaço de estados (Bolch et al., 2006). A ferramenta Timenet (Zimmermann, A., 2000) foi utilizada para a construção dos modelos.

Na atividade Validação de Modelos analisamos e efetuamos ajustes nos modelos, quando necessário. Para esta atividade, a ferramenta token game (Zimmermann, A., 2000) foi utilizada. O fim desta fase foi alcançado quando cada modelo proporcionou resultados com a exatidão apropriada.

Na sétima atividade, ocorreu uma análise de estratégias de políticas de manutenção considerando diversos cenários/arquiteturas foi executada utilizando os modelos criados. Esta atividade buscou obter informações importantes para o estabelecimento de estratégias adequadas. Finalmente, ocorreu a etapa de análise dos resultados obtidos, que foram interpretados e expostos neste trabalho.

### Capítulo 6

### Estudo de Caso

Este capítulo apresenta um estudo de caso que tem por objetivo analisar o impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade estacionária das infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de data center. Neste trabalho, vamos considerar o caso particular de infraestruturas de refrigeração e de potência dimensionadas para proporcionar suporte à infraestrutura de comunicação proposta em (Guimarães *et al.*, 2020).

As infraestruturas utilizadas neste estudo de caso foram apresentadas no Capítulo 3. Assim, para a infraestrutura de refrigeração, são considerados como seus principais componentes: CRACs (sigla proveniente do inglês Computer Room Air Conditioning), resfriador e torre de refrigeração. Foi utilizada a ferramenta Power Advisor (HPE Power Advisor, 2023) para calcular a quantidade de BTUs (sigla proveniente do inglês British Thermal Unit) necessária para proporcionar suporte a infraestrutura de comunicação, considerando sua potência instalada. Foi calculado a necessidade de 312.000 BTUs distribuídos em dezoito CRACs. Por sua vez, para a infraestrutura de potência, são considerados os principais componentes da proposta em (Govindan et al., 2010): UPS, PDU, ATS, Subestação e Gerador.

Os valores de MTTF relacionados aos componentes das infraestruturas de refrigeração e de potência foram obtidos em (Silva et al., 2015) e são mostrados na Tabela 6.1.

Componente	MTTF (h)	Componente	MTTF (h)
CRAC	37.059	Resfriador	18.000
Torre de Refrigeração	24.816	Subestação	257,069
Gerador	9.708,74	ATS	102.145,05
UPS	27.472,53	PDU	555.555,55

Tabela 6.1: . Métricas de Dependabilidade

As Tabelas 6.2 e 6.3 detalham os parâmetros dos diferentes cenários para as políticas de manutenção corretiva que serão adotados para a análise da disponibilidade estacionária das infraestruturas de refrigeração e de potência.

Para cada componente é considerado o MTTR, que abrange o tempo administrativo, tempo de deslocamento e tempo médio de reparo de manutenções corretivas, quando uma equipe de nível inicial de atuação (Nível1) está reparando o componente e o MTTRquando ocorre a atuação de uma outra equipe mais especializada tecnicamente em caso de dificuldades na atuação da equipe de nível inicial (Nível1\_Nível2). Por este motivo, os tempos de reparo que consideram equipes de nível inicial e equipes com maior nível de especialização apresentam os maiores valores de MTTR.

Componente	Cenário_1	Cenário_2	Cenário_3
MTTR_TRefrig_N1	40h	1 48h	56h
MTTR_TRefrig_N1N2	44h	52h	60h
MTTR_Resfr_N1	40h	48h	56h
MTTR_Resf_N1N2	44h	52h	60h
MTTR_CRAC_N1	4h	8h	12h
MTTR_CRAC_N1N2	6h	10h	14h

Tabela 6.2: . Definição de tempo de reposição em diferentes cenários - Infraestrutura de Refrigeração

Componente	Cenário_1	Cenário_2	Cenário_3
MTTR_Subestação_N1	0,032h	0,049h	0,066h
MTTR_Subestação_N1N2	1,032h	1,049h	1,066h
MTTR_Gerador_N1	4h	8h	12h
MTTR_Gerador_N1N2	6h	10h	14h
MTTR_ATS_N1	5,88h	9,88h	13,88h
MTTR_ATS_N1N2	7,88h	11,88h	15,88h
MTTR_UPS_N1	8,33h	12,33h	16,33h
MTTR_UPS_N1N2	10,33h	14,33h	18,33h
MTTR_PDU_N1	62,5h	70,5h	78,5h
MTTR_PDU_N1N2	66,5h	74,5h	82,5h

Tabela 6.3: . Definição de tempo de reposição em diferentes cenários - Infraestrutura de Potência

Seguindo os passos da metodologia proposta, a Tabela 6.4 mostra os valores de importância para disponibilidade obtidos a partir dos componentes das infraestruturas de refrigeração e de potência para proporcionar dados à definição de arquiteturas redundantes associadas a estas infraestruturas. Para o cálculo deste índice foi utilizado as fórmulas estabelecidas na metodologia proposta e definido um modelo *RBD* em série considerando uma arquitetura sem redundância de cada infraestrutura.

Com relação à infraestrutura de refrigeração, o resfriador possui o maior valor deste índice sendo seguido pelos componentes torre de refrigeração e *CRAC*. A ordem destes valores irá determinar o incremento da redundância nas arquiteturas propostas. A exceção para a alocação de redundâncias acontece com o componente torre de refrigeração, que possui um custo de aquisição muito elevado inviabilizando a adoção de redundância.

Componente	Import. p/ Disponib.	Componente	Import. p/ Disponib.
Resfriador	1,00	Torre de Refrigeração	0,999269
CRAC	0,997555	Subestação	0,9998244
UPS	1,00	PDU	0,9998093

Tabela 6.4: . Valores de importância para disponibilidade.

Desta forma, foram alocadas redundâncias para os componentes resfriador e CRAC. Com relação à infraestrutura de potência, pode-se verificar que o componente UPS possui o maior índice de importância para disponibilidade sendo seguido pelos componentes subestação e PDU. Seguindo os valores de importância para disponibilidade, foram alocadas redundâncias para os componentes UPS e Subestação.

#### 6.1 Infraestrutura de Refrigeração

A seguir são detalhados os modelos desenvolvidos para representar a infraestrutura de refrigeração de um sistema datacenter com e sem redundância.

#### 6.1.1 Infraestrutura de Refrigeração sem Redundância

A Figura 6.1 mostra o modelo *SPN* para análise do impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade estacionária da infraestrutura de refrigeração considerando uma arquitetura sem redundância. O funcionamento do modelo é explicado da seguinte forma:

Na parte superior do modelo, tem-se o lugar Sem\_Manut, que representa a infraestrutura de refrigeração entre manutenções preventivas. Ao seu lado, encontra-se a transição Inic.\_Manut, que representa o tempo de espera para entrar em estado de manutenção preventiva, que por sua vez é representado pelo lugar Manut. A transição Term\_Manut representa o tempo de duração da manutenção preventiva do sistema.

Em relação às equipes, o lugar Nível 1 representa a disponibilidade de equipes de manutenção de nível inicial de atuação. Por sua vez, o lugar Nível 2 representa a disponibilidade de equipes de manutenção com maior nível de especialização. O sistema apenas entrará em estado de manutenção preventiva se ocorrer disponibilidade de duas equipes de nível inicial de atuação e de uma equipe com um maior nível de especialização simultaneamente. Isto está representado por um arco com peso 2 oriundos do lugar Nível 1 para a transição imediata t21 e por um arco com peso 1 oriundo do lugar Nível 2 para esta mesma transição.

Os lugares X\_on representam os componentes da infraestrutura de refrigeração no estado operacional e ativo. Os lugares X\_off1 e X\_off2 representam os componentes desta infraestrutura no estado de reparo com as seguintes características: X\_off1 representa o estado em que o reparo está sendo efetuado apenas por uma equipe de nível inicial

![](_page_39_Figure_1.jpeg)

Figura 6.1: Modelo SPN referente à Infraestrutura de Refrigeração sem redundância

de atuação. X\_off2 representa o estado em que o reparo está sendo efetuado por uma equipe de nível inicial e por outra equipe com um maior nível de especialização. Por sua vez, transições X\_R1 e X\_R2 representam os diferentes tempos de reparo quando os componentes desta infraestrutura estiverem nos lugares X\_off1 e X\_off2.

Os lugares M\_D e MND representam os estados de falha detectada e de falha não detectada respectivamente. Com relação ao estado de falha não detectada, o tempo de reconhecimento de falha é adicionado aos tempos de reparo correspondentes. Por fim, o parâmetro MTTF de cada componente representa o atraso associado às transições X\_F.

Nome	Peso	Prioridade	Função_Guarda
t1	1	6	$\#M_{-}on < 18$
t2	0,2	3	
t3	0,8	3	
t8	1	6	$\#M_{-}on < 18$
tx1	0,9	2	
tx2	0,1	2	

Tabela 6.5: . Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo SPN referente a Infraestrutura de Refrigeração sem redundância

As transições t1 e t8 apenas serão ativadas quando o número de marcações no lugar M\_on for menor que 18 (#M\_on menor que 18). As transições t2 e t3 representam respectivamente a ocorrência de falhas não detectadas inicialmente, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 20% das ocorrências, e de falhas detectadas inicialmente, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 80% das ocorrências.

A transição imediata t4 representa a ocorrência de falhas que conduzem ao estado representado pelo lugar X<sub>o</sub>ff1, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 90% destas ocorrências. Por sua vez, a transição t5 representa a ocorrência de falhas que conduzem ao estado representado pelo lugar X<sub>o</sub>ff2, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 10% destas ocorrências.

De maneira semelhante, os pares de transições t6 e t7, t9 e t10, t11 e t12 representam estes mesmos parâmetros e são representados como tx1 e tx2 na Tabela 6.5, que também mostra os todos parâmetros associados às transições imediatas do modelo da Figura 6.1.

#### 6.1.2 Infraestrutura de Refrigeração com Redundância

A Figura 6.2 mostra o modelo *SPN* para análise do impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade estacionária da infraestrutura de refrigeração considerando uma arquitetura com redundância.

![](_page_40_Figure_6.jpeg)

Figura 6.2: Modelo SPN referente à Infraestrutura de Refrigeração com redundância

Na região superior do modelo, os lugares Sem\_Manut, Manut, Nível 1 e Nível 2 juntamente com as transições Inic.\_Manut, Term\_Manut e t21 possuem as mesmas representações para o sistema conforme descrito no modelo mostrado na Figura 6.1.

Os lugares X\_on representam os componentes principais e redundantes desta infraestrutura (CRAC, Resfriador, Torre de Refrigeração) em estado ativo e operacional. Os lugares X\_off1 representam os estados em que o reparo é efetuado apenas pela equipe de nível inicial de atuação. Os lugares X\_off2 representam os estados em que o reparo está sendo efetuado por uma equipe de nível inicial e por outra equipe com um maior nível de especialização. Os lugares M\_D e MND representam os estados de falha detectada e de falha não detectada respectivamente. Com relação ao estado de falha não detectada, o tempo de reconhecimento de falha é adicionado aos tempos de reparo correspondentes. Os dezoito componentes *CRACs* ativos e operacionais, representados no lugar M\_on, possuem dois componentes redundantes representados no lugar S\_on. Estes componentes redundantes podem falhar também.

Este mecanismo de redundância é denominado de modular com reparo e política de reposição (Guimarães et al., 2020). Em caso de falha do componente resfriador principal, a partir de seu estado ativo e operacional (Resf1\_on), o componente resfriador redundante irá então se tornar ativo e operacional (Resf2\_on) através do disparo da transição inicializar. O disparo da transição t14 representa o retorno à condição inicial após a restauração do componente resfriador principal. Este mecanismo de redundância é denominado de espera a frio (Kuo et al., 2003).

Nome	Peso	Prioridade	Função_Guarda
t0	1	6	$\#M_{-}on = 18 \text{ AND } \#S_{-}on < 2$
t1	1	6	$\#M_{-}on < 18$
t2	0,2	3	
t3	0,8	3	
t4	1	8	$((\#M_on < 18) \text{ AND } (\#Falha==0))$
t7	1	8	$((\#M_on < 18) \text{ AND } (\#Falha==0))$
t8	1	6	$\#M_{-}on < 18$
t9	1	6	$\#M_{on} = 18 \text{ AND } \#S_{on} < 2$
t12	0,9	2	#Resf1_Off1=0 AND #Resf1_Off2=0 AND
			#P10=0
t13	0,1	2	#Resf1_Off1=0 AND #Resf1_Off2=0 AND
			#P10=0
t14	1	7	#Resf1_Off1=0 AND #Resf1_Off2=0 AND
			#P10=0
t19	0,9	2	((#MND_off1=0) AND (#MND_Off2=0) AND
			$(\#MD_Off1=0) AND (\#MD_Off2=0))$
t20	0,1	2	((#MND_off1=0) AND (#MND_Off2=0) AND
			$(\#MD_Off1=0) AND (\#MD_Off2=0))$
tx1	0,1	2	—
tx2	0,9	2	

Tabela 6.6: . Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo SPN referente à Infraestrutura de Refrigeração com redundância

O parâmetro MTTF de cada um dos componentes (principal e redundante) da infraestrutura de refrigeração representa o atraso associado às transições X\_F. Por sua vez, as transições X\_R1 e X\_R2 representam os diferentes tempos de reparo quando os componentes desta infraestrutura estiverem nos lugares X\_off1 e X\_off2.

As transições imediatas t1 e t8 representam o retorno do componente CRAC, que foi

reparado para o estado ativo e operacional (lugar M\_on). As transições t0 e t9 representam o retorno do componente *CRAC* reparado para o estado ativo e não operacional (lugar S\_on).

As transições imediatas t2 e t3 representam respectivamente a ocorrência de falhas não detectadas inicialmente, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 20% das ocorrências, e de falhas detectadas inicialmente, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 80% das ocorrências. Na ocorrência e detecção de falhas de componentes do tipo CRAC, o componente com defeito é substituído pelo componente em espera quando houver componentes em espera disponíveis.

Neste caso, as transições t4 e t7 irão disparar devolvendo assim a marcação para o lugar M\_on. A transição imediata t5 representa a ocorrência de falhas que conduzem ao estado representado pelo lugar X\_off1, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 90% destas ocorrências.

Por sua vez, transição t6 representa a ocorrência de falhas que conduzem ao estado representado pelo lugar X<sub>off2</sub>, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 10% destas ocorrências. De maneira semelhante, os pares de transições t10 e t11, t12 e t13, t15 e t16, t17 e t18, t19 e t20 representam estes mesmos parâmetros e são representados como tx1 e tx2 na Tabela 6.6, que também mostra os parâmetros associados às transições imediatas do modelo da Figura 6.2.

Além disso, o modelo mostrado na Figura 6.2 ainda representa uma política de manutenção interna entre os componentes ativos e redundantes desta arquitetura. O componente Resfriador2 não poderá ser reparado caso o componente principal (Resfriador1) esteja em reparo (ver função de guarda das transições t12 e t13). Com relação aos CRACs, qualquer um dos componentes redundantes apenas poderá ser reparado caso algum dos componentes principais não estejam sendo reparados (ver função de guarda das transições t19 e t20).

#### 6.2 Infraestrutura de potência

A seguir é detalhado o funcionamento dos modelos desenvolvidos para representar a infraestrutura de potência com e sem redundância de um sistema datacenter.

#### 6.2.1 Infraestrutura de Potência sem Redundância

A Figura 6.3 mostra o modelo *SPN* para análise do impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade estacionária da infraestrutura de potência considerando uma arquitetura sem redundância. Na região inferior, os lugares Sem\_Manut, Manut, Nível 1 e Nível 2 juntamente com as transições Inic.\_Manut, Term\_Manut e t21, possuem as mesmas representações para o sistema conforme descrito

na Figura 6.1.

Os lugares X\_on representam os componentes da infraestrutura de potência em estado operacional e ativo. Os lugares X\_off1 representam os estados em que o reparo é efetuado apenas pela equipe de inicial de atuação. Os lugares X\_off2 representam os estados em que o reparo é efetuado por uma equipe de nível inicial e por outra equipe com um maior nível de especialização.

![](_page_43_Figure_3.jpeg)

Figura 6.3: Modelo SPN referente a Infraestrutura de Potência sem redundância

O parâmetro MTTF de cada um dos componentes da infraestrutura de potência representa o atraso associado às transições X\_F. Por sua vez, as transições X\_R1 e X\_R2 representam os diferentes tempos de reparo quando os componentes desta infraestrutura estiverem nos lugares X\_off1 e X\_off2.

Nome	Peso	Prioridade	Função_Guarda
tx1	0,9	2	
tx2	$^{0,1}$	2	

Tabela 6.7: . Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo SPN referente a Infraestrutura Potência sem redundância

A transição imediata t1 representa a ocorrência de falhas que conduzem ao estado representado pelo lugar X\_off1, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 90% destas ocorrências. Por sua vez, a transição t2 representa a ocorrência de falhas que conduzem ao estado representado pelo lugar X\_off2, para as quais foi atribuída uma

probabilidade de 10% destas ocorrências. As transições t3 e t4, t5 e t6, t7 e t8 representam estes mesmos parâmetros e são representadas na Tabela 6.7 como tx1 e tx2.

#### 6.2.2 Infraestrutura de Potência com Redundância

A Figura 6.4 mostra o modelo *SPN* para análise do impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade estacionária da infraestrutura de potência, considerando uma arquitetura com redundância. Assim como os modelos anteriores, os lugares Sem\_Manut, Manut, Nível 1 e Nível 2 juntamente com as transições Inic.\_Manut, Term\_Manut e t21, possuem as mesmas representações para o sistema conforme descrito na Figura 6.1.

![](_page_44_Figure_4.jpeg)

Figura 6.4: Modelo SPN referente a Infraestrutura de Potência com redundância

O componente Gerador proporciona redundância em caso de falha do componente Subestação através do disparo das transições t10 e Inicializar1. Por sua vez, com relação ao componente UPS, se o componente principal em estado ativo e operacional ( $UPS1_on$ ) falhar, o componente redundante irá se tornar ativo e operacional ( $UPS2_on$ ) através do disparo da transição Inicializar2. O mecanismo de redundância utilizado para os componentes Subestação/Gerador e UPS1/UPS2 é denominado de espera a frio (Kuo et al., 2003). Os lugares X\_on representam os componentes principais e os redundantes em estado operacional e ativo. Os lugares X\_off1 representam os estados em que o reparo é efetuado apenas pela equipe de nível de inicial de atuação. Os lugares X\_off2 representam os estados em que o reparo está sendo efetuado por uma equipe de nível inicial e por outra equipe com um maior nível de especialização.

O parâmetro MTTF de cada componente (principal e redundante) desta infraestrutura representa o atraso associado às transições X\_F. Por sua vez, as transições X\_R1 e X\_R2 representam os diferentes tempos de reparo quando os componentes desta infraestrutura estiverem nos lugares X\_off1 e X\_off2.

Nome	Peso	Prioridade	Função_Guarda
t9	1	4	$\#Sb_on == 1$
t10	1	5	$\#Sb_on == 0$
t11	1	4	$\#Sb_{-}on == 1$
t18	1	3	$\#$ UPS1_on == 1
tx1	0,1	2	
tx2	0,9	2	

Tabela 6.8: . Parâmetros utilizados nas transições imediatas no Modelo SPN referente a Infraestrutura Potência com redundância

Por sua vez, as transições t9 e t11 representam o retorno do componente gerador para seu estado inicial de espera. De maneira semelhante, o disparo da transição t18 representa o retorno à condição inicial após a restauração do componente UPS1. A transição imediata t1 representa a ocorrência de falhas que conduzem ao estado representado pelo lugar X\_off1, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 90% destas ocorrências. Por sua vez, transição t2 representa a ocorrência de falhas que conduzem ao estado representado pelo lugar X\_off2, para as quais foi atribuída uma probabilidade de 10% destas ocorrências.

As transições t3 e t4, t5 e t6, t7 e t8, t12 e t13, t14 e t15, t16 e t17 representam estes mesmos parâmetros e são representadas como tx1 e tx2 na Tabela 6.8, que também mostra os parâmetros associados às transições imediatas do modelo da Figura 6.4.

Após a construção dos modelos, serão analisados os impactos que diferentes estratégias de políticas de manutenção preventiva e corretiva, representadas por diferentes contratos de *SLAs*, possuem sobre a disponibilidade estacionária da infraestrutura de refrigeração considerando suas arquiteturas sem redundância e com redundância respectivamente. A Figura 6.5 detalha os dados obtidos a partir de uma arquitetura sem redundância, ao passo que Figura 6.6 detalha os dados obtidos a partir de uma arquitetura com redundância.

Os *SLAs* definidos neste trabalho correspondem aos diferentes valores de manutenção preventiva (720 h, 2.160 h, 4.320 h, 8.760 h) junto aos diferentes cenários definidos para a manutenção corretiva que foram detalhados nas Tabelas 6.2 e 6.3 para as infraestruturas de refrigeração e potência, respectivamente.

Um intervalo de manutenção preventiva de 720 h junto aos parâmetros dos cenários

1, 2 e 3 corresponde aos contratos de SLA níveis I, II e III respectivamente. Por sua vez, um intervalo de manutenção preventiva de 2160 h junto aos parâmetros dos cenários 1, 2 e 3 corresponde aos contratos de SLAs níveis IV, V e VI respectivamente.

Um intervalo de manutenção preventiva de 4320 h junto aos parâmetros dos cenários 1, 2 e 3 corresponde aos contratos de SLAs níveis VII, VIII e IX respectivamente. Por fim, um intervalo de manutenção preventiva de 8760 h junto aos parâmetros dos cenários 1, 2 e 3 corresponde aos contratos de SLAs níveis X, XI e XII respectivamente.

![](_page_46_Figure_3.jpeg)

Figura 6.5: Disponibilidade em Infraestruturas de Refrigeração, Arquitetura sem Redundância

![](_page_46_Figure_5.jpeg)

Figura 6.6: Disponibilidade em Infraestruturas de Refrigeração, Arquitetura com Redundância

As Figuras 6.5(a) e 6.6(a) mostram a disponibilidade estacionária relacionada aos SLAs I, IV, VII e X. As Figuras 6.5(b) e 6.6(b) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs II, V, VIII e XI. Por fim, as Figuras 6.5(c) e 6.6(c) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs III, V, VIII e XI. Por fim, as Figuras 6.5(c) e 6.6(c) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs III, VI, IX e XII. As figuras demonstram o impacto que diferentes períodos de manutenção preventiva e corretiva impõe sobre a disponibilidade estacionária da infraestrutura de refrigeração tanto em uma arquitetura sem redundância quanto em uma arquitetura com redundância.

Por outro lado, serão analisados os impactos que diferentes estratégias de políticas de manutenção preventiva e corretiva, representadas por diferentes contratos de *SLAs*, possuem sobre a disponibilidade estacionária da infraestrutura de potência considerando suas arquiteturas sem redundância e com redundância respectivamente. A Figura 6.7 detalha os dados obtidos a partir de uma arquitetura sem redundância, ao passo que a Figura 6.8 detalha os dados obtidos a partir de uma arquitetura com redundância.

As Figuras 6.7(a) e 6.8(a) mostram a disponibilidade estacionária relacionada aos SLAs I, IV, VII e X. As Figuras 6.7(b) e 6.8(b) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs II, V, VIII e XI. Por fim, as Figuras 6.7(c) e 6.8(c) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs III, V, VIII e XI. Por fim, as Figuras 6.7(c) e 6.8(c) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs III, VI, IX e XII. As figuras demonstram o impacto que diferentes períodos de manutenção preventiva e corretiva impõe sobre a disponibilidade estacionária da infraestrutura de potência tanto em uma arquitetura sem redundância quanto em uma arquitetura com redundância.

![](_page_47_Figure_2.jpeg)

Figura 6.7: Disponibilidade em Infraestruturas de Potência, Arquitetura sem Redundância

![](_page_47_Figure_4.jpeg)

Figura 6.8: Disponibilidade em Infraestruturas de Potência, Arquitetura com Redundância

Como detalhado na descrição dos modelos *SPN*, foi considerado que em 90% das manutenções corretivas é necessária a atuação de apenas uma equipe de nível inicial e que em 10% destas manutenções é necessária a atuação tanto de uma equipe de nível inicial quanto de uma outra equipe com maior nível de especialização.

Os modelos *SPN* construídos para a análise do impacto de diferentes políticas de manutenção sobre a disponibilidade das infraestruturas de refrigeração e potência de um sistema data center, considerando arquiteturas sem e com redundância, foram parametrizados para também considerar, em relação ao número total de ocorrências de manutenções corretivas, diferentes percentuais de atuação de uma única equipe de nível inicial.

Assim, foram realizadas análises do impacto que a variação do percentual de manutenções que utilizam uma equipe com nível inicial de atuação, em relação ao total de manutenções corretivas, possui sobre a disponibilidade das infraestruturas de refrigeração e de potência, arquiteturas sem e com redundância. Estas análises consideram percentuais de atuação de 90%, 80%, 70% e 60%.

As Figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 detalham a variação da disponibilidade estacionária das infraestruturas de refrigeração e de potência, considerando-se as arquiteturas sem redundância e com redundância, respectivamente, em função do percentual de ocorrências de manutenções corretivas que apenas necessitam da atuação de uma única equipe de nível inicial.

![](_page_48_Figure_3.jpeg)

Figura 6.9: Atuação equipe N1, em relação ao total de manutenções corretivas, Infraestrutura de Refrigeração sem redundância

![](_page_48_Figure_5.jpeg)

Figura 6.10: Atuação equipe N1, em relação ao total de manutenções corretivas, Infraestrutura de Refrigeração com redundância

![](_page_48_Figure_7.jpeg)

Figura 6.11: Atuação equipe N1, em relação ao total de manutenções corretivas, Infraestrutura de Potência sem redundância

Em muitos sistemas, é desejável definir o parâmetro que possui maior impacto sobre sua disponibilidade. Segundo (Kuo et al, 2003), análise de sensibilidade é uma estratégia que avalia as variações de parâmetros de entrada de um sistema e identifica o quanto estas variações podem interferir na sobre uma métrica associada à saída do mesmo.

Foram realizadas análises dos parâmetros do sistema que possuem maior impacto sobre sua disponibilidade considerando diferentes arquiteturas e diferentes percentuais

![](_page_49_Figure_1.jpeg)

Figura 6.12: Atuação equipe N1, em relação ao total de manutenções corretivas, Infraestrutura de Potência com redundância

de ocorrências de atuação de uma equipe de nível inicial em manutenções corretivas. Foram utilizados o mecanismo de análise de sensibilidade juntamente com os modelos SPN construídos. Este mecanismo utiliza o método de diferença percentual (Hoffman et al., 1983) que calcula a diferença percentual das saídas quando um parâmetro de entrada é variado entre seus valores máximo e mínimo utilizando a Equação 6.1. Nesta equação,  $max{Y(\theta)}$  e  $min{Y(\theta)}$  são os valores máximo e mínimo das saídas calculados ao variar o parâmetro  $\theta$  ao longo de n possíveis valores.

$$A = \frac{max\{Y(\theta)\}}{min\{Y(\theta)\}} \tag{6.1}$$

As Tabelas 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 detalham os índices de análise de sensibilidade calculados a partir dos principais parâmetros dos componentes considerados nas arquiteturas das infraestruturas de potência e refrigeração, considerando arquiteturas sem e com redundância, aplicando o método de diferença percentual. Foram realizadas análises considerando a variação do percentual, em relação ao total de manutenções corretivas, de manutenções que utilizam uma equipe com nível inicial de atuação. Os percentuais considerados foram de 90%, 80%, 70% e 60%.

O parâmetro com maior impacto sobre a disponibilidade da infraestrutura de potência, arquitetura sem redundância, é o tempo de reparo relacionado ao componente Subestação aonde são necessários uma equipe de nível inicial juntamente com uma outra equipe com maior nível de especialização (MTTR\_Subestação\_Nível\_1\_Nível\_2).

Além disso, as tabelas também mostram que o parâmetro com maior impacto sobre a disponibilidade desta infraestrutura, arquitetura com redundância, são os tempos de reparo aonde é necessária apenas uma equipe de nível inicial relacionados aos componentes PDU1 e PDU2 (MTTR\_PDU1\_Nível\_1 e MTTR\_PDU2\_Nível\_1).

Considerando a infraestrutura de refrigeração, arquitetura com redundância, o parâmetro com maior impacto sobre sua disponibilidade é o tempo de reparo relacionado ao componente Resfriador Principal em que é necessária apenas uma equipe de nível inicial (MTTR\_ResfrP\_Nível\_1).

Com relação a esta infraestrutura, arquitetura sem redundância, para os casos em que 90% e 80% de manutenções corretivas utilizam uma equipe com nível inicial de

atuação, o parâmetro com maior impacto sobre a disponibilidade é o tempo de reparo relacionado ao componente Resfriador (MTTR\_ResfrP\_Nível\_1). Para esta mesma arquitetura/infraestrutura, mas considerando que 70% e 60% de manutenções corretivas utilizam uma equipe com nível inicial de atuação, o parâmetro com maior impacto sobre a disponibilidade é o tempo de reparo relacionados aos componentes CRAC (MTTR\_CRACP\_Nível\_1).

#### 6.3 Resultados

As Figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8 detalham o impacto que os diferentes níveis *SLAs* possuem sobre a disponibilidade de cada infraestrutura e em consequência sobre seu downtime. Diferentes valores de disponibilidade podem ser também obtidos diversas arquiteturas com níveis de redundância distintos.

Vemos que o período de 720 h entre manutenções preventivas apresenta o maior nível de disponibilidade em seus diferentes cenários e conforme o período entre manutenções preventivas aumenta, a disponibilidade do sistema diminui.

Considerando ainda os cenários detalhados nas Tabelas 6.2 e 6.3, o impacto da variação da periodicidade entre manutenções preventivas sobre a disponibilidade estacionária das infraestruturas é menor em arquiteturas redundantes devido aos mecanismos de redundância inseridos entre os componentes destas arquiteturas.

As Figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 mostram que quanto maior o percentual de manutenções corretivas que utilizam uma única equipe, maior a disponibilidade do sistema o que acarreta menores custos com manutenção e parada do sistema. Desta maneira, ações que busquem priorizar manutenções que utilizam uma equipe com nível inicial de atuação devem ser tomadas.

Os valores considerados foram de 90%, 80%, 70% e 60% em relação ao total de manutenções corretivas em cada um dos componentes das infraestruturas/arquiteturas analisadas. Normalmente, estes dados variam em função do ambiente computacional estudado. Desta forma, adaptações do modelo para cada ambiente devem ser realizado a fim de se obter resultados mais próximos possíveis da realidade.

É essencial destacar uma limitação desta análise: apesar de alocar valores de MTTF o mais próximo possível a valores encontrados em componentes reais, devido à variedade de marcas de fabricantes, esses valores podem diferir significativamente, o que pode causar impacto sobre os resultados.

Por fim, este trabalho buscou a proporcionar uma análise, de maneira comparativa, de como diferentes fatores das manutenções corretivas e preventivas afetam a disponibilidade estacionária do sistema considerando as infraestruturas de refrigeração e potência com arquiteturas que possuem diferentes níveis de redundância.

Infraestrutura de Potência			
Componente	Sem Redundância	Com Redundância	
MTTR_Subestação_Nível_1	0,0001083467	0,0000036	
MTTR_Subestação_Nível_1_Nível_2	0,000388123	0,000000723	
MTTF_Sub	0,0002483211	0,0000048634	
MTTR_Gerador_Nível_1		0,000000039	
MTTR_Gerador_Nível_1_Nível_2		0	
MTTF_Gerador		0,000000165	
Inicializar_Gerador		0,0000084115	
MTTR_ATS_Nível_1		0,000050134	
MTTR_ATS_Nível_1_Nível_2		0,0000074617	
MTTF_ATS		0,0000287991	
MTTR_UPSP_Nível_1	0,0002639374	0,0000024	
MTTR_UPSP_Nível_1_Nível_2	0,0000363243	0,000000408	
MTTF_UPSP	0,0001501851	0,000000761	
MTTR_UPSR_Nível_1	_	0	
MTTR_UPSR_Nível_1_Nível_2 - 0			
MTTF_UPSR	_	0,000000468	
Inicializar_UPS	_	0,000000586	
MTTR_PDU1_Nível_1	0,0000979654	0,0000979673	
MTTR_PDU1_Nível_1_Nível_2	0,000011577	0,0000115771	
MTTF_PDU1	0,0000547758	0,0000547771	
MTTR_PDU2_Nível_1	0,0000979654	0,0000979673	
MTTR_PDU2_Nível_1_Nível_2	0,000011577	0,0000115771	
MTTF_PDU2	0,0000547758	0,0000547771	
Infraestrutura	de Refrigeração	1	
Componente	Sem Redundância	Com Redundância	
MTTR_TRefrigNível_1	0,0011201976	0,0000025074	
MTTR_T.RefrigNível_1_Nível_2	0,0001400528	0,000003037	
MTTF_TRefrig.	0,0009752905	0,0000021765	
MTTR_ResfrPNível_1	0,001542921	0,0000106939	
MTTR_ResfrPNível_1_Nível_2	0,00019297	0,0000014545	
MTTR_ResfrRNível_1	_	0,00000006	
MTTR_ResfrRNível_1_Nível_2	_	0,000000008	
MTTF_ResfrP	0,0010834303	0,00000422933	
MTTF_ResfrR	_	0,0000024247	
Inicializar_Resfr.	_	0,00000089	
MTTR_CRACP_Det_Nível_1	0,0013550622	0,000000013	
MTTR_CRACP_Det_Nível_1_Nível_2	0,0002254075	0,000000002	
MTTF_CRACP	0,0012338244	0,000000004	
MTTR_CRACRed_Nível_1	_	0,000000001	
MTTR_CRACRed_Nível_1_Nível_2	_	0	
MTTF_CRACRed	_	0,0000000001	
MTTR_CRACP_NDet_Nível_1	0,0003384566	0,000000003	
MTTR_CRACP_NDet_Nível_1_Nível_2	0,0000563616	0	

Tabela 6.9: . Análise Sensibilidade - 90% Equipe Atuação Nível Inicial 10% Equipe Atuação Nível Inicial + Equipe com maior Especialização

Infraestrutura de Potência			
Componente	Sem Redundância	Com Redundância	
MTTR_Subestação_Nível_1	0,0000962707	0,000003198	
MTTR_Subestação_Nível_1_Nível_2	0,0007756093	0,0000001418	
MTTF_Sub	0,0004362653	0,0000082778	
MTTR_Gerador_Nível_1		0,000000077	
MTTR_Gerador_Nível_1_Nível_2		0	
MTTF_Gerador		0,00000033	
Inicializar_Gerador		0,0000065626	
MTTR_ATS_Nível_1		0,0000445712	
MTTR_ATS_Nível_1_Nível_2		0,0000149166	
MTTF_ATS		0,0000297452	
MTTR_UPSP_Nível_1	0,0002346505	0,000002134	
MTTR_UPSP_Nível_1_Nível_2	0,0001290294	0,000000813	
MTTF_UPSP	0,0001536973	0,000000784	
MTTR_UPSR_Nível_1	_	0	
$MTTR\_UPSR\_Nível\_1\_Nível\_2 - 0$			
MTTF_UPSR	_	0,000000493	
Inicializar_UPS	_	0,000000586	
MTTR_PDU1_Nível_1	0,0000870954	0,0000870983	
MTTR_PDU1_Nível_1_Nível_2	0,000023143	0,0000231432	
MTTF_PDU1	0,0000551229	0,000055125	
MTTR_PDU2_Nível_1	0,0000870954	0,0000870983	
MTTR_PDU2_Nível_1_Nível_2	0,0000231429	0,0000231432	
MTTF_PDU2	0,0000551229	0,000055125	
Infraestrutura	de Refrigeração		
Componente	Sem Redundância	Com Redundância	
MTTR_TRefrigNível_1	0,0009959903	0,0000022732	
MTTR_T.RefrigNível_1_Nível_2	0,0002799307	0,000005953	
MTTF_TRefrig.	0,0009848991	0,000002216	
MTTR_ResfrPNível_1	0,0013718559	0,0000095528	
MTTR_ResfrPNível_1_Nível_2	0,0003857018	0,0000028956	
MTTR_ResfrRNível_1	_	0,000000054	
MTTR_ResfrRNível_1_Nível_2	_	0,000000016	
MTTF_ResfrP	0,0010941051	0,0000043109	
MTTF_ResfrR	_	0,0000024743	
Inicializar_Resfr.	_	0,000000891	
MTTR_CRACP_Det_Nível_1	0,0012044624	0,000000012	
MTTR_CRACP_Det_Nível_1_Nível_2	0,0004505154	0,000000004	
MTTF_CRACP	0,0012914619	0,0000000004	
$MTTR\_CRACRed\_Nivel\_1$		0,0000000002	
MTTR_CRACRed_Nível_1_Nível_2		0,000000001	
MTTF_CRACRed		0	
$MTTR\_CRACP\_NDet\_Nivel\_1$	0,0003196769	0,000000003	
MTTR_CRACP_NDet_Nível_1_Nível_2	0,000117361	0,0000000001	

Tabela 6.10: . Análise Sensibilidade - 80% Equipe Atuação Nível Inicial 20% Equipe Atuação Nível Inicial + Equipe com maior Especialização

Infraestrutura de Potência			
Componente	Sem Redundância	Com Redundância	
MTTR_Subestação_Nível_1	0,0000842042	0,000002798	
MTTR_Subestação_Nível_1_Nível_2	0,0011624605	0,000002088	
MTTF_Sub	0,0006240562	0,0000049659	
MTTR_Gerador_Nível_1		0,000000118	
MTTR_Gerador_Nível_1_Nível_2		0	
MTTF_Gerador		0,000000494	
Inicializar_Gerador		0,0000088391	
MTTR_ATS_Nível_1		0,0000390136	
MTTR_ATS_Nível_1_Nível_2		0,0000223649	
MTTF_ATS		0,0000306904	
MTTR_UPSP_Nível_1	0,0002053868	0,000001868	
MTTR_UPSP_Nível_1_Nível_2	0,0001088711	0,0000001215	
MTTF_UPSP	0,0001572048	0,000000804	
MTTR_UPSR_Nível_1	_	0	
MTTR_UPSR_Nível_1_Nível_2 - 0		1	
MTTF_UPSR	_	0,000000516	
Inicializar_UPS	_	0,000000586	
MTTR_PDU1_Nível_1	0,0000762355	0,0000762391	
MTTR_PDU1_Nível_1_Nível_2	0,0000346982	0,0000346986	
MTTF_PDU1	0,0000554695	0,0000554725	
MTTR_PDU2_Nível_1	0,0000762355	0,0000762391	
MTTR_PDU2_Nível_1_Nível_2	0,0000346982	0,0000346986	
MTTF_PDU2	0,0000554696	0,0000554725	
Infraestrutura	de Refrigeração	1	
Componente	Sem Redundância	Com Redundância	
MTTR_TRefrigNível_1	0,0008718822	0,0000020481	
MTTR_T.RefrigNível_1_Nível_2	0,0004196339	0,00000875	
MTTF_TRefrig.	0,0009944907	0,0000022533	
MTTR_ResfrPNível_1	0,0012008999	0,0000084208	
MTTR_ResfrPNível_1_Nível_2	0,0005781956	0,0000043232	
MTTR_ResfrRNível_1	_	0,000000049	
MTTR_ResfrRNível_1_Nível_2	_	0,000000024	
MTTF_ResfrP	0,0011047631	0,0000043907	
MTTF_ResfrR	_	0,0000025239	
Inicializar_Resfr.	_	0,000000891	
MTTR_CRACP_Det_Nível_1	0,0010539975	0,000000012	
MTTR_CRACP_Det_Nível_1_Nível_2	0,0006753243	0,000000004	
MTTF_CRACP	0,0013490576	0,000000004	
MTTR_CRACRed_Nível_1	_	0,000000002	
MTTR_CRACRed_Nível_1_Nível_2	_	0,000000001	
MTTF_CRACRed	_	0	
MTTR_CRACP_NDet_Nível_1	0,0002797723	0,000000003	
MTTR_CRACP_NDet_Nível_1_Nível_2	0,0001759539	0,000000001	

Tabela 6.11: . Análise Sensibilidade - 70% Equipe Atuação Nível Inicial 30% Equipe Atuação Nível Inicial + Equipe com maior Especialização

Infraestrutura de Potência			
Componente	Sem Redundância	Com Redundância	
MTTR_Subestação_Nível_1	0,000072147	0,000002398	
MTTR_Subestação_Nível_1_Nível_2	0,0015486781	0,000002729	
MTTF_Sub	0,000811694	0,0000050152	
MTTR_Gerador_Nível_1		0,000000159	
MTTR_Gerador_Nível_1_Nível_2		0	
MTTF_Gerador		0,000000658	
Inicializar_Gerador		0,0000090526	
MTTR_ATS_Nível_1		0,0000334608	
MTTR_ATS_Nível_1_Nível_2		0,0000298062	
MTTF_ATS		0,0000316347	
MTTR_UPSP_Nível_1	0,0001761461	0,000001601	
MTTR_UPSP_Nível_1_Nível_2	0,0001450937	0,000001614	
MTTF_UPSP	0,0001607082	0,000000823	
MTTR_UPSR_Nível_1	_	0	
MTTR_UPSR_Nível_1_Nível_2 - 0			
MTTF_UPSR		0,00000054	
Inicializar_UPS	_	0,000000586	
MTTR_PDU1_Nível_1	0,000065385	0,0000653895	
MTTR_PDU1_Nível_1_Nível_2	0,0000462424	0,0000462431	
MTTF_PDU1	0,0000558158	0,0000558196	
MTTR_PDU2_Nível_1	0,000065385	0,0000653895	
MTTR_PDU2_Nível_1_Nível_2	0,0000462424	0,0000462431	
MTTF_PDU2	0,0000558157	0,0000558196	
Infraestrutura	de Refrigeração	I	
Componente	Sem Redundância	Com Redundância	
MTTR_TRefrigNível_1	0,0007478735	0,0000018318	
MTTR_T.RefrigNível_1_Nível_2	0,0005591626	0,0000011428	
MTTF_TRefrig.	0,0010040654	0,0000022886	
MTTR_ResfrPNível_1	0,0010300529	0,0000072985	
MTTR_ResfrPNível_1_Nível_2	0,0007704521	0,0000057373	
MTTR_ResfrRNível_1	_	0,000000043	
MTTR_ResfrRNível_1_Nível_2	_	0,000000024	
MTTF_ResfrP	0,0011154044	0,000004469	
MTTF_ResfrR	_	0,0000025734	
Inicializar_Resfr.	_	0,00000089	
MTTR_CRACP_Det_Nível_1	0,0009036666	0,000000011	
MTTR_CRACP_Det_Nível_1_Nível_2	0,0008998348	0,000000003	
MTTF_CRACP	0,0014066121	0,000000002	
MTTR_CRACRed_Nível_1	_	0,000000002	
MTTR_CRACRed_Nível_1_Nível_2	_	0	
MTTF_CRACRed	_	0	
MTTR_CRACP_NDet_Nível_1	0,0002398958	0,000000003	
MTTR_CRACP_NDet_Nível_1_Nível_2	0,0002344885	0,000000001	

Tabela 6.12: . Análise Sensibilidade - 60% Equipe Atuação Nível Inicial 40% Equipe Atuação Nível Inicial + Equipe com maior Especialização

### Capítulo 7

### Conclusão

Considerando a atual conjutura, relacionada à expansão de serviços baseados em Internet, entende-se que há uma tendência de crescimento em sistemas de *Data Center*, isto reforça a necessidade de discussão, estudo e entendimento da temática deste trabalho, bem como atribui ainda mais importância na aplicabilidade de políticas de manutenção nestes sistemas.

O trabalho propôs modelos *SPN* a fim de proporcionar suporte para a análise do impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade das infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de *data center*.

Tratamentos distintos foram analisados para as atividades de manutenção, considerando as diferenças operacionais e de arquiteturas destas infraestruturas a fim de proporcionar informações mais detalhadas para suporte aos principais objetivos de um sistema de *data center*: a minimização dos custos e dos tempos de parada junto à maximização da disponibilidade.

Os modelos SPN propostos utilizados para quantificar o impacto de estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade estacionária do sistema são genéricos o bastante para proporcionar análises sobre diferentes cenários de políticas de manutenção preventiva e corretiva.

Assim, uma das contribuições deste trabalho é que visa proporcionar subsídios para que uma empresa possa relacionar os custos inerentes a uma estratégia de manutenção com os custos decorrentes da parada do sistema, de modo a avaliar a viabilidade de determinadas estratégias. Além disso, este estudo também buscou direcionar quais parâmetros devem ser priorizados em uma política de manutenção para as infraestruturas de refrigeração e de potência de um *data center*.

Portanto, o estudo de caso, além de evidenciar a viabilidade, também ilustra a aplicabilidade da abordagem proposta, onde foram analisadas as disponibilidades resultantes considerando as diferentes estratégias de políticas de manutenção a partir das infraestruturas estudadas, fornecendo resultados importantes com potencial de auxiliar os projetistas de sistemas de *data center*. Através da análise realizada, surge a perspectiva de continuidade desta pesquisa em trabalhos futuros que possam abordar:

- A continuidade da análise, inserindo o contexto de uma Infraestrutura de Comunicação de um sistema de *data center*;
- A sustentabilidade, considerando a tendência de crescimento de sistemas de *data center*, já que (Veras, 2015), nos diz que a eficiência do *data center*, até bem pouco tempo, era medida unicamente em termos de indicadores vinculados à disponibilidade e ao desempenho. Com os aspectos ambientais sendo cada vez mais considerados, o aumento dos custos de energia e a limitação no seu fornecimento por parte de alguns provedores, é natural que os gerentes de infraestrutura de TI repensem as estratégias e considerem sustentabilidade nas diversas escolhas que precisam fazer.

### **Referências Bibliográficas**

ARREGOCES, M.; PORTOLANI, M. Data center fundamentals. Cisco Press, 2003.

BARABADY, J.; KUMAR, U. Availability allocation through importance measures. International journal of quality & reliability management, v.24, n.6, p.643–657, 2007.

BOLCH, G.; GREINER, S.; MEER, H.; TRIVEDI, K.S.. Queuing Networks and Markov Chains: Modelling and Performance Evaluation with Computer Science Applications. 2 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2006.

CALLOU, G.; SOUZA, E.; MACIEL, P.; TAVARES, E.; ARAÚJO, C.; SILVA, B.; ROSA, N.; MARWAH, M.; SHARMA, R.; SHAH, A.; CHRISTIAN, T.; PIRES, J.; MAGNANI, F. S.. Impact analysis of maintenance policies on data center power infrastructure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS. Anais. Lisboa, 2010.

CAMBOIM, Kádna Maria Alves. Modelagem hierárquica e heterogênea para infraestrutura de redes convergentes e política de manutenção para garantia de níveis de serviços / Kádna Maria Alves Camboim. - Recife: O Autor, 2012. xv, 78 folhas: il., fig., tab.]

CHIANG, D. T.; NIU, S.. Reliability of consecutive-k-out-of-n: F system. IEEE Transactions on Reliability, v.30, n.1, p.87-89, 1981. DOI: https://doi.org/10.1109/TR.1981.5220981.

FACCIONI, Filho, Mauro. Administração e direito administrativo de trânsito: livro didático / GConceitos e infraestrutura de datacenters: livro digital / Mauro Faccioni Filho; design instrucional Marina Melhado Gomes da Silva. – Palhoça: UnisulVirtual, 2016. 117 p. : il.

FAN, X.; WEBER, W, D.; BARROSO, L.A. Power provisioning for a warehouse-sized computer. In Proceedings of the ACM International Symposium on Computer Architecture, San Diego, CA, 2007.

FAZION, Mauro. Conceitos e infraestruturas de datacenters. 1. ed. Palhoça: UnisulVirtual, 2016.

FIGUEIRÊDO, José Jair Cavalcante de; MACIEL, Paulo Romero Martins. Análise de dependabilidade de sistemas data center baseada em índices de importância. 2011. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

GERMAN, Reinhard; KELLING, Christian; ZIMMERMANN, Armin, HOMMEL, Günter. Timenet: a toolkit for evaluating non-markovian stochastic petri nets. Performance Evaluation, 24:69 – 87, 1995.

GITOMER, J.; Utilizing Capacity Planning and Performance Management, Faulkner Information Services, 1999.

GOVINDAN, S; WANG, D.; CHEN, L.; SIVASUBRAMANIAM, A.; URGAONKAT, B. Modeling and Analysis of Availability of Data Center Power Infrastructure. Technical Report. CSE 10-006. 2010.

GUIMARÃES, A. P.; MACIEL, P.; MATIAS, R.. An analytical modeling framework to evaluate converged networks through business-oriented metrics. Reliability Engineering and System Safety (RESS), v.118, p.81-92, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.04.008.

GUIMARÃES, A. P.; SILVA, A. P.. Análise de Aspectos de Dependabilidade em Infraestruturas de Data Centers Considerando Variação de Temperatura e Diferentes Mecanismos de Redundância. Revista Brasileira de Administração Científica, v.11, n.3, 2020. Pages: 228-241. DOI: 10.6008/CBPC 2179-684X.2020.003.0016.

GUIMARÃES, A.P.; COSTA, L. Ana do Impacto de Dif Estrat de Políticas de Manut sobre a Disponibilidade das Infr de Refrigeração e Potência de um Sist de Data Center utilizando Modelos Estocásticos. Revista Brasileira de Administração Científica, 2022.

HOFFMAN, F.; GARDNER, R. Evaluation of Uncertainties in Environmental Radiological Assessment Models. In: TILL, J.; MEYER, H. (Ed.). Radiological Assessments: a textbook on environmental dose assessment. Washington, DC: U.S. 1983.

HPE Power Advisor, 2021. Disponível em: https://poweradvisorext.it.hpe.com/?Page=Index.

KUO, W.; ZUO, M. J.. Optimal reliability modeling:Principles and applications. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2003.

MACHADO, Pedro Henrique Ferreira. Metodologia de Modelagem CPN Aplicada a Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação baseados na Norma IEC 61850. 2015. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

MACIEL, P. R. M.; Lins, R. D. & Cunha, P. R. F. (1996). Introdução às redes de Petri e aplicações. X Escola de Computação - UNICAMP-SP.

MACIEL, Paulo R. M; TRIVEDI, Kishor S.; MATIAS, Rivalino Jr. KIM, Dong Seong; Dependability Modeling, book chapter in Performance and Dependability in Service Computing: Concepts, Techniques and Research Directions, Eds. Valeria Cardellini, Emiliano Casalicchio, Kalinka Regina Lucas, Jaquie Castelo Branco, Julio Cezar Estrella and Francisco Jose Monaco, IGI Global, 2011.

MARSAN, M. A.; BALBO G.; CONTE, G.;, A Class of Generalized St ochastic Petri Nets for the Performance Analysis of Multiprocessor Systems. ACM Transactions on Computer Systems, 2(2)93-122, maio de 1984.

MARIN, Paulo S. Data Centers: Desvendando cada passo: conceitos, projeto, infraestrutura física e ficiência energética. 1. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2011.

MELO, F. F., Junior, J. S. and de Almeida Callou, G. (2020). Evaluating the impact of maintenance policies associ-ated to sla contracts on the dependability of data cen-ters electrical infrastructures, RevistadeInformáticaTeó-rica e Aplicada 27(1): 13–25. https://doi.org/10.22456/2175-2745.88822.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. Introdução à gestão da manutenção. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.

MURATA, T. (1989). Petri nets: properties, analysis and applications. Proceedings of the IEEE, 77(4):541580.

NORRIS, J. R. "Markov Chains", Cambridge University Press. 1998.

OGGERINO, C.. High availability network fundamentals. Cisco Press, 2001.

PATTERSON, D. A.. A simple way to estimate the cost of downtime. 2002.

PONEMOM Institute LLC. Cost of data center outages: data center performance benchmark series. Technical report, 2016.

RAKKAY, H.; BOUCHENEB, H. Security analysis of role based acess control models using colored petri nets cpntools. In: GAVRILONA, M.; TAN, C.; MORENO, E. (Ed.). Transactions on Computational Science IV. [S.I.]: Springer Berlin / Heidelberg, 2009, (Lecture Notes in Computer Science, v. 5430). p. 149-176.

SANTOS, Mário José Marques Ferreira dos. Gestão de manutenção do equipamento. Orientador: António Aguiar Vieira; Fernando Ferraz. 2009. 69 f. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Curso de Engenharia Mecânica, Portugal, 2009.

SILVA, B. et al. Mercury: An integrated environment for performance and dependability evaluation of general system. 45th Dependable Systems and Networks Conference, 2015.

SOUZA, Hallyson Gustavo Tavares de. Análise de disponibilidade de sistemas de mHealth fundamentados na internet das coisas. 2017. 100 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

TALLON, P. P. Corporate Governance of Big Data: Perspectives on Value, Risk, and Cost. IEEE Computer, v. 46, n. 6, p. 32–38, 2013.

TRIVEDI, K. S.. Probability and statistics with reliability: queuing, and computer science. New York: John Wiley and Sons, 2001.

VERAS, M. Computação em Nuvem: nova arquitetura de TI. 2015. v. 1 a Edição. ISBN 978-85-7452-747-5.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. PCM: planejamento e controle da manutenção. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2002. 167 p.

XENOS, H. G. Gerenciando a Manutenção Produtiva. 1. ed. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.

XIE Min, Kim-Leng Poh, and Yuan-Shun Dai. Computing System Reliability: Models and Analysis. Springer, 2004.

ZIMMERMANN, A.; Freiheit, J.; German, R.; Hommel, G. Petri net modelling and performability evaluation with time net 3.0. Pages 188-202. DOI: 10.1007/3-540-46429-8, 2000.

ZUFFO, M. K.; KOFUJI, S. T.; LOPES, R. D.; HIRA, Adilson. A computação em nuvem na Universidade de São Paulo. Revista USP, n. 97. p. 9-18, 2013.

WEBER, T. S.. Um roteiro para exploração dos conceitos básicos de tolerância a falhas. Disponível: http://www.inf.ufrgs.br/~taisy/disciplinas/textos/Dependabilidade.pdf . Acesso: 2023.