

Uma abordagem para determinação da melhor estratégia de política de manutenção em infraestruturas de potência utilizando modelagem estocástica

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. Desta forma, além de técnicas de redundância estática ou dinâmica aplicadas a seus componentes para um funcionamento correto e contínuo destes sistemas, é de grande importância a adoção de estratégias adequadas para políticas de manutenção. Nosso estudo propôs modelos analíticos juntamente com uma metodologia com o objetivo da determinação da estratégia de política de manutenção mais adequada, baseada tanto em aspectos técnicos quanto aspectos orientados a negócios, que será adotada em uma arquitetura da infraestrutura de potência. Os aspectos técnicos referem-se às métricas de indisponibilidade resultantes da arquitetura/infraestrutura a partir de diferentes estratégias de manutenção. Por sua vez, os aspectos orientados a negócios são referentes às métricas de custos de mão-de-obra, associados a estas estratégias, aplicadas às arquiteturas da infraestrutura considerada. O estudo de caso utilizou uma infraestrutura de potência em arquiteturas com níveis crescentes de redundância para a aplicação da metodologia e dos modelos propostos. Os resultados mostraram que a estratégia de manutenção mais adequada para uma arquitetura/infraestrutura não possui necessariamente a menor indisponibilidade, mas adequa conjuntamente a menor indisponibilidade e os menores custos de manutenção.

Palavras-chave: Data Center; Indisponibilidade; Acordo de Nível de Serviço; Custos de Manutenção; Distância Euclidiana.

An approach for determining the best maintenance policy strategy in power infrastructures using stochastic modeling

Data centers are constantly growing, driving demands for new technologies such as cloud computing, e-commerce, which has forced the availability of these systems 24 hours a day, 7 days a week under penalty of great losses. In this way, in addition to static or dynamic redundancy techniques applied to its components for a correct and continuous functioning of these systems, it is of great importance to adopt adequate strategies for maintenance policies. Our study proposed analytical models along with a methodology with the aim of determining the most appropriate maintenance policy strategy, based on both technical and business-oriented aspects, which will be adopted in a power infrastructure architecture. The technical aspects refer to the unavailability metrics resulting from the architecture/infrastructure from different maintenance strategies. In turn, the business-oriented aspects refer to the labor cost metrics, associated with these strategies, applied to the considered infrastructure architectures. The case study used a power infrastructure in architectures with increasing levels of redundancy for the application of the proposed methodology and models. The results showed that the most suitable maintenance strategy for an architecture/infrastructure does not necessarily have the lowest unavailability, but it suits together the lowest unavailability and the lowest maintenance costs.

Keywords: Data Center; Unavailability; Service Level Agreement; Maintenance Costs; Euclidean Distance.

Topic: **Sistemas de Computação**

Received: **20/01/2023**

Approved: **05/02/2023**

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

João Vítor Santos Costa 
Universidade Federal de Alagoas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8253444815251411>
<https://orcid.org/0000-0002-8300-3738>
jvsc@ic.ufal.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-684X.2023.001.0005

Referencing this:

GUIMARÃES, A. P.; COSTA, J. V. S.. Uma abordagem para determinação da melhor estratégia de política de manutenção em infraestruturas de potência utilizando modelagem estocástica. **Revista Brasileira de Administração Científica**, v.14, n.1, p.60-76, 2023. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-684X.2023.001.0005>

INTRODUÇÃO

Data Center, ou Centro de Processamento de Dados, 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). Um sistema de *data center* é constituído essencialmente dos seguintes subsistemas: (i) infraestrutura de comunicação; (ii) infraestrutura de potência; e (iii) infraestrutura de refrigeração. A infraestrutura de comunicação é composta por três classes de componentes - servidores, dispositivos de interconexão (roteadores, *switches* etc.) e dispositivos de armazenamento (ARREGOCES et al., 2003). 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. Finalmente, a infraestrutura de refrigeração é basicamente composta pela torre de refrigeração, pelo resfriador e pelos aparelhos de ar-condicionado (*CRAC* - sigla proveniente do inglês *Computer Room Air Conditioning*) (ARREGOCES et al., 2003). Ela é responsável pela refrigeração da infraestrutura de comunicação de modo a evitar um superaquecimento.

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 nuvem (ARMBRUST et al., 2009) 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* (PONEMON INSTITUTE, 2016), calculados a partir de 63 sistemas de *data centers* de diversos setores da indústria nos Estados Unidos, o custo do *tempo de parada* no ano de 2016 quantificava o valor médio de US \$ 8.851 por minuto. Desta forma, além de técnicas de redundância estática ou dinâmica aplicadas a seus componentes, para um funcionamento correto e ininterrupto das diferentes infraestruturas destes sistemas é de grande importância a adoção de estratégias adequadas para políticas de manutenção que, por sua vez, possibilitem conjuntamente a minimização da indisponibilidade (UA - sigla proveniente do inglês *Unavailability*) (BOLCH et al., 2006) e dos custos associados a cada estratégia.

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 estudo. Manutenção corretiva, que é realizada quando ocorrem falhas no sistema como um todo ou em partes dele; a segunda abordagem, a manutenção preventiva, visa evitar que um determinado sistema ou parte dele venha a falhar através de manutenções periódicas. Além disso, contratos de acordos de níveis de serviços (*SLAs* - sigla proveniente do inglês *Service Level Agreement*) (BUCHO 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 diferentes 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.

Desde que os sistemas de *data center* estão firmemente conectados com os aspectos de negócios de suas corporações, a escolha da melhor estratégia para as políticas de manutenção destes sistemas deve considerar tanto os aspectos técnicos quanto os aspectos de negócios associados a estas políticas. Ao abordar esta questão, este trabalho propõe uma metodologia e modelos analíticos para proporcionar suporte a escolha da melhor estratégia para a política de manutenção da infraestrutura de potência relacionando, de maneira formal, aspectos técnicos e aspectos orientados a negócios. Com relação aos aspectos técnicos, é considerada a métrica de indisponibilidade para cada estratégia de manutenção analisada em uma arquitetura/infraestrutura. Por sua vez, as métricas orientadas a negócios são referentes aos custos de mão-de-obra relacionados aos contratos *SLA* adotados nas diversas estratégias de manutenção de cada arquitetura/infraestrutura. Devido à inexistência do sistema e aos custos de configuração, modelagem analítica é adotada como 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), além de expressões analíticas. Para a construção dos modelos *RBD* e *SPN* foram utilizadas as ferramentas *Time Net* (ZIMMERMANN, 2001) e *Mercury* (SILVA et al., 2015).

Nos últimos anos, diferentes trabalhos tratam de questões relacionadas à avaliação quantitativa de dependabilidade (AVIZIENIS et al., 2004) em sistemas de *data center* (CAMBOIM et al., 2020, MELO et al., 2022, BIESER et al., 2018, CALLOU et al., 2010, GUIMARÃES et al., 2020, GUIMARÃES et al., 2022). 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., 2022) propõe uma estratégia baseada em modelos analíticos, contratos de *SLA*, políticas de manutenção e técnicas otimização para avaliar o custo e a disponibilidade de infraestruturas elétricas em sistemas de data centers. A técnica de otimização proposta é baseada no mecanismo *DoE* (sigla proveniente do inglês *Design of Experiment*) (JAIN, 1991) e usa o índice de importância para disponibilidade (BARABADY et al., 2007) para detectar o equipamento que mais impacta a disponibilidade do sistema e, assim, poder propor melhorias. Além disso, uma abordagem de modelagem híbrida que considera as vantagens *SPN* e *RBD* são adotados para avaliar a disponibilidade. Por sua vez, o trabalho mostrado em (BIESER et al., 2018) demonstra o papel crucial de manutenção em sistemas de *data center* sob 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 das métricas associadas a cada estratégia são utilizados modelos analíticos que adotam uma abordagem híbrida

considerando as vantagens de *SPN* e *RBD*. O trabalho mostrado em (GUIMARÃES et al., 2020) têm por objetivo analisar a dependabilidade de sistemas de *data center* integrando as infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração considerando diferentes arquiteturas nas infraestruturas de refrigeração e de potência. Modelos de dependabilidade, baseados em uma abordagem hierárquica, que consideram níveis crescentes de redundância nestas arquiteturas foram criados utilizando os mecanismos de modelagem *RBD* e *SPN*. Por fim, o trabalho em (GUIMARÃES et al., 2022) têm por objetivo o de analisar o impacto que diferentes estratégias de políticas de manutenção possuem sobre a disponibilidade das infraestruturas de refrigeração e de potência em sistemas de *data center*. Além disso, este trabalho analisa a variação da disponibilidade destas infraestruturas com diferentes níveis de redundância em função do percentual de ocorrências de manutenções corretivas que apenas necessitam da atuação de uma única equipe de nível inicial. Modelos de dependabilidade foram criados utilizando os mecanismos de modelagem *RBD* e *SPN*.

Por sua vez, este trabalho incrementa a referência (GUIMARÃES et al., 2022) propondo modelos analíticos junto com uma metodologia permitindo a escolha da melhor estratégia para política de manutenção considerando aspectos técnicos e de negócios de uma arquitetura da infraestrutura de potência.

O resto deste artigo é organizado como segue. Seção 2 descreve a metodologia utilizada neste trabalho. Seção 3 detalha modelos, representando estruturas básicas, baseados nos mecanismos de modelagem *RBD* e *SPN* que serão utilizados na construção de modelos para a análise do impacto de diversas estratégias de manutenção em arquiteturas da infraestrutura 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.

METODOLOGIA

O principal objetivo de nosso estudo é o de realizar a determinação das melhores estratégias para políticas de manutenção a serem adotadas por diferentes arquiteturas da infraestrutura de potência de um sistema de *data center* considerando tanto aspectos técnicos quanto aspectos orientados a negócios. Nossa abordagem consiste em oito atividades que são: entendimento do problema; definição de parâmetros; definição de arquiteturas; criação de modelos e mapeamento de métricas; validação dos modelos; criação de modelos para cálculo de custos; normalização de métricas; e planejamento de políticas de manutenção.

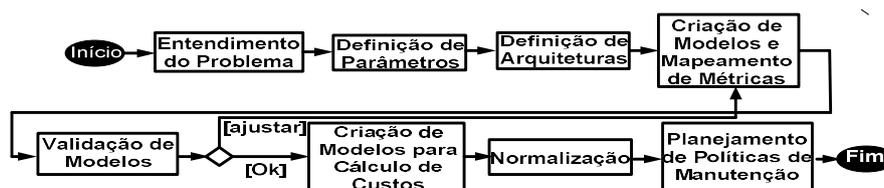


Figura 1. Metodologia Proposta.

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 componentes do sistema quanto às diferentes estratégias de manutenções preventivas e/ou corretivas adotadas pelo sistema. Com relação aos componentes do sistema, informações relativas ao *MTTF* (sigla proveniente do inglês *Mean Time To Failure*) de cada componente serão obtidas a partir de seus fabricantes ou de artigos científicos. Por sua vez, com relação às manutenções preventivas e/ou corretivas, as informações para estes tipos de manutenções estão relacionadas aos níveis de *SLA* acordados. Estes níveis definem informações tais como a periodicidade das manutenções preventivas, tempo de deslocamento de equipes, tempo administrativo, tempo médio de reparo relacionados às manutenções corretivas. As informações relacionadas aos componentes e às manutenções preventivas e/ou corretivas são utilizadas como parâmetros para os modelos *SPN* e *RBD* a serem definidos para a análise do impacto de diferentes estratégias de manutenção sobre a indisponibilidade do sistema. Além destes parâmetros, em nosso estudo serão considerados os custos de mão-de-obra associados aos níveis de *SLA* acordados.

A terceira atividade corresponde à definição de arquiteturas redundantes associadas à infraestrutura de potência de um sistema de *data center*. Arquiteturas distintas serão caracterizadas pela utilização de 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 (BARABADY et al., 2007). Para o cálculo deste índice foi utilizada a ferramenta *Mercury* e implementado um modelo *RBD* em série constituído pelos principais componentes da infraestrutura de potência sem redundância.

A quarta atividade refere-se à criação de modelos para a análise das métricas consideradas em nosso estudo. Foram criados modelos utilizando os mecanismos de modelagem *SPN* e *RBD*, além de expressões analíticas. Esta atividade é executada pela composição e relacionamentos entre todos principais componentes em função do aspecto do sistema sendo modelado de acordo com regras específicas de cada mecanismo de modelagem utilizado e pelo mapeamento das métricas desejadas através de expressões representadas pelos elementos de cada modelo. Inicialmente, foram criados modelos para a análise do impacto de diferentes políticas de manutenção, baseadas nos diferentes níveis de *SLA*, sobre a indisponibilidade do sistema. Nestes modelos, as características do sistema, mecanismos de redundância, nível de interação entre os componentes e políticas de manutenção irão determinar qual mecanismo de modelagem utilizar. Para proporcionar suporte a estas exigências, foi adotado o mecanismo de modelagem *SPN* para representar as diversas estratégias de políticas de manutenção do sistema baseadas nos diferentes níveis de *SLA*. Para a construção destes modelos serão utilizadas as ferramentas *Mercury* e *Time Net*. Com relação às expressões analíticas, estas devem abordar questões relacionadas aos custos de mão-de-obra em cada uma das estratégias de manutenção de cada arquitetura/infraestrutura.

A atividade Validação dos Modelos analisa e efetua ajustes quando necessário. Para esta atividade,

a ferramenta *token game* (SILVA et al., 2015) e o mecanismo de análise de sensibilidade (BOLCH et al., 2006) são utilizados. A ferramenta *token game* analisa vários estados que o sistema pode alcançar, a relação temporal entre seus componentes, situações de impasse (*deadlock*) etc. Por sua vez, o mecanismo de análise de sensibilidade é utilizado para avaliar a sensibilidade do modelo em relação à variação em seus parâmetros. O fim desta fase é alcançado quando cada modelo proporciona resultados com exatidão apropriada.

Após a etapa de Validação, os modelos resultantes serão utilizados para o cálculo das métricas de indisponibilidade e de custos de mão-de-obra em cada uma das estratégias de manutenção associadas a uma arquitetura/infraestrutura. Estes modelos relacionam diretamente os valores das métricas obtidos a partir dos modelos *SPN*, criados na quarta atividade, com aspectos de negócios relacionados às atividades de manutenção.

Com relação à atividade de planejamento de políticas de manutenção são consideradas as métricas de indisponibilidade do sistema (*UA*) e custo de mão-de-obra (*C*) associadas a cada estratégia de manutenção *i* em uma dada arquitetura/infraestrutura. A métrica de indisponibilidade, obtida por $UA = 1 - A$, aonde *A* (AVIZIENIS et al., 2004) é a disponibilidade do sistema, é obtida através de modelos que utilizam o mecanismo de modelagem *SPN* e a métrica de custo de mão-de-obra é obtida através dos modelos analíticos baseados em negócios que por sua vez também utilizam métricas obtidas nos modelos *SPN*. A necessidade de normalização é devida ao fato de que as métricas citadas apresentam ordem de grandeza distintas. Desta maneira, os valores destas métricas, em cada estratégia de manutenção *i*, são apresentados como valores absolutos e normalizados em relação a correspondente métrica de maior valor, através da Equação 1

$$I_{ni} = \frac{I_i}{I_m} \quad (1)$$

sendo I_{ni} o índice normalizado de cada métrica para a estratégia de manutenção *i*; I_i o valor não normalizado de cada métrica para a estratégia de manutenção *i*; e I_m maior valor de cada métrica considerando todas as estratégias de manutenção analisadas em uma arquitetura/infraestrutura. Após a normalização das métricas, será escolhida a estratégia de manutenção mais adequada. A estratégia com a menor distância Euclidiana do par de valores normalizados (nUA_i, nC_i) para a origem (0,0) é a estratégia escolhida para uma arquitetura/infraestrutura específica.

Modelos

Os modelos adotados para quantificar os aspectos de dependabilidade da infraestrutura de potência foram propostos em (GUIMARÃES et al., 2022) (GUIMARÃES et al., 2013). Por sua vez, os modelos de negócios propostos proporcionam suporte a escolha da melhor estratégia para a política de manutenção.

Modelos de Dependabilidade

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)).

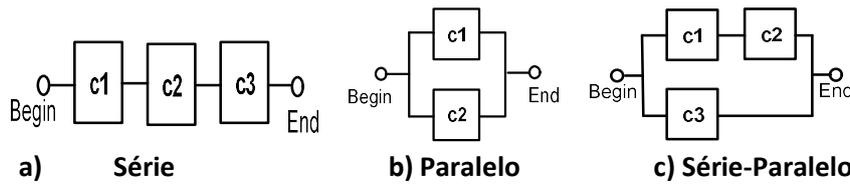


Figura 2: Estruturas Básicas.

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:

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

aonde $P_i(t)$ 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:

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

aonde $P_i(t)$ 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 mecanismos de redundância largamente utilizados em projetos de sistemas.

Modelo Base Política de Manutenção (BPM): Figura 3 (GUIMARÃES et al., 2022) 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.

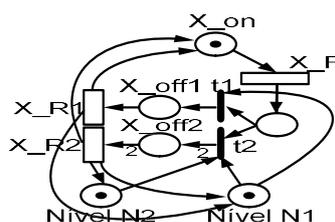


Figura 3: Modelo Base Política de Manutenção – BPM.

O parâmetro *MTTF* do componente genérico representa o atraso associado à transição X_F . Por sua vez, o parâmetro *MTTR* (sigla proveniente do inglês *Mean Time To Repair*) refere-se ao tempo administrativo, tempo de deslocamento e tempo médio de reparo de manutenções corretivas deste componente e 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 80% dos reparos será necessária apenas a atuação de uma equipe de nível inicial e em 20% 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	0,8	--
$t2$	1	0,2	--

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

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

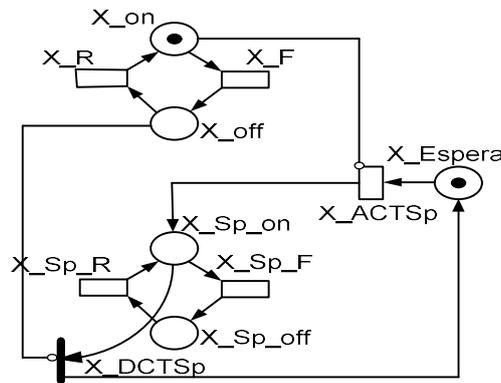


Figura 4: Modelo Espera a Frio – EF.

Modelos de Negócios

Custos de Mão-de-Obra

O custo total de mão-de-obra (C) é calculado considerando-se a mão-de-obra relacionada à manutenção preventiva e a mão-de-obra relacionada à manutenção corretiva. Além disso, em cada tipo de manutenção, temos os custos de mão-de-obra relacionados às equipes de nível inicial de atuação e os custos de mão-de-obra relacionados às equipes de maior nível de especialização.

Inicialmente, com relação à manutenção preventiva, o cálculo do custo de mão-de-obra considerou a execução sobre todos os componentes simultaneamente em cada arquitetura da infraestrutura de potência. Inicialmente, Equação 2 mostra o cálculo do custo de mão-de-obra relacionado às equipes de nível inicial de atuação. Nesta equação, $E\{\#Manutencao\}$ é o valor esperado do lugar Manutenção (ver Figuras 6 e 7). O resultado é multiplicado por N/M devido ao fato de que temos N equipes de nível inicial de atuação do total de M equipes utilizadas nesta manutenção. O parâmetro custo/hora é o custo por hora trabalhada pelas equipes de nível inicial de atuação e período refere-se à unidade de tempo (em horas) considerada para o cálculo. Esta unidade de tempo pode ser um dia, um mês ou um ano.

$$C_{p1} = (N/M(E\{\#Manutencao\})) * (\text{custo/hora}) * (\text{período}) \quad (2)$$

Por sua vez, Equação 3 mostra o cálculo do custo de mão-de-obra para o caso de manutenção preventiva relacionado à equipe de maior nível de especialização. Nesta equação $E\{\#Manutencao\}$ é o valor esperado do lugar Manutenção. O resultado é multiplicado por I/M devido ao fato de que temos I equipes de maior nível especialização do total de M equipes utilizadas nesta manutenção. O parâmetro custo/hora é o custo por hora trabalhada pelas equipes de maior nível de especialização e período refere-se à unidade de tempo (em horas) considerada para o cálculo. De forma semelhante a equação anterior, esta unidade de tempo pode ser um dia, um mês ou um ano.

$$C_{p2} = (I/M(E\{\#Manutencao\})) * (\text{custo/hora}) * (\text{período}) \quad (3)$$

Com relação à manutenção corretiva, o cálculo do custo de mão-de-obra tomou por base cada um dos componentes em cada arquitetura da infraestrutura de potência. Nesta seção, iremos detalhar as expressões genéricas a todos os componentes. Inicialmente, Equação 4 mostra o cálculo do custo de mão-de-obra de manutenção corretiva relacionado às equipes de nível inicial de atuação. Nesta equação, $E\{X_{off}1$

é o valor esperado do lugar X_{off1} (ver Figuras 6 e 7) que representa o estado em que o reparo é efetuado apenas pela equipe de nível inicial de atuação. $E\{X_{off2}$ é o valor esperado do lugar X_{off2} que representa o estado em que o reparo é efetuado por uma equipe de nível inicial e por outra equipe com um maior nível de especialização. O resultado é multiplicado por 1/2 devido ao fato de que temos uma equipe de nível inicial de atuação do total de duas equipes utilizadas nesta manutenção. O parâmetro custo/hora é o custo por hora trabalhada pelas equipes de nível inicial de atuação e período refere-se à unidade de tempo (em horas) considerada para o cálculo. Esta unidade de tempo pode ser um dia, um mês ou um ano.

$$C_{c1} = (((E\{X_{off1}\}) + (1/2*(E\{X_{off2}\}))) * (\text{custo/hora}) * (\text{período})) \quad (4)$$

Por fim, Equação 5 mostra o cálculo do custo de mão-de-obra para o caso de manutenção preventiva relacionado à equipe de maior nível de especialização. $E\{X_{off2}\}$ é o valor esperado do lugar X_{off2} . O resultado é multiplicado por 1/2 devido ao fato de que temos uma equipe de maior nível de especialização do total de duas equipes utilizadas nesta manutenção. O parâmetro custo/hora é o custo por hora trabalhada pelas equipes de maior nível de especialização e período refere-se à unidade de tempo (em horas) considerada para o cálculo. De forma semelhante a equação anterior, esta unidade de tempo pode ser um dia, um mês ou um ano.

$$C_{c2} = ((1/2*(E\{X_{off2}\}) * (\text{custo/hora}) * (\text{período})) \quad (5)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nosso estudo tem por objetivo a determinação das melhores estratégias para políticas de manutenção que serão adotadas por diferentes arquiteturas da infraestrutura de potência de um sistema de *data center* considerando tanto aspectos técnicos quanto aspectos orientados a negócios. Figura 5 detalha os principais componentes da infraestrutura de potência proposta em (GOVINDAN 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 *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*) 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. Os valores de MTTF relacionados aos componentes da infraestrutura de potência foram obtidos em (GOVINDAN et al., 2010) e são mostrados na Tabela 2.

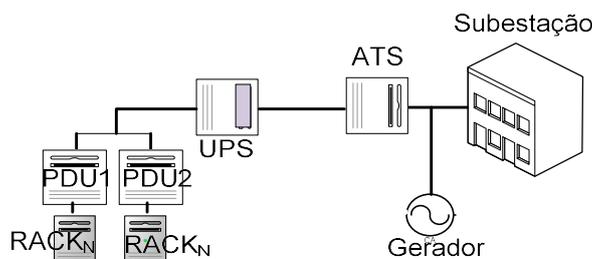


Figura 5: Infraestrutura de Potência.

Tabela 2: Métricas de Dependabilidade: Infraestrutura de Potência.

Componente	MTTF (h)	Componente	MTTF (h)
Subestação	257,069	Gerador	9.708,74
ATS	102.145,05	UPS	27.472,53
PDU	555.555,55	--	--

Tabela 3 detalha os parâmetros de diferentes cenários, referentes à política de manutenção corretiva da infraestrutura de potência, que serão adotados em nosso estudo. Para cada componente é considerado o *MTTR*, que incorpora 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 *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 3: Tempo Reposição diferentes Cenários.

Infraestrutura de Potência			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<i>MTTR_Subestação_Nível_1</i>	0,032 h	0,049 h	0,066 h
<i>MTTR_Subestação_Nível_1_Nível_2</i>	1,032 h	1,049 h	1,066 h
<i>MTTR_Gerador_Nível_1</i>	4 h	8 h	12 h
<i>MTTR_Gerador_Nível_1_Nível_2</i>	6 h	10 h	14 h
<i>MTTR_ATS_Nível_1</i>	5,88 h	9,88 h	13,88 h
<i>MTTR_ATS_Nível_1_Nível_2</i>	7,88 h	11,88 h	15,88 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

Tabela 4: Valores Importância para Disponibilidade.

Componente	Impot. para Disponib.	Componente	Import. para Disponib.
Subestação	0,9998244	UPS	1,00
PDU	0,9998093	--	--

Seguindo os passos da metodologia proposta, Tabela 4 mostra os valores de importância para disponibilidade obtidos a partir dos componentes da infraestrutura de potência para proporcionar suporte à definição de arquiteturas redundantes associadas a esta infraestrutura. Para o cálculo deste índice foi adotada a ferramenta *Mercury* e definido um modelo *RBD* em série considerando uma arquitetura sem redundância desta infraestrutura. Pode-se verificar que o componente *UPS* possui o maior índice de importância para disponibilidade sendo seguido pelos componentes *subestação* e *PDU*. Seguindo estes valores, foram alocadas redundâncias para os componentes *subestação* e *UPS*.

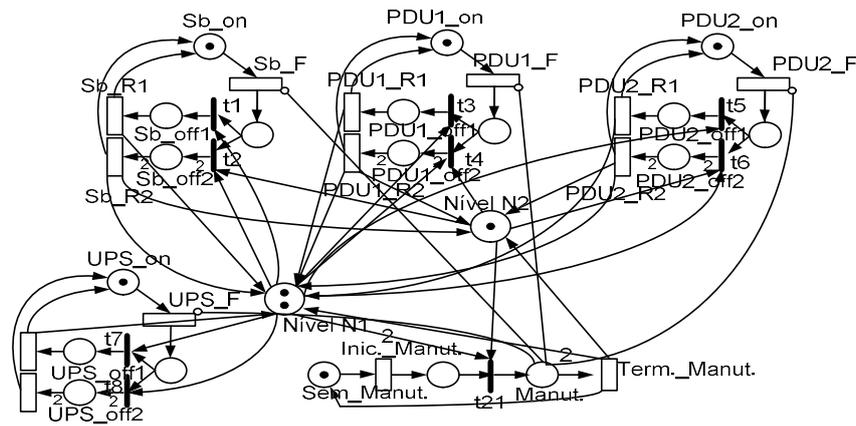


Figura 6: Modelo SPN Política de Manutenção: Infraestrutura de Potência sem Redundância.

Figura 6 (Guimarães et al., 2022) mostra o modelo SPN para proporcionar suporte à determinação da melhor estratégia para política de manutenção considerando uma arquitetura sem redundância da infraestrutura de potência. Lugar *Sem_Manut* representa esta arquitetura/infraestrutura 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 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.

Tabela 5: Parâmetros Transições Imediatas: Infraestrutura de Potência sem Redundância.

Nome	Peso	Prioridade	Função_Guarda
<i>tx1</i>	0,8	2	--
<i>tx2</i>	0,2	2	--

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 80 % 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 20 % destas ocorrências. Transições *t3* e *t4*, *t5* e *t6*, *t7* e *t8* representam estes mesmos parâmetros e são representadas na Tabela 5 como *tx1* e *tx2*.

Por sua vez, Figura 7 (GUIMARÃES et al., 2022) mostra o modelo SPN para proporcionar suporte à determinação da melhor estratégia para política de manutenção considerando uma arquitetura com redundância da infraestrutura de potência. 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. 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.

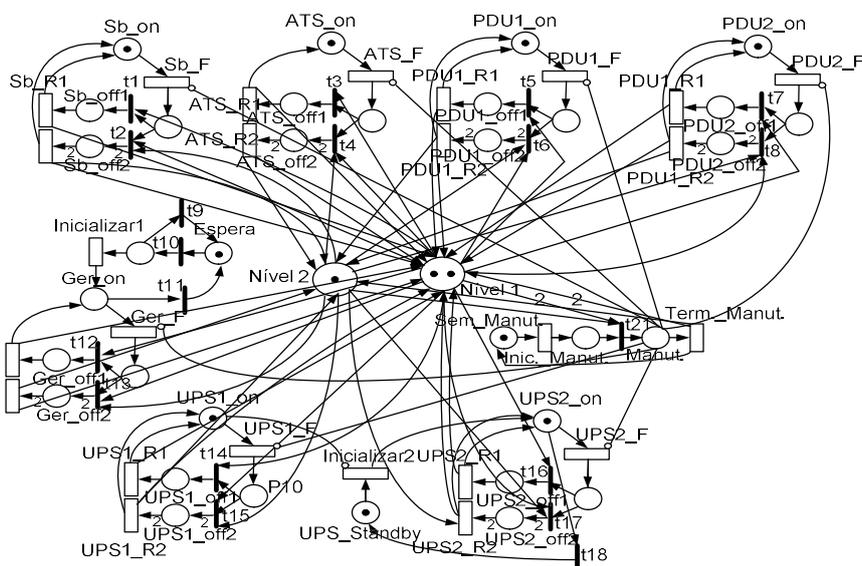


Figura 7: Modelo SPN Política de Manutenção: Infraestrutura de Potência com Redundância.

Tabela 6: 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
t16	0,2	2	((#P10==0)&&(#UPS1_off1==0)&&(#UPS1_off2==0))
t17	0,8	2	((#P10==0)&&(#UPS1_off1==0)&&(#UPS1_off2==0))
t18	1	3	#UPS1_on == 1
tx1	0,2	2	--
tx2	0,8	2	--

O parâmetro *MTTF* de cada componente (principal e redundante) desta infraestrutura representa o atraso associado às respectivas 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 *t10* e *Inicializar1*, para o lugar *Ger_on*. Por sua vez, 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*.

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 80 % 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 20 % destas ocorrências. 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, que também mostra os parâmetros associados às transições imediatas do modelo da Figura 7.

Os *SLAs*, que servem de base para definir as diferentes estratégias de políticas de manutenção correspondem aos intervalos de 720 h, 2.160 h, 4.320 h, 6.480 h, 8.760 h para manutenção preventiva (Intervalo M.P.) junto aos diferentes cenários para a manutenção corretiva mostrados na Tabela 3. Tabelas 7 e 8 detalham os parâmetros utilizados do *SLA I* até o *SLA XV*. Os parâmetros do Cenário 1 junto a intervalos de manutenção preventiva de 720 h, 2.160 h, 4.320 h, 6.480 h e 8760 h correspondem aos *SLAs I, II, III, IV* e *V* respectivamente. Por sua vez, os parâmetros do Cenário 2 junto a intervalos de manutenção preventiva de 720 h, 2.160 h, 4.320 h, 6.480 h e 8760 h correspondem aos *SLAs VI, VII, VIII, IX* e *X* respectivamente. Por fim, os parâmetros do Cenário 3 junto a intervalos de manutenção preventiva de 720 h, 2.160 h, 4.320 h, 6.480 h e 8760 h correspondem aos *SLAs XI, XII, XIII, XIV* e *XV* respectivamente.

Tabela 7: Metricas SLAs: Infraestrutura de Potência sem Redundância.

SL	Interval	Cenári	Custo/h(\$) <i>Prev</i>		Custo/h(\$) <i>Corrt</i>		Custo (\$)	Indisponibilidad	nUA	nC	Dist.
			N1	N2	N1	N2					
I	720	1	500	700	950	1.600	504577,3	0,00139993	0,7291871	1,0000000	1,23762431
II	2.160	1	600	800	950	1.600	217258,8	0,00143070	0,7452144	0,4305758	0,86066263
III	4.320	1	700	900	950	1.600	136183,3	0,0014386	0,7493293	0,2698959	0,79645359
IV	6.480	1	800	1000	950	1.600	108959,6	0,00144126	0,7507149	0,2159424	0,78115554
V	8760	1	900	1.100	950	1.600	94349,26	0,00144265	0,7514389	0,1869866	0,77435422
VI	720	2	500	700	800	1.400	503370,1	0,00163301	0,8505924	0,9976074	1,31100275
VII	2.160	2	600	800	800	1.400	216029,1	0,00166892	0,8692970	0,4281387	0,96900991
VIII	4.320	2	700	900	800	1.400	134948,1	0,00167812	0,8740891	0,2674478	0,91408978
IX	6.480	2	800	1000	800	1.400	107721,6	0,00168124	0,8757142	0,2134888	0,90136170
X	8760	2	900	1.100	800	1.400	93423,70	0,00168290	0,8765789	0,1851523	0,89591962
XI	720	3	500	700	650	1.250	501793,9	0,00186300	0,9703883	0,9944835	1,38947867
XII	2.160	3	600	800	650	1.250	214423,4	0,00190391	0,9916972	0,4249564	1,07891215
XIII	4.320	3	700	900	650	1.250	133334,3	0,00191444	0,9971820	0,2642495	1,03160065
XIV	6.480	3	800	1000	650	1.250	106104,8	0,00191797	0,9990207	0,2102845	1,02091236
XV	8760	3	900	1.100	650	1.250	91492,29	0,00191985	1,0000000	0,1813245	1,01630635

Com relação aos custos de manutenção, a métrica custo total de mão-de-obra (C), associada a cada estratégia de manutenção em uma arquitetura da infraestrutura de potência, é calculada considerando os custos de mão-de-obra em manutenções preventivas e corretivas relacionados tanto às equipes de nível inicial de atuação (N1) quanto às equipes com maior nível de especialização (N2) através das Equações 2, 3, 4 e 5. Tabelas 7 e 8 também mostram os parâmetros utilizados por estas equações em cada estratégia de manutenção.

Figura 8 mostra os valores normalizados das métricas custo total de mão-de-obra (C) e indisponibilidade (UA) de cada estratégia de manutenção em uma arquitetura sem redundância da infraestrutura de potência. A estratégia cujos valores normalizados apresentarem a menor distância Euclidiana para a origem será a estratégia escolhida. Por sua vez, Tabela 7 mostra também os valores das métricas de indisponibilidade e custo total de mão-de-obra associadas a cada estratégia em uma arquitetura sem redundância da infraestrutura de potência (ver Figura 6). Segundo nossa metodologia, o SLA V apresenta a estratégia escolhida para esta arquitetura devido ao fato de ter a menor distância Euclidiana para a origem.

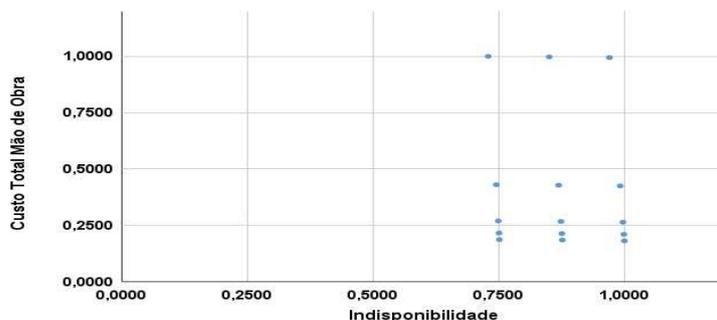


Figura 8: Custo Total Mão de Obra x Indisponibilidade: Infraestrutura de Potência sem Redundância.

Figura 9 mostra os valores normalizados das métricas custo total de mão-de-obra (C) e indisponibilidade (UA) obtidos a partir de cada estratégia de manutenção em uma arquitetura com redundância da infraestrutura de potência. A estratégia cujos valores normalizados apresentarem a menor distância Euclidiana para a origem será a escolhida. Por sua vez, Tabela 8 mostra também os valores das métricas de indisponibilidade e custo total de mão-de-obra associadas a cada estratégia em uma arquitetura com redundância da infraestrutura de potência (ver Figura 7). Segundo nossa metodologia, o SLA V apresenta a estratégia escolhida para esta arquitetura devido ao fato de ter a menor distância Euclidiana para a origem.

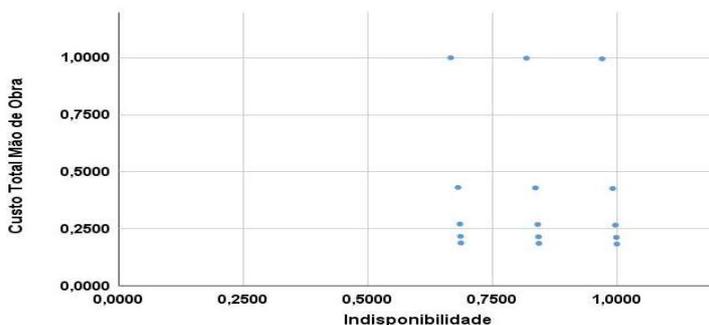


Figura 9: Custo Total Mão de Obra x Indisponibilidade: Infraestrutura de Potência com Redundância.

Segundo os resultados obtidos, podemos verificar que a estratégia de manutenção mais adequada em uma arquitetura não é necessariamente a de menor indisponibilidade ou de menor custo, mas a que melhor incorpore os aspectos técnicos e negócios. Desta forma, a estratégia que possui conjuntamente o menor custo e a menor indisponibilidade será selecionada. Estas tabelas mostram ainda que, quando temos o mesmo intervalo de manutenção preventiva em diferentes SLAs, os custos de mão-de-obra com manutenção apresentam valores próximos indicando que são estes intervalos quem determinam prioritariamente estes custos.

Tabela 8: Metricas SLAs: Infraestrutura de Potência com Redundância.

SLA	Intervalo	Cenário	Custo/h(\$)		Custo/h(\$)		Custo (\$)	Indisponibilidade{	nUA	nC	Dist.
			N1	N2	N1	N2					
I	720	1	500	700	9500	1.600	505284,95	0,00028996	0,66671265	1,00000000	1,20187593
II	2.160	1	600	800	950	1.600	217982,43	0,00029633	0,68135936	0,43140496	0,80644951
III	4.320	1	700	900	950	1.600	136912,12	0,00029797	0,68513026	0,27096021	0,73676516
IV	6.480	1	800	1000	950	1.600	109688,47	0,00029852	0,68639489	0,21708240	0,71990465
V	8760	1	900	1.100	950	1.600	95078,79	0,00029881	0,68706169	0,18816865	0,71236312
VI	720	2	500	700	800	1.400	504335,25	0,00035604	0,81865213	0,99812045	1,29090502
VII	2.160	2	600	800	800	1.400	217016,06	0,00036387	0,83665586	0,42949243	0,94045562
VIII	4.320	2	700	900	800	1.400	135940,44	0,00036588	0,84127751	0,26903719	0,88324903
IX	6.480	2	800	1000	800	1.400	108715,48	0,00036655	0,84281805	0,21515677	0,86984752
X	8760	2	900	1.100	800	1.400	94104,68	0,00036690	0,84362282	0,18624081	0,86393582
XI	720	3	500	700	650	1.250	502902,93	0,00042204	0,97040767	0,99528578	1,39006648
XII	2.160	3	600	800	650	1.250	215557,10	0,00043131	0,99172243	0,42660502	1,07958567
XIII	4.320	3	700	900	650	1.250	134541,51	0,00043370	0,99721782	0,26626858	1,03215422
XIV	6.480	3	800	1000	650	1.250	107246,24	0,00043450	0,99905728	0,21224903	1,021354539
XV	8760	3	900	1.100	650	1.250	92634,32	0,00043491	1,00000000	0,18333086	1,01666622

CONCLUSÃO

Nosso trabalho propôs uma metodologia juntamente com modelos analíticos a fim de proporcionar suporte para a determinação das melhores estratégias para políticas de manutenção a serem adotadas por diferentes arquiteturas da infraestrutura de potência de um sistema de *data center*. Nossa abordagem leva em conta conjuntamente aspectos técnicos e de negócios a fim de fornecer a estratégia mais adequada com uma melhora na relação entre os aspectos técnicos e de negócios. Os modelos analíticos, que são baseados no mecanismo de modelagem *SPN* e *RBD*, propostos visam analisar o impacto de diversas estratégias sobre a indisponibilidade de diferentes arquiteturas da infraestrutura de potência. Algumas conclusões podem ser obtidas dos resultados deste estudo. Primeiro, a utilização desta abordagem tende a ser superior a abordagens que apenas minimize os custos e satisfaça as métricas técnicas selecionadas. Segundo, nossa abordagem resolve um problema atual no projeto de *SLA* em relação à escolha de parâmetros técnicos. Na realidade, a melhor solução é simplesmente considerar os parâmetros técnicos correspondentes a melhor estratégia de manutenção obtida através da consideração dos aspectos de negócios. Finalmente, a melhor estratégia é calculada a partir de uma configuração específica da arquitetura/infraestrutura analisada. Diferentes resultados podem ser alcançados a partir da alteração dos componentes de configuração. Por fim, 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 a outras infraestruturas de sistemas de *data center* além de outros sistemas computacionais.

REFERÊNCIAS

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

ARMBRUST, M.; FOX, A., GRIFFITH, R., JOSEPH, A.D.; KATZ, R.; KONWINSKI, A.; LEE, G.; PATTERSON, D.; RABKIN, A.; ZAHARIA, M.. **Above the clouds: a berkeley view of cloud**

computing. Berkeley: University of California, 2009.

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:

<http://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.** ICCCB, 2018.

BLISCHKE, W. R.; MURTHY, D. N. P.. **Case studies in reliability and maintenance.** 2003.

BOLCH, G.; GREINER, S.; DE MEER, H.; TRIVEDI, K. S.. **Queuing networks and markov chains: modelling and performance evaluation with computer science applications.** 2 ed.. 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: <http://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: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICSL. **Proceedings**. p.526-533, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICSMC.2010.5642025>

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**. p.198-203, 2020. DOI: <http://doi.org/10.5753=sbscestendido:2020:13113>

FAN, X.; WEBER, W.; BARROSO, L. A.. Power provisioning for a warehouse-sized computer. **SIGARCH Comput. Archit. News**, v.35, n.2, p.13-23, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1145/1273440.1250665>

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

GOVINDAN, S.; WANG, D.; CHEN, L.; SIVASUBRAMANIAM, A.; URGONKAR, B.. **Modeling and analysis of availability of data center power infrastructure:** Technical Report: CSE 10-006. The Pennsylvania State University, 2010.

GUIMARÃES, A.P.; MACIEL, P.; MATIAS JUNIOR, R.. An analytical modeling framework to evaluate converged networks through business-oriented metrics. **Reliability Engineering and System Safety**, v.118, p.81-92, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.res.2013.04.008>

GUIMARÃES, A.P.; MACIEL, P.; MATIAS JUNIOR, R.. Design of it infrastructures of data centers: an approach based on

business and technical metrics. In: DISTEFANO, S.; BRUNEO, D.. **Quantitative assessments of distributed systems.** Wiley-Scrivener, 2015.

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, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-684X.2020.004.0016>

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>

JAIN, R.. **The art of computer systems performance analysis techniques for experimental design measurement simulation and modeling.** John Wiley & Sons, 1991.

KUO, W.; ZUO, M. J.. **Optimal reliability modeling: principles and applications.** 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: <http://doi.org/10.1145/1773394.1773405>

MELO, F.; ANDRADE, E.; CALLOU, G.. Optimization of Electrical at Data Centers through a DoE-based approach. **The Journal of Supercomputing**, v.78, p.406-439, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11227-021-03874-6>

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

PONEMON INSTITUTE LLC. **Cost of data center outages: data center performance benchmark series.** Technical report, 2016.

SAHNER, R.; TRIVEDI, K.S.; PULIAFITO, A.. **Performance and reliability analysis of computer systems: an example-based approach using the sharpe software package.** 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, 45. **Proceedings**. 2015.

ZIMMERMANN, A.; FREIHEIT, J.; GERMAN, R.; HOMMEL, G.. **Petri net modelling and performability evaluation with timenet 3.0.** p.188-202, 2001. DOI: http://doi.org/10.1007/3-540-46429-8_14

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.