

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 utilizando modelos estocásticos

Data centers estão em constante crescimento impulsionando demandas de novas tecnologias tais como computação em nuvem, comércio eletrônico, o que forçou a disponibilização destes sistemas 24 horas por dia, 7 dias por semana sob pena de grandes prejuízos. Nosso estudo tem como objetivo proporcionar suporte para a análise do impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção, tanto preventiva quanto corretiva, considerando os parâmetros adotados em acordos de níveis de serviços sobre a disponibilidade estacionária de infraestruturas de um sistema de data center utilizando os mecanismos de modelagem RBD e SPN. Foram analisadas as infraestruturas de refrigeração e de potência, considerando uma infraestrutura de comunicação proposta, em arquiteturas com níveis crescentes de redundância. Estas arquiteturas foram propostas baseadas na alocação de adaptações de mecanismos de redundância, que são largamente utilizados em projetos de sistemas, aos componentes das referidas infraestruturas com os maiores índices de importância para disponibilidade. Além disso, 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: Dependabilidade; Data center; Importância para disponibilidade; Mecanismo de redundância; Acordo de nível de serviço.

Analysis of the impact of different strategies of maintenance policies on the availability cooling and power infrastructures of a data center system using stochastic models

Data centers are constantly growing, driving demands of new technologies such as cloud computing, e-commerce, which forced the availability of these systems 24 hours a day, 7 days a week under penalty of great losses. Our study aims to provide support for the analysis of the impact of different strategies of maintenance policies, both preventive and corrective, considering the parameters adopted in service level agreements on the stationary availability of infrastructures of a data center system using the mechanisms of RBD and SPN modeling. The cooling and power infrastructures were analyzed, considering a proposed communication infrastructure, in architectures with increasing levels of redundancy. These architectures were proposed based on the allocation of adaptations of redundancy mechanisms, which are widely used in systems projects, to the components of the referred infrastructures with the highest levels of importance for availability. In addition, a case study was developed to analyze the stationary availability resulting from different scenarios that consider different maintenance strategies from the infrastructures/architectures studied through the application of the proposed models.


Keywords: Dependability; Data center; Availability importance; Redundancy mechanism; Service level agreement.


Topic: **Sistemas de Computação**

Received: **01/02/2022**

Approved: **20/03/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Almir Pereira Guimarães 
Universidade Federal de Alagoas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3181745681718312>
<https://orcid.org/0000-0002-9242-3355>
almir@ic.ufal.br

Leonardo Silva Costa 
Universidade Federal de Alagoas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0051867964049155>
<https://orcid.org/0000-0002-7659-6176>
lsc2@ic.ufal.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-684X.2022.001.0025

Referencing this:

GUIMARÃES, A. P.; COSTA, L. S.. 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 utilizando modelos estocásticos. **Revista Brasileira de Administração Científica**, v.13, n.1, p.347-367, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-684X.2022.001.0025>

INTRODUÇÃO

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). Este sistema é constituído essencialmente dos seguintes subsistemas: (i) infraestrutura de comunicação; (ii) infraestrutura de potência; e (iii) infraestrutura de refrigeração.

Durante os últimos anos, têm-se notado um crescimento elevado em número, tamanho, complexidade e utilização de sistemas de *data center* (GUIMARÃES et al., 2015). Isto ocasionou o surgimento de novos paradigmas como computação em nuvem¹ e uma grande quantidade de serviços baseados na Internet, redes sociais e aplicações multimídia (MARWAH et al., 2010), o que forçou a disponibilização destes sistemas 24 horas por dia, 7 dias por semana sob pena de grandes prejuízos financeiros. De acordo com os resultados de um estudo realizado pela *Ponemon Institute*², calculados a partir de 63 *data centers* de diversos setores da indústria nos Estados Unidos, o custo do *downtime*¹ no ano de 2016 quantificava o valor médio de US \$ 8.851 por minuto. Desta forma, para um funcionamento correto e contínuo destes sistemas, além de técnicas de redundância estática ou dinâmica aplicadas a seus componentes, 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.

Por sua vez, uma política de manutenção compreende todas as ações que alteram o estado de um sistema a fim de mantê-lo em modo operacional ou devolvê-lo a uma condição operacional em caso de falha neste sistema (BLISCHKE et al., 2003). Duas abordagens de manutenção distintas são consideradas neste trabalho. Manutenção corretiva, que é realizada quando ocorrem falhas no sistema como um todo ou em partes do mesmo. A segunda abordagem, manutenção preventiva, visa evitar que um determinado sistema ou parte dele venha a falhar através de manutenções periódicas que seguem critérios predeterminados.

Além disso, contratos de acordos de níveis de serviços (*SLA* – sigla proveniente do inglês *Service Level Agreement*) (BUCO et al., 2004), que resulta em um documento que define um conjunto de compromissos entre uma empresa prestadora de serviços e uma empresa cliente, podem ser firmados para definir estratégias para políticas de manutenção. Cada estratégia compreende compromissos que são baseados em parâmetros tais como a periodicidade das manutenções preventivas, tempo de deslocamento, tempo administrativo e tempo médio de reparo relacionados às manutenções corretivas.

Neste trabalho serão realizadas avaliações dos diferentes impactos das estratégias propostas para políticas de manutenção, tanto preventiva quanto corretiva, considerando os parâmetros adotados por distintos *SLAs* sobre a disponibilidade estacionária de diversas arquiteturas das infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de data center. Estas arquiteturas consideram combinações de diferentes mecanismos de redundância adotados pelos principais componentes de suas infraestruturas. Devido à inexistência do sistema e aos custos de configuração, modelagem analítica é adotada como

¹ <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-28.pdf>

² https://planetaklimata.com.ua/instr/Liebert_Hiross/Cost_of_Data_Center_Outages_2016_Eng.pdf

estratégia para uma análise quantitativa. Foram utilizados os mecanismos de modelagem *RBD* (sigla proveniente do inglês *Reliability Block Diagram*) (SAHNER et al., 2012; KUO et al., 2003) e *SPN* (sigla proveniente do inglês *Stochastic Petri Net*) [German, 2000]. Para a construção dos modelos, foi utilizada a ferramenta *Mercury* (SILVA et al., 2015). O índice de *importância para disponibilidade* (BARABADY et al., 2007) será utilizado para direcionar a alocação de redundância aos componentes de cada infraestrutura. Para o cálculo deste índice foi utilizada a ferramenta *Mercury* e implementado, para cada uma das infraestruturas, um modelo *RBD* em série constituído por seus principais componentes sem redundância. Por sua vez, o mecanismo de modelagem *SPN* foi utilizado para a representação das políticas de manutenção considerando suas diversas estratégias baseadas nos níveis de *SLA* especificados. Com relação aos modelos *SPN*, foi feita a suposição de que as distribuições de tempo associadas aos eventos são exponenciais.

Nos últimos anos, diferentes trabalhos buscam tratar com questões relacionadas à avaliação quantitativa de dependabilidade (AVIZIENIS et al., 2004) em sistemas de data center (CAMBOIM et al., 2020; MELO et al., 2021; BIESER et al., 2018; CALLOU et al., 2010; GUIMARÃES et al., 2020a, 2020b). Inicialmente, o trabalho descrito em (CAMBOIM et al., 2020) avalia a disponibilidade da infraestrutura de comunicação de um sistema de *data center* de *nível 1* considerando o uso de servidores tipo *blade*. São utilizados os mecanismos de modelagem *SPN* e *RBD* para simular políticas de manutenção englobadas em diferentes níveis de serviço (*SLA*). O trabalho mostrado em (MELO et al., 2021) propõe uma abordagem para otimização de infraestruturas de potência em sistemas de *data center*, considerando questões relacionadas a políticas de manutenção, contratos de *SLA* e custos associados, utilizando o mecanismo *DoE* (sigla proveniente do inglês *Design of Experiment*) (JAIN, 1991). Uma estratégia de modelagem híbrida utilizando os mecanismos *SPN* e *RBD* também é utilizada. Por sua vez, o trabalho mostrado em (BIESER et al., 2018) demonstra o papel crucial de manutenção em sistemas de *data center* sob as perspectivas operacionais e econômicas. Além disso, é apresentado uma abordagem para o gerenciamento da manutenção destes sistemas. O trabalho mostrado em (CALLOU et al., 2010) avalia diversas estratégias de *SLA* para políticas de manutenção aplicadas à infraestrutura de potência de um sistema de data center considerando aspectos de dependabilidade e de custos. Para o cálculo destas métricas, são utilizados modelos analíticos que adotam uma abordagem híbrida, que considera as vantagens de *SPN* e *RBD*. O trabalho mostrado em (GUIMARÃES et al., 2020a) busca analisar o impacto da variação de temperatura considerando diferentes mecanismos de redundância sobre a dependabilidade de sistemas de *data center*. Por fim, o trabalho mostrado em (GUIMARÃES et al., 2020b) busca analisar a dependabilidade de sistemas de *data center* integrando as infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração, considerando diferentes arquiteturas. Modelos de dependabilidade foram criados utilizando os mecanismos de modelagem *RBD* e *SPN* baseados em uma abordagem hierárquica.

O resto deste artigo é organizado como segue. Seção 2 descreve a metodologia utilizada neste trabalho. Seção 3 detalha modelos baseados nos mecanismos de modelagem *RBD* e *SPN* representando as estruturas básicas que serão utilizadas na construção de modelos que proporcionam suporte a uma ampla análise em relação ao impacto de diversas estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade

estacionária de diferentes arquiteturas das infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de *data center* que serão detalhados na Seção 4. Finalmente, Seção 5 conclui o artigo e introduz ideias para trabalhos futuros.

REVISÃO TEÓRICA

Modelos RBD

As estruturas mais comumente utilizadas em infraestruturas de sistemas computacionais são série, paralelo e série-paralelo (OGGERINO, 2001). Figura 2 descreve três exemplos, aonde os blocos (C_1 , C_2 e C_3) são estruturados em série (ver Figura 2(a)), em paralelo (ver Figura 2(b)) e em série-paralelo (ver Figura 2(c)).

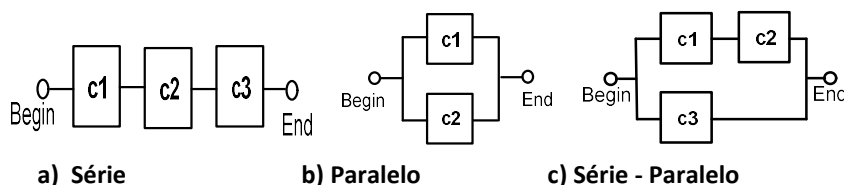


Figura 2: Estruturas Básicas.

Na estrutura em série, se um componente falhar, o sistema inteiro não estará mais operacional. Assumindo uma estrutura com n componentes em série, a confiabilidade (disponibilidade) (KUO et al., 2003) é obtida por:

$$P_{(s)}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (3)$$

Onde $P_i(t)$ é a confiabilidade ou a disponibilidade do bloco i . Levando-se em consideração n componentes em uma estrutura em paralelo, a confiabilidade (disponibilidade) do sistema é:

$$P_{(p)}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) \quad (2)$$

Onde $P_i(t)$ é a confiabilidade ou a disponibilidade do bloco i . Com o objetivo de 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 deve consultar (KUO et al., 2003).

Modelos SPN

Esta seção apresenta modelos de dependabilidade utilizando o mecanismo de modelagem *SPN* tanto para quantificar o impacto de diversas estratégias de manutenção considerando um sistema composto de um único componente genérico quanto para representar adaptações de mecanismos de redundância largamente utilizados em projetos de sistemas.

Modelo Base Política de Manutenção (BPM), a Figura 3 mostra o modelo para quantificar o impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção sobre a disponibilidade de um sistema composto de um único componente genérico. Lugar *Nível 1* representa a disponibilidade de uma equipe de manutenção de nível inicial de atuação. Por sua vez, lugar *Nível 2* representa a disponibilidade de uma equipe de manutenção com maior nível de especialização. Lugar X_{on} (em nosso estudo, o rótulo X deve ser substituído

de acordo com o nome do componente) representa o componente em estado ativo e operacional.

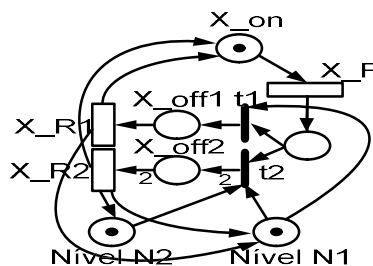


Figura 3: Modelo Base Política de Manutenção – BPM.

O parâmetro *MTTF* do componente genérico representa o atraso associado à transição X_F . Por sua vez, com relação ao parâmetro *MTTR* (sigla proveniente do inglês *Mean Time To Repair*), que se refere ao tempo administrativo, tempo de deslocamento e tempo médio de reparo de manutenções corretivas, deste componente genérico são consideradas duas possibilidades. 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} . O caso em que 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. Tabela 1 mostra os parâmetros associados às transições imediatas deste modelo.

Tabela 1: Parâmetros Transições Imediatas – BPM.

Transição	Peso	Prioridade	Função de Guarda
$t1$	1	0,9	--
$t2$	1	0,1	--

Espera a Frio (EF), Figura 4 (GUIMARÃES et al., 2013) mostra o modelo *SPN* de dependabilidade que representa o mecanismo de redundância espera a frio (KUO et al., 2003). 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.

Caso ocorra uma falha do componente principal, transição X_{ACTSp} é habilitada. Seu atraso (*delay*) representa o tempo de detecção da falha e de ativação do componente em espera. Transição imediata X_{DCTSp} representa o retorno ao estado normal de operação após o reparo do componente principal.

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: $P(\#X_{on} = 1) \text{ OR } (\#X_{Sp_{on}} = 1)$.

Modular com Reparo e Política de Reposição (MRPR), Figura 5 (GUIMARÃES et al., 2020a) mostra o modelo *SPN* de dependabilidade que 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).

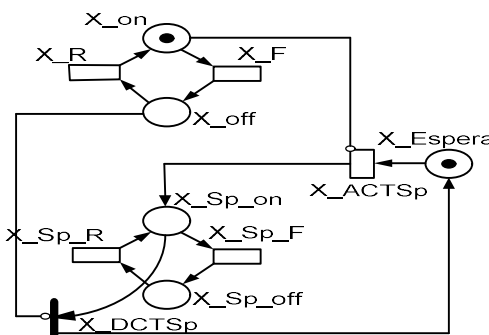


Figura 4: Modelo Espera a Frio – EF.

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% das ocorrências.

Tabela 2: Parâmetros Transições Imediatas – MRPR.

Transição	Peso	Prioridade	Função de Guarda
<i>t0</i>	1	2	$((\#S_{on} < R) \text{ AND } (\#M_{ON} = N))$
<i>t1</i>	1	2	$\#M_{on} < N$
<i>t2</i>	0,2	3	--
<i>t3</i>	0,8	3	--
<i>t4</i>	1	7	$((M_{on} < N) \text{ AND } (\#Falha == 0))$
<i>t5</i>	1	2	$\#M_{on} < N$
<i>t6</i>	1	2	$((\#S_{on} < R) \text{ AND } (\#M_{on} = N))$
<i>t7</i>	1	5	$((\#MD_{off} == 0) \text{ AND } (\#MND_{off} == 0))$
<i>t8</i>	1	7	$((M_{on} < N) \text{ AND } (\#Falha == 0))$

Lugares *MD_off* e *MND_off* representam os componentes em estado de reparo para o caso de falhas detectadas ou não detectadas inicialmente. Transição *MD_R* representa o tempo de reparo para componentes no lugar *MD_off* e transição *MND_R* representa o tempo de reparo, aonde está incluso o tempo para reconhecimento de falhas, para componentes no lugar *MND_off*. As transições imediatas *t0* e *t6* são ativadas quando $(\#S_{on} < R \text{ AND } \#M_{on} = N)$ e as transições *t1* e *t5* são ativadas quando $(\#M_{on} < N)$. 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 $t7$. Tabela 2 contém os parâmetros das transições imediatas deste modelo.

A disponibilidade é calculada pela expressão $P\{\#M_on = N\}$, aonde N é o número de componentes ativos. As transições temporizadas deste modelo possuem distribuições exponenciais (*exp*) e semântica de disparo do tipo *single server* (*ss*).

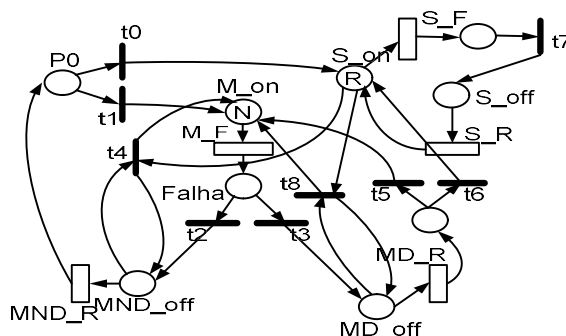


Figura 5: Modelo de Dependabilidade - Modular com Reparo.

METODOLOGIA

Esta seção detalhada a metodologia concebida para a análise do impacto de estratégias de políticas de manutenção, considerando diversos níveis de *SLA*, sobre a disponibilidade estacionária de sistemas de *data centers* admitindo diferentes arquiteturas em suas infraestruturas utilizando os mecanismos de modelagem *SPN* e *RBD*. Nossa abordagem consiste de oito atividades (ver Figura 1) que são: entendimento do problema; definição de parâmetros; cálculo do índice de importância para disponibilidade; definição de arquiteturas; criação de modelos e mapeamento de métricas; validação de modelos; análise de estratégias de políticas de manutenção; análise dos resultados.

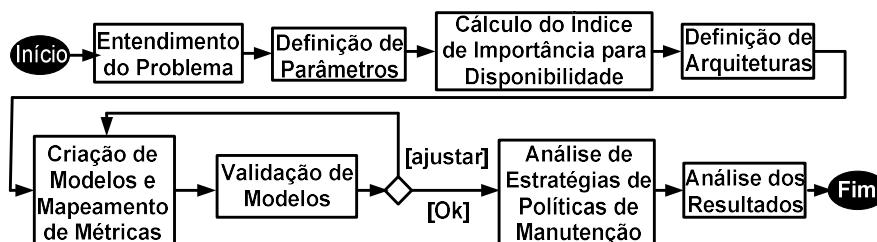


Figura 1: Metodologia Proposta.

A primeira atividade consiste no entendimento do problema, assim como na definição dos componentes. Para executar esta atividade, um conjunto de ações devem ser executadas. Dentre as ações podemos destacar: especificação da estrutura inicial do sistema (componentes e interfaces); definição do ambiente (condições de contorno); definição do conjunto de métricas utilizadas para a análise do sistema.

Na segunda atividade serão definidos os parâmetros de interesse relacionados tanto aos próprios componentes do sistema quanto às manutenções preventivas e/ou corretivas adotadas pelo sistema. Com relação aos componentes do sistema, as informações relacionadas ao *MTTF* (sigla proveniente do inglês *Mean Time To Failure*) de cada componente serão obtidas tanto a partir de seus respectivos fabricantes

quanto a partir de estudos científicos relacionados. Com relação às manutenções preventivas e/ou corretivas, seus parâmetros são relacionados aos níveis de *SLA* acordados. Cada nível define informações tais como a periodicidade 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.

A terceira atividade é referente ao 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*. Equação 1 abaixo define o índice de importância para disponibilidade (BARABADY et al., 2007):

$$A_s = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \quad (1)$$

Onde, A_s é a disponibilidade estacionária do sistema, e A_i é a disponibilidade estacionária de um componente i . Importância para disponibilidade é um valor que varia de 0 a 1, sendo que quanto maior o valor, maior é o impacto do componente sobre a disponibilidade estacionária do sistema. Para um sistema em série, o valor de A_s é obtido através da Equação 3. Por sua vez, para um sistema em paralelo, o valor de A_s é obtido através da Equação 4. Por fim, a disponibilidade do componente i com dois estados é obtida através da Equação 2:

$$A_i = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i} \quad (2)$$

A quarta atividade corresponde à definição de arquiteturas redundantes associadas às infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de *data center*. Arquiteturas distintas serão caracterizadas por diferentes adaptações de técnicas de redundância largamente utilizadas em projetos destes sistemas. Desta forma, serão 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.

A quinta atividade refere-se à criação de 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 irão determinar se iremos utilizar *SPN* ou *RBD*. Esta atividade de criação de modelos é 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). Para a construção dos modelos serão utilizadas a ferramenta *Mercury*.

A atividade Validação de Modelos analisa e efetua ajustes quando necessário. Para esta atividade, a ferramenta *token game* (SILVA et al., 2015) é utilizada. O fim desta fase é alcançado quando cada modelo proporciona resultados com exatidão apropriada.

Então, uma análise de estratégias de políticas de manutenção considerando diversos cenários/arquiteturas será executada utilizando os modelos criados. Esta atividade busca obter informações importantes para o estabelecimento de estratégias adequadas. Finalmente, os resultados obtidos irão ser interpretados e explicados através da adoção de um vocabulário apropriado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nosso estudo 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., 2020a).

Inicialmente, Figura 6(a) detalha os principais componentes da infraestrutura de refrigeração que é composta basicamente por *CRACs* (sigla proveniente do inglês *Computer Room Air Conditioning*), *resfriador* e *torre de refrigeração*. Normalmente, as várias unidades de *CRACs* transferem o calor dissipado por dispositivos da infraestrutura de comunicação para um sistema de distribuição de água refrigerada. Os *resfriadores*, tipos especiais de compressores, extraem o calor do sistema de água refrigerada e o transfere para o ambiente através de *torres de refrigeração*. Foi utilizada a ferramenta Power Advisor³ 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, Figura 6(b) detalha os principais componentes da infraestrutura de potência proposta em Govidan⁴. 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 *ATS* (sigla proveniente do inglês *Automatic Transfer Switch*) é empregado para selecionar automaticamente entre essas duas fontes, levando cerca de 10-20 segundos para o gerador ser ativado. Por fim, o componente *UPS* (sigla proveniente do inglês *Uninterruptible Power Supply*)

³ <https://paonline56.itcs.hpe.com>.

⁴ <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.2714&rep=rep1&type=pdf>

é normalmente empregado 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 sistema de *datacenter*. O *UPS* alimenta diversos *PDU*s (sigla proveniente do inglês *Power Distribution Unit*) cujos tamanhos são normalmente entre 100-200 KW. Os *PDU*s possuem transformadores que reduzem a tensão e direcionam a energia para vários *racks*, cada um dos quais abriga equipamentos da infraestrutura de comunicação.

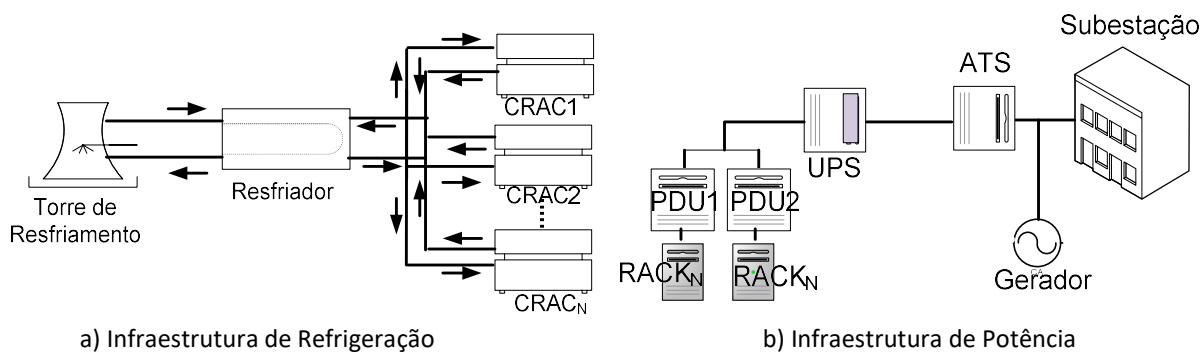


Figura 6: Infraestruturas de Potência e de Refrigeração.

Tabela 3: Métricas de Dependabilidade.

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

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 3. Tabela 4 detalha 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 se refere ao 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 *MTTR* quando 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*.

Tabela 4: Definição Tempo Reposição diferentes Cenários

Infraestrutura de Potência				Infraestrutura de Refrigeração			
	Cenário	Cenário	Cenário		Cenário	Cenário	Cenário
<i>MTTR_Subestação_Nível_1</i>	0,032 h	0,049 h	0,066 h	<i>MTTR_T.Refrig._Nível_1</i>	40 h	48 h	56 h
<i>MTTR_Subestação_Nível_1_Nível_2</i>	1,032 h	1,049 h	1,066 h	<i>MTTR_T.Refrig._Nível_1_Nível_2</i>	44 h	52 h	60 h
<i>MTTR_Gerador_Nível_1</i>	4 h	8 h	12 h	<i>MTTR_Resfr._Nível_1</i>	40 h	48 h	56 h
<i>MTTR_Gerador_Nível_1_Nível_2</i>	6 h	10 h	14 h	<i>MTTR_Resfr._Nível_1_Nível_2</i>	44 h	52 h	60 h
<i>MTTR_ATS_Nível_1</i>	5,88 h	9,88 h	13,88 h	<i>MTTR_CRAC_Nível_1</i>	4 h	8 h	12 h
<i>MTTR_ATS_Nível_1_Nível_2</i>	7,88 h	11,88 h	15,88 h	<i>MTTR_CRAC_Nível_1_Nível_2</i>	6 h	10 h	14 h
<i>MTTR_UPS_Nível_1</i>	8,33 h	12,33 h	16,33 h	--	--	--	--
<i>MTTR_UPS_Nível_1_Nível_2</i>	10,33 h	14,33 h	18,33 h	--	--	--	--
<i>MTTR_PDU_Nível_1</i>	62,5 h	70,5 h	78,5 h	--	--	--	--
<i>MTTR_PDU_Nível_1_Nível_2</i>	66,5 h	74,5 h	82,5 h	--	--	--	--

Seguindo os passos da metodologia proposta, Tabela 5 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 adotada a ferramenta *Mercury* 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. 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 *subestação* e *UPS*.

Tabela 5: Valores Importância para Disponibilidade.

Componente	Impot. para Disponib.	Componente	Import. para Disponib.
<i>Resfriador</i>	1,00	<i>Torre de Refrigeração</i>	0,999269
<i>CRAC</i>	0,997555	<i>Subestação</i>	0,9998244
<i>UPS</i>	1,00	<i>PDU</i>	0,9998093

Figura 7 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. Lugar *Sem_Manut* representa a infraestrutura de refrigeração entre manutenções preventivas. A transição *Inic._Manut* 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. Lugar *Nível 1* representa a disponibilidade de equipes de manutenção de nível inicial de atuação. Por sua vez, 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.

Lugares *X_on* representam os componentes da infraestrutura de refrigeração no estado operacional e ativo. 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 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*. 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*.

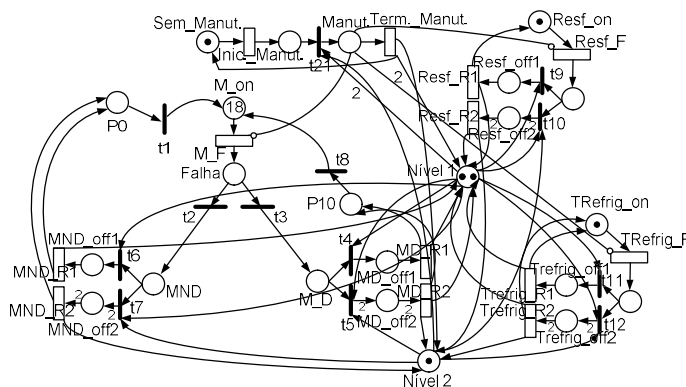


Figura 7: Modelo SPN Política de Manutenção – Infraestrutura de Refrigeração sem Redundância.

Tabela 6: Parâmetros Transições Imediatas – Infraestrutura de Refrigeração sem Redundância

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	--

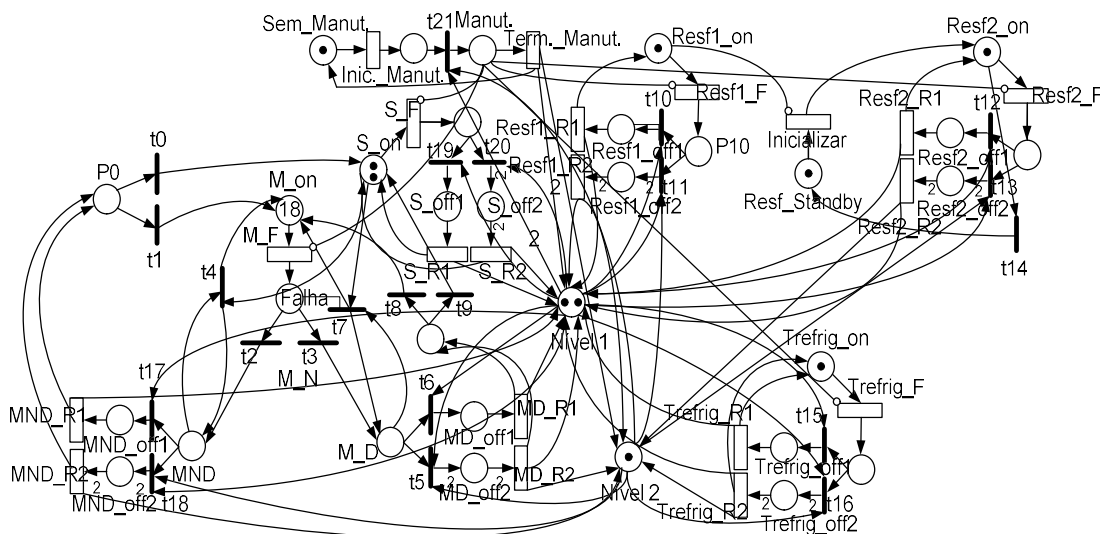


Figura 8: Modelo SPN Política de Manutenção, Infraestrutura de Refrigeração com Redundância.

Transições *t1* e *t8* apenas serão ativadas quando o número de marcações no lugar *M_on* for menor que 18 ($\#M_{on} < 18$). 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. Transição imediata *t4* 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 *t5* 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. 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, que também mostra os todos parâmetros associados às transições imediatas do modelo da Figura 7.

Tabela 7: Parâmetros Transições Imediatas, Infraestrutura de Refrigeração com Redundância.

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	$\#Resf1_Off1=0 \text{ AND } \#Resf1_Off2=0 \text{ AND } \#P10=0$
$t13$	0,1	2	$\#Resf1_Off1=0 \text{ AND } \#Resf1_Off2=0 \text{ AND } \#P10=0$
$t14$	1	7	$\#Resf1_Off1=0 \text{ AND } \#Resf1_Off2=0 \text{ AND } \#P10=0$
$t19$	0,9	2	$((\#MND_off1=0) \text{ AND } (\#MND_Off2=0) \text{ AND } (\#MD_Off1=0) \text{ AND } (\#MD_Off2=0))$
$t20$	0,1	2	$((\#MND_off1=0) \text{ AND } (\#MND_Off2=0) \text{ AND } (\#MD_Off1=0) \text{ AND } (\#MD_Off2=0))$
$tx1$	0,1	2	--
$tx2$	0,9	2	--

Figura 8 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. 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 7. Lugares X_on representam os componentes principais e redundantes desta infraestrutura (*CRAC*, *Resfriador*, *Torre de Refrigeração*) em estado ativo e operacional. Lugares X_off1 representam os estados em que o reparo é efetuado apenas pela equipe de nível inicial de atuação. 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. 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 (ver Seção 3.2) [Guimarães et al., 2020a]. 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).

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, 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 .

Transições imediatas $t1$ e $t8$ representam o retorno do componente *CRAC*, que foi reparado, para o

estado ativo e operacional (lugar M_{on}). Transições $t0$ e $t9$ representam o retorno do componente $CRAC$ reparado para o estado ativo e não operacional (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% 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, transições $t4$ e $t7$ irão disparar devolvendo assim a marcação para o lugar M_{on} . 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_{off2} , 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 7, que também mostra os parâmetros associados às transições imediatas do modelo da Figura 8.

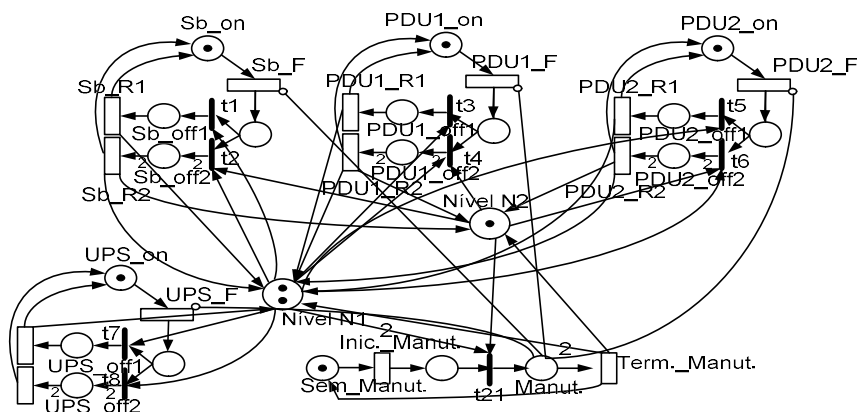


Figura 9: Modelo SPN Política de Manutenção, Infraestrutura de Potência sem Redundância.

Tabela 8: Parâmetros Transições Imediatas, Infraestrutura de Potência sem Redundância.

Nome	Peso	Prioridade	Função_Guarda
$tx1$	0,9	2	--
$tx2$	0,1	2	--

Além disso, o modelo mostrado na Figura 8 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 $t20$).

Figura 9 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. 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 7. Lugares X_{on} representam os componentes da infraestrutura de potência em estado operacional e

ativo. Lugares X_{off1} representam os estados em que o reparo é efetuado apenas pela equipe de inicial de atuação. 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.

O parâmetro $MTTF$ de cada um dos componentes da infraestrutura de potência representa o atraso associado às transições X_F . 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} .

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. Transições $t3$ e $t4$, $t5$ e $t6$, $t7$ e $t8$ representam estes mesmos parâmetros e são representadas na Tabela 8 como $tx1$ e $tx2$.

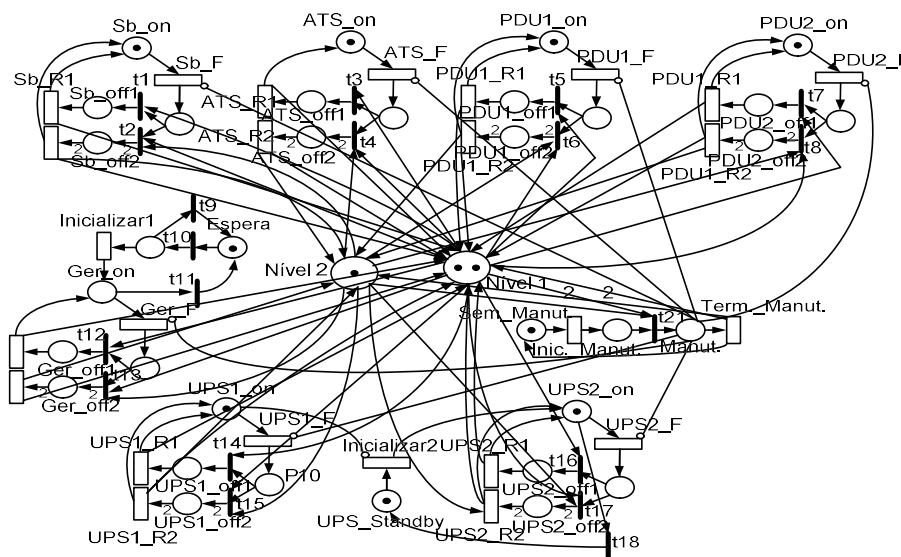


Figura 10: Modelo SPN Política de Manutenção, Infraestrutura de Potência com Redundância.

Tabela 9: Parâmetros Transições Imediatas, Infraestrutura de Potência com Redundância.

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	--

Figura 10 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. 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 7. 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). Lugares X_{on} representam os componentes principais e os redundantes em estado operacional e ativo. Lugares X_{off1} representam os estados em que o reparo é efetuado apenas pela equipe de nível de inicial de atuação. 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} .

Para representar a completa ativação do componente *gerador* em caso de falha do componente *subestação*, a marcação será conduzida do lugar *Espera_Ger*, através do disparo das transições t_{10} e *Inicializar1*, para o lugar *Ger_on*. Por sua vez, as transições t_9 e t_{11} representam o retorno do componente *gerador* para seu estado inicial de espera. De maneira semelhante, o disparo da transição t_{18} representa o retorno à condição inicial após a restauração do componente *UPS1*.

Transição imediata t_1 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 t_2 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. Transições t_3 e t_4 , t_5 e t_6 , t_7 e t_8 , t_{12} e t_{13} , t_{14} e t_{15} , t_{16} e t_{17} representam estes mesmos parâmetros e são representadas como tx_1 e tx_2 na Tabela 9, que também mostra os parâmetros associados às transições imediatas do modelo da Figura 10.

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 na Tabela 3. 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 *SLA* níveis IV, V e V respectivamente. Um intervalo de manutenção preventiva de 4320 h junto aos parâmetros dos cenários 1, 2 e 3 corresponde aos contratos de *SLA* 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 *SLA* níveis X, XI e XII respectivamente.

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. Figura 11 detalha os dados obtidos a partir de uma arquitetura sem redundância, ao passo que Figura 12 detalha os dados obtidos a partir de uma arquitetura com redundância.

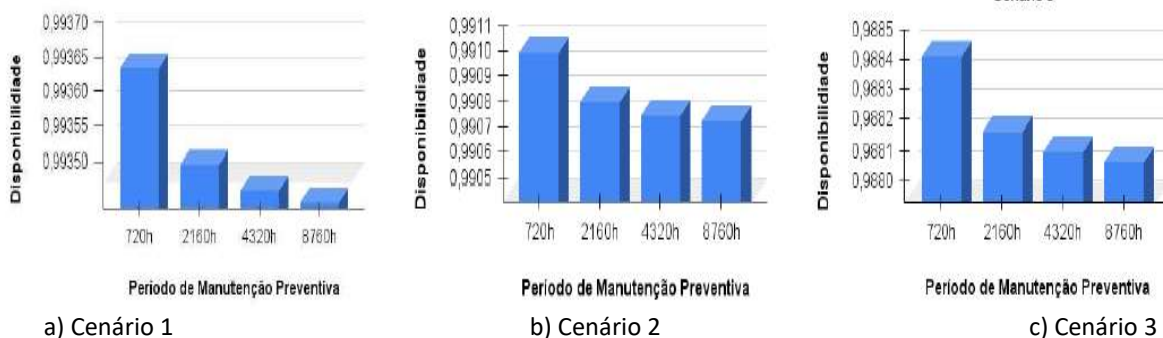


Figura 11: Disponibilidade Infraestruturas de Refrigeração, Arquitetura sem Redundância.

Figuras 11(a) e 12(a) mostram a disponibilidade estacionária relacionada aos SLAs I, IV, VII e X. Figuras 11(b) e 12(b) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs II, V, VIII e XI. Por fim, Figuras 11(c) e 12(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.

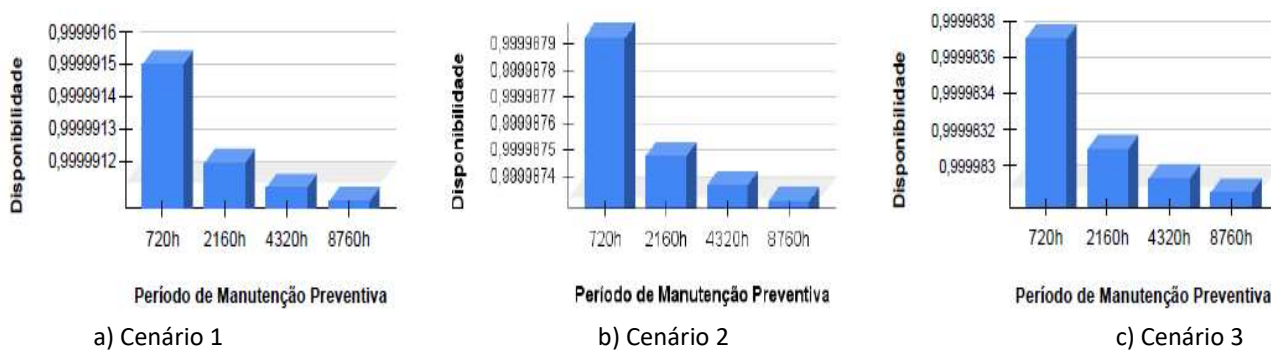


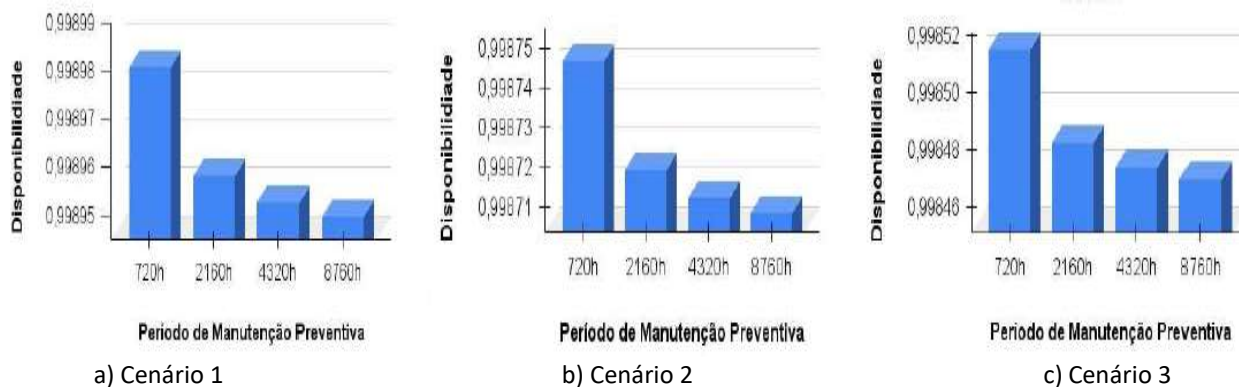
Figura 12: Disponibilidade Infraestruturas de Refrigeração, Arquitetura com Redundância.

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. Figura 13 detalha os dados obtidos a partir de uma arquitetura sem redundância, ao passo que Figura 14 detalha os dados obtidos a partir de uma arquitetura com redundância.

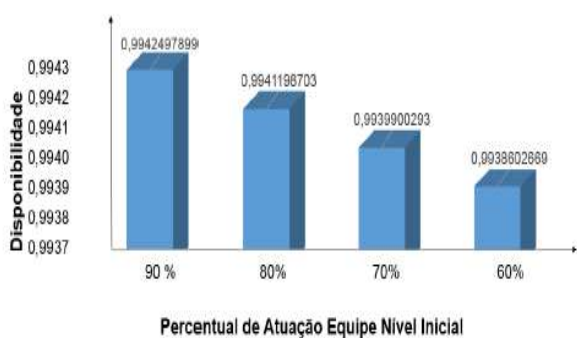
Figuras 13(a) e 14(a) mostram a disponibilidade estacionária relacionada aos SLAs I, IV, VII e X. Figuras 13(b) e 14(b) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs II, V, VIII e XI. Por fim, Figuras 13(c) e 14(c) mostram a disponibilidade estacionária para os SLAs III, VI, IX e XII. As figuras 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.

Estas figuras mostram que o período de 720 h entre manutenções preventivas apresenta o maior nível de disponibilidade nos diferentes cenários e arquiteturas das infraestruturas de refrigeração e de potência e, conforme este período aumenta, a disponibilidade estacionária destas infraestruturas diminui.

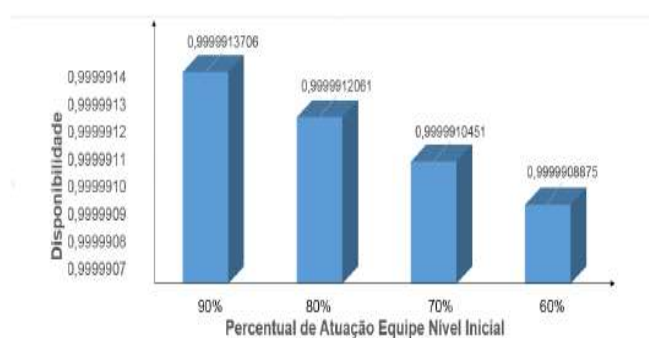
Entretanto, considerando ainda os cenários detalhados na Tabela 3, o impacto da variação da periodicidade entre manutenções preventivas sobre a disponibilidade estacionária das infraestruturas é menor em arquiteturas redundantes devido aos mecanismos de redundância inseridos entre os componentes destas arquiteturas.



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. Considerando ainda os tempos de reparo relacionados ao Cenário 1 (ver Tabela 3) e duas equipes de nível inicial, representadas nos modelos *SPN* desta seção por duas marcações no lugar *N1*, e uma equipe com maior nível de especialização, representada nestes mesmos modelos por uma marcação no lugar *N2*, Figuras 15 e 16 detalham a variação da disponibilidade estacionária das infraestruturas de refrigeração e de potência, considerando-se as arquiteturas sem redundância e com redundância, em função do percentual de ocorrências de manutenções corretivas que apenas necessitam da atuação de uma única equipe de nível inicial. 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.

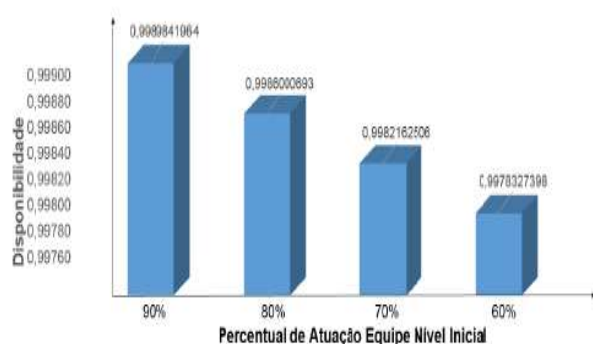


a) Arquitetura sem Redundância

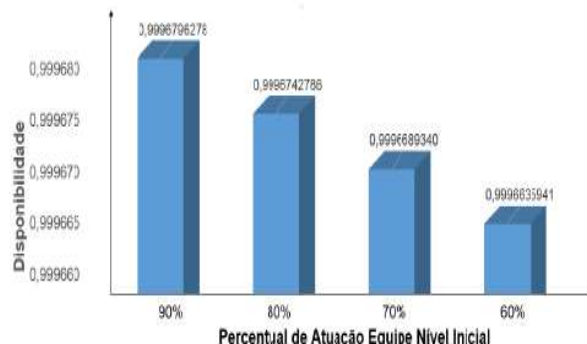


b) Arquitetura com Redundância

Figura 15: Infraestrutura de Refrigeração.



a) Arquitetura sem Redundância



b) Arquitetura com Redundância

Figura 16: Infraestrutura de Potência

De acordo com os dados detalhados nas figuras, como as manutenções corretivas que necessitam apenas da atuação de uma equipe de nível inicial demandam uma menor quantidade de tempo para sua execução, uma diminuição na proporção deste tipo de manutenção irá acarretar uma diminuição da disponibilidade estacionária do sistema.

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.

CONCLUSÃO

Nosso trabalho propôs modelos analíticos, baseados no mecanismo de modelagem *SPN*, a fim de proporcionar suporte para a análise do impacto de diferentes estratégias de políticas de manutenção, tanto preventiva quanto corretiva, considerando os parâmetros adotados em acordos de níveis de serviços sobre a disponibilidade estacionária das infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de *data center*. Tratamentos distintos foram adotados para as atividades de manutenção, considerando as diferenças operacionais e de redundância de diversas arquiteturas das infraestruturas de refrigeração e de potência, a fim de proporcionar informações mais detalhadas para suporte aos principais objetivos de um sistema de *date center*: a minimização dos custos e dos tempos de parada junto à maximização da disponibilidade.

Mecanismos de redundância foram utilizados para os componentes ativos das infraestruturas de

refrigeração e de potência a fim de também se obter uma análise dos diferentes impactos das estratégias de manutenção sobre arquiteturas com níveis de redundância distintos. A determinação de quais componentes ativos terão o emprego de mecanismos de redundância irá ser estabelecida pelo índice de importância para disponibilidade conforme a metodologia proposta. Algumas conclusões podem ser obtidas dos resultados deste estudo.

Primeiro, vale salientar que 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. Segundo a ocorrência da diminuição dos níveis da disponibilidade estacionária para as infraestruturas analisadas conforme a periodicidade entre manutenções preventivas seja incrementada. Entretanto, foi observado que o impacto de uma maior periodicidade entre manutenções preventivas sobre a diminuição da disponibilidade estacionária é menor em arquiteturas com componentes redundantes. Terceiro, para ilustrar a aplicabilidade da abordagem proposta, um estudo de caso foi realizado aonde foram analisadas as disponibilidades resultantes considerando as diferentes estratégias de políticas de manutenção a partir das infraestruturas estudadas. Finalmente, é essencial destacar algumas limitações desta pesquisa: tentamos alocar valores de *MTTF* o mais próximo possível a valores encontrados em componentes reais. No entanto, devido à variedade de marcas de fabricantes, esses valores podem diferir significativamente, o que pode causar impacto sobre os resultados.

Para trabalhos futuros, podemos aplicar esta abordagem em outros sistemas computacionais. Podemos também adotar o mecanismo de análise de sensibilidade para verificar a variação do impacto sobre a métrica disponibilidade do sistema a partir de cada um dos parâmetros dos modelos de propostos.

REFERÊNCIAS

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

AVIZIENIS, A., LAPRIE, J. C.; RANDELL, B.; LANDWEHR, C.. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. **IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing**, v.1, n.1, p.11-33, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2>.

BARABADY, J.; KUMAR, U.. Availability allocation through importance measures. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.24, n.6, p.643-657, 2007.

BIESER, J.; MENZEL, K.; HOFFMANN, K. Assessing a facility maintenance model of data centers: A methodology for advanced maintenance management for data centers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING IN CIVIL AND BUILDING ENGINEERING. **Anais**. Tampere, 2018.

BLISCHKE, W. R.; MURTHY, D. N. P.. **Case studies in reliability and maintenance**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003.

BOLCH, G.; GREINER, S.; MEER, H.; TRIVEDI, K.S.. **Queueing Networks and Markov Chains: Modelling and Performance**

Evaluation with Computer Science Applications. 2 Ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2006.

BUCO, M. J.; CHANG, R. N.; LUAN, L. Z.; WARD, C.; WOLF, J. L.; YU, P. S.. Utility computing sla management based upon business objectives. **IBM Systems Journal**, v.43, n.1, p.159-178, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1147/sj.431.0159>.

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, K.; MELO, C.; ARAÚJO, J.; ALENCAR, F.. Availability evaluation and maintenance policy of data center infrastructure. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS, 10. **Anais**. 2020.

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>

GERMAN, R.. **Performance Analysis of Communicating Systems: Modeling with Non-Markovian Stochastic Petri Nets**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2000.

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.; MACIEL, P.; MATIAS, R.. Design of it infrastructures of data centers: An approach based on business and technical metrics. Editors: Distefano, S.; Bruneo, D.. **Quantitative Assessments of Distributed Systems**. New York: Wiley-Scrivener, 2015.

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, 2020a.

GUIMARÃES, A. P.; SILVA, A. P.. Análise de aspectos de dependabilidade em sistemas de data centers integrando as infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração. **Revista Brasileira de Administração Científica**, v.11, n.4, p.200-218, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-684X.2020.004.0016>

JAIN, R.. **The Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques for Experimental Design Measurement Simulation and Modeling**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1991.

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

MARWAH, M.; MACIEL, P.; SHAH, A.; SHARMA, R.; CHRISTIAN, T.; ALMEIDA, V.; ARAÚJO, C.; SOUSA, E.; CALLOU, G.; SILVA, B.; GALDINO, S.; PIRES, J.. Quantifying the sustainability impact of data center availability. **SIGMETRICS Performance Evaluation Review**, v.37, p.64-68, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1145/1773394.1773405>

MELO, F.; ANDRADE, E.; CALLOU, G.. Evaluating the impact of maintenance policies associated to sla contracts on the dependability of data centers electrical infrastructures. **The Journal of Supercomputing**, v.27, n.1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03874-6>.

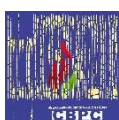
OGGERINO, C.. **High Availability Network Fundamentals**. Indianapolis: Cisco Press, 2001.

SAHNER, R.; TRIVEDI, K.S.; PULIAFITO, A.. **Performance and reliability analysis of computer systems: an example-based approach using the sharpe software package**. Berlin: Springer, 2012.

SILVA, B.; MATOS, R.; CALLOU, G.; FIGUEIREDO, J.; OLIVEIRA, D.; FERREIRA, J.; DANTAS, J.; ALVES, V.; MACIEL, P.. Mercury: An integrated environment for performance and dependability evaluation of general system. In: **DEPENDABLE SYSTEMS AND NETWORKS CONFERENCE. Anais**. Rio de Janeiro, 2015.

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/449518768004409158499024805450700786466740869613356520679561157598794638950401/>