

## ***Análise de aspectos de dependabilidade em sistemas de data centers integrando as infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração***

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 por objetivo a melhoria nos aspectos de dependabilidade de sistemas de data centers integrando as infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração considerando diferentes arquiteturas. Estas arquiteturas foram definidas baseadas no incremento de redundância referente às infraestruturas de potência e de refrigeração considerando uma infraestrutura de comunicação proposta. Por sua vez, este incremento, que é baseado no índice de importância para disponibilidade, aplicado aos componentes destas referidas infraestruturas, considera adaptações de mecanismos de redundância largamente utilizados em projetos de sistemas. Modelos de dependabilidade foram criados utilizando os mecanismos de modelagem Diagrama de Blocos de Confiabilidade e redes de Petri estocásticas baseados em uma abordagem hierárquica que considera as vantagens e possibilidades de ambos os tipos de modelos. Além disso, um estudo foi elaborado para a análise da disponibilidade das diferentes arquiteturas propostas através da aplicação dos modelos hierárquicos.

**Palavras-chave:** Dependabilidade; Data Center; Importância para Disponibilidade; Mecanismos de Redundância.

## ***Analysis of dependability aspects in data centre systems integrating communication, power and cooling infrastructures***

Data centers are constantly growing, driving demands for 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 major losses. Our study aims to improve the dependability aspects of data center systems integrating the communication, power and cooling infrastructures considering different architectures. These architectures were defined based on the increment of redundancy regarding the power and cooling infrastructures considering a proposed communication infrastructure. In turn, this increase, which is based on the index of availability importance applied to the components of these infrastructures, considers adaptations of redundancy mechanisms widely used in system designs. Dependability models were created using the Reliability Block Diagram and stochastic Petri nets modeling mechanisms based on a hierarchical approach that considers the advantages and possibilities of both types of models. In addition, a study was carried out to analyze the availability of the different proposed architectures through the application of the hierarchical models.


**Keywords:** Dependability; Data Center; Availability Importance; Redundancy Mechanisms.


Topic: **Sistemas de Computação**

Received: **10/10/2020**

Approved: **21/12/2020**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Almir Pereira Guimarães   
Universidade Federal de Alagoas, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/3181745681718312>  
<http://orcid.org/0000-0002-9242-3355>  
[almirguimaraes@yahoo.com.br](mailto:almirguimaraes@yahoo.com.br)

Alan Pereira da Silva   
Universidade Federal de Alagoas  
<http://lattes.cnpq.br/8047275385089590>  
<http://orcid.org/0000-0002-2466-3007>  
[aps@ic.ufal.br](mailto:aps@ic.ufal.br)



DOI: 10.6008/CBPC2179-684X.2020.004.0016

### **Referencing this:**

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>

## INTRODUÇÃO

*Data Center* é um ambiente projetado para concentrar servidores, equipamentos de processamento, armazenamento de dados e sistemas de ativos de rede, tais como *switches*, *roteadores* entre outros (ARREGOCES et al., 2003), sendo considerado um sistema de grande importância.

Um sistema de *data center* é constituído essencialmente de três subsistemas (ver Figura 1): (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). Por sua vez, a infraestrutura de potência é responsável pelo fornecimento ininterrupto de energia condicionado à tensão e frequência correta tanto para os equipamentos da infraestrutura de comunicação como para os equipamentos da infraestrutura de refrigeração (FAN et al., 2007). Finalmente, a infraestrutura de refrigeração do *data center* 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). Esta infraestrutura é responsável pela refrigeração da infraestrutura de comunicação de modo a evitar o superaquecimento que afeta sua disponibilidade.

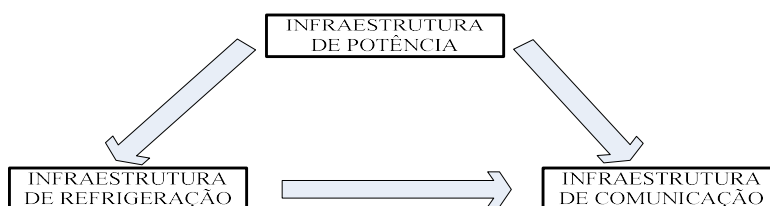


Figura 1: Infraestruturas de uma *Data Center*.

Durante os últimos anos têm-se notado um crescimento elevado em número, complexidade, tamanho e utilização dos *data centers* (GUIMARÃES et al., 2015). Isto tem sido influenciado principalmente pelo surgimento de novos paradigmas como computação em nuvem (ARMBRUST et al., 2009) e uma enorme quantidade de serviços baseados na internet, redes sociais e aplicações multimídia (MARWAH et al., 2010).

A facilidade de uso e de acesso a estes serviços tem tornado necessária a disponibilização destes sistemas 24 horas por dia, 7 dias por semana, além da necessidade de serem altamente confiáveis, pois um determinado serviço fora do ar, mesmo que por um curto espaço de tempo, pode levar a grandes prejuízos, facilmente ultrapassando milhões de dólares (PATTERSON, 2002). De acordo com os resultados de um estudo realizado pela *Ponemon Institute* (PILLC, 2016), calculados a partir de 63 *data centers* de diversos setores da indústria nos Estados Unidos, o custo do *downtime*<sup>1</sup> em 2016 quantificava o valor médio de US \$ 8.851 por minuto (Ver Figura 2).

Este estudo visa proporcionar dados substanciais para um melhor entendimento relacionado a questões de dependabilidade de *data centers* através da análise, de forma comparativa, do impacto da adoção de diversas arquiteturas sobre a disponibilidade destes sistemas. Por sua vez, estas arquiteturas

<sup>1</sup> O *downtime* é o período em que um sistema está indisponível.

consideram combinações de diferentes mecanismos de redundância adotados pelos componentes ativos em suas infraestruturas de refrigeração e de potência, considerando uma infraestrutura de comunicação proposta.

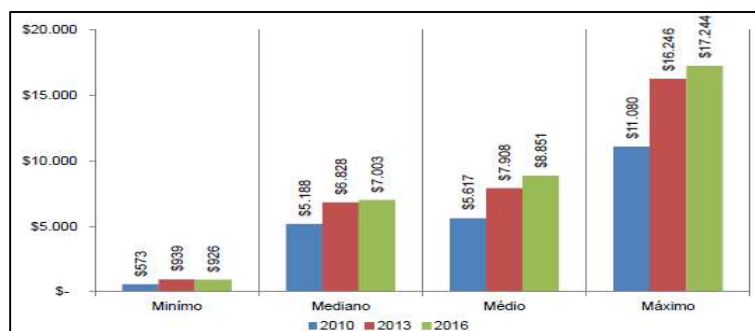


Figura 2: Custo Total por Minuto de uma Interrupção não Planejada.

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 Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD - sigla proveniente do inglês *Reliability Block Diagram*) (SAHNER et al., 2012) e redes de Petri estocásticas (SPN - Sigla proveniente do inglês *Stochastic Petri Net*) (GERMAN, 2000) em uma abordagem hierárquica (TRIVEDI et al., 2009). 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 a determinar quais componentes são mais importantes, considerando cada uma das infraestruturas, para a melhoria do nível de dependabilidade do sistema.

Nos últimos anos, muito tem sido feito para tratar com questões relacionadas à avaliação quantitativa da dependabilidade (AVIZIENIS et al., 2004) de sistemas computacionais. O trabalho proposto em (SILVA et al., 2015) apresenta o ambiente *Mercury* que possibilita a criação e avaliação de modelos em RBD, SPN e CTMC (sigla proveniente do inglês *Continuous Time Markov Chain*) (BOLCH et al., 2006) que podem ser utilizados para avaliação de dependabilidade. Particularmente, como relação a sistemas de *data centers*, o trabalho proposto em (CALLOU et al., 2013) avalia a métricas de dependabilidade, sustentabilidade e custos, associadas às infraestruturas de potência e de refrigeração, no contexto de projeto para estes sistemas. Com relação à dependabilidade, este estudo utiliza abordagem hierárquica considerando os mecanismos de modelagem SPN e RBD. Por sua vez, o trabalho em (GUIMARÃES et al., 2015) detalha uma metodologia adaptada junto com modelos analíticos em uma abordagem hierárquica para a escolha do melhor projeto da infraestrutura de comunicação de um sistema de *data center*. A pesquisa apresentada em (ROCHA et al., 2017) examinou a relação entre diferentes arquiteturas da infraestrutura de potência e a disponibilidade de aplicativos em um sistema de *data center* em *hiperescala*. Através da utilização do índice de *análise de sensibilidade* foram definidas quatro arquiteturas da infraestrutura de potência e então é analisado o impacto de possíveis falhas sobre aplicações hospedadas nestes sistemas. Para a representação do comportamento de falha da infraestrutura de potência foi utilizado o mecanismo de modelagem SPN ao passo que o mecanismo de modelagem RBD é utilizado para representar a disponibilidade das aplicações. O

trabalho em (GONÇALVES et al., 2017) propõe modelos escaláveis para avaliar o impacto de falhas do sistema de refrigeração sobre a disponibilidade do *data center*. Estes modelos são baseados no padrão *TIA-942* considerando os *Tiers* I e II. É utilizado o mecanismo de modelagem *SPN*.

Diferentemente das referências mencionadas que tratam apenas com as infraestruturas de potência e refrigeração, nossa pesquisa irá analisar aspectos de dependabilidade de sistemas de *data centers* integrando conjuntamente as infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração.

O resto deste artigo é organizado como segue. Seção 2 detalha modelos baseados nos mecanismos de modelagem *RBD* e *SPN* representando estruturas comumente utilizadas e adaptações de mecanismos de redundância largamente aplicados em projetos de sistemas. Seção 3 descreve a metodologia utilizada para a definição de diferentes níveis de redundância em qualquer uma das infraestruturas de um sistema de *data center* para análise de aspectos de dependabilidade. Seção 4 apresenta um estudo aonde foram analisados, de forma comparativa, diferentes níveis de disponibilidade proporcionados por diversas combinações das arquiteturas da infraestrutura de refrigeração, de potência e de comunicação de um sistema de *data center*. Finalmente, Seção 6 conclui o artigo e introduz ideias para trabalhos futuros.

## DISCUSSÃO TEÓRICA

### Modelos de Dependabilidade

Esta seção apresenta os modelos de dependabilidade utilizados em nosso estudo.

### Modelos RBD

As estruturas mais comumente utilizadas em infraestruturas de sistemas computacionais são série, paralelo e série-paralelo (OGGERINO, 2001). Figura 3 descreve três exemplos, aonde os blocos ( $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ ) são estruturados em série (ver Figura 3(a)), em paralelo (ver Figura 3(b)) e em série-paralelo (ver Figura 3(c)).

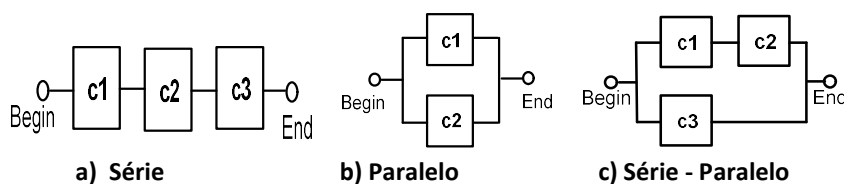


Figura 3: Estruturas Básicas.

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:

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

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:

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

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 os modelos de dependabilidade que utilizam o mecanismo de modelagem *SPN* e representam adaptações de mecanismos de redundância largamente utilizados em projetos de sistemas. Estas adaptações serão empregadas para proposição de diferentes arquiteturas das infraestruturas de refrigeração e de potência de um sistema de *data center*.

**Espera a Frio com Dois Componentes Ativos (EFDCA).** Figura 4 mostra o modelo *SPN* de dependabilidade que representa uma adaptação do mecanismo de redundância denominado de espera a frio (LEE et al., 1990). Este modelo será denominado de espera a frio com dois componentes ativos. As marcações nos lugares  $X_1\_ON$  e  $X_2\_ON$  (em nosso estudo, o rótulo  $X$  deve ser substituído de acordo com o nome do componente) representam os componentes principais nos estados ativo e operacional. Um módulo em espera, representado pela marcação no lugar *Espera\_X3*, deve ser inicializado em caso de falha em um dos componentes principais. Para representar a completa inicialização do módulo em espera, a marcação será conduzida do lugar *Espera\_X3*, através do disparo das transições  $t_0$  e *Inicializar*, para o lugar  $X_3\_ON$ . O parâmetro *MTTF* (sigla proveniente do inglês *Mean Time To Failure*) dos componentes, ativo e em espera, representa os atrasos associados às transições  $X_1\_F$ ,  $X_2\_F$  e  $X_3\_F$ . Por sua vez, o parâmetro *MTTR* (sigla proveniente do inglês *Mean Time To Repair*) destes componentes representa os atrasos associados às transições  $X_1\_R$ ,  $X_2\_R$  e  $X_3\_R$ . Por fim, as transições temporizadas possuem distribuições exponenciais (*exp*) e semântica de disparo do tipo *single server (ss)*. Tabela 1 contém os parâmetros utilizados nas transições imediatas que compõe este modelo. A disponibilidade é calculada através da expressão:  $P\{((\#X_1\_ON = 1 \text{ AND } \#X_2\_ON = 1) \text{ OR } (\#X_3\_ON = 1))\}$ .

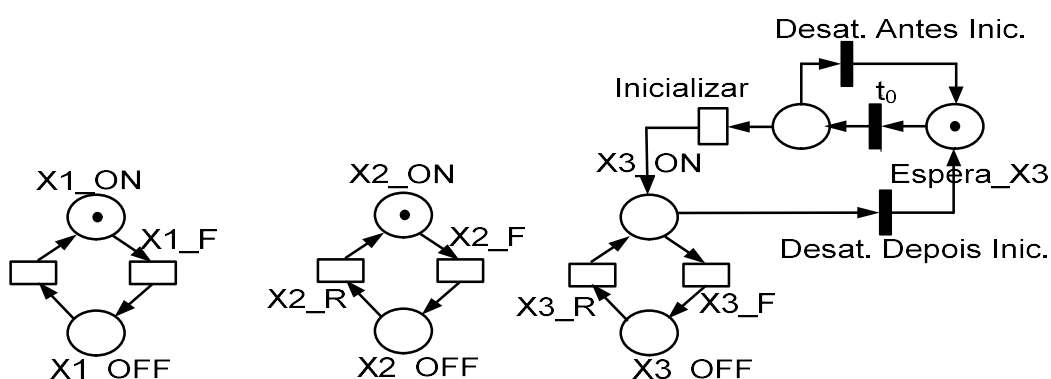


Figura 4: Modelo de Dependabilidade – Espera a Frio com Dois Componentes Ativos.

Tabela 1: Parâmetros Transições Imediatas – EFDCA.

Transição	Peso	Prioridade	Função de Guarda
DesatAntesInic	1	2	$((\#X_1\_ON=1)\text{AND}(\#X_2\_ON=1))$
DesatDepoisInic	1	3	$((\#X_1\_ON=1)\text{AND}(\#X_2\_ON=1))$
$t_0$	1	1	$((\#X_1\_ON=0)\text{OR}(\#X_2\_ON=0))$

**Modular com Reparo e Política de Reposição (MRPR).** Figura 5 (GUIMARÃES et al., 2020) mostra o modelo *SPN* de dependabilidade que representa uma adaptação do mecanismo de redundância denominado

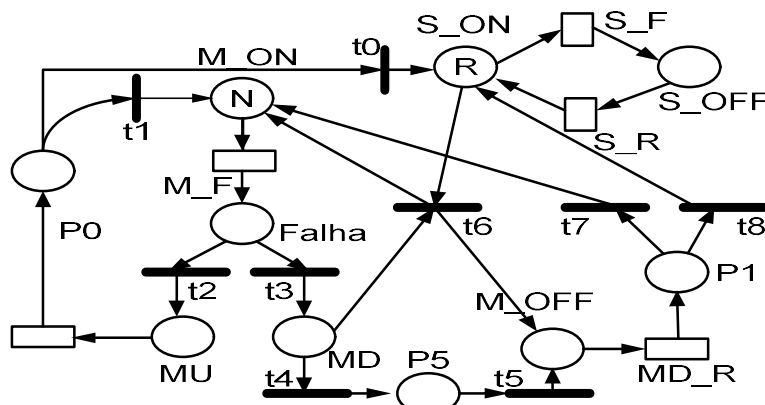
de modular (CHIANG et al., 1981) considerando reparo e política de reposição entre seus componentes. Este modelo pode assumir várias configurações de redundância a partir da definição dos valores de  $N$  (número de módulos ativos) e de  $R$  (número de módulos em espera).

As  $N$  marcações no lugar  $M\_ON$  representam o número de módulos ativos. O número de módulos em espera é representado por  $R$  no lugar  $S\_ON$ . Falhas detectadas e falhas não detectadas são representadas pelos lugares  $MD$  e  $MU$  respectivamente. Foram atribuídas probabilidade de ativação de 40% e 60% respectivamente às transições imediatas  $t_2$  e  $t_3$  (parâmetro peso na Tabela 2).

Transição  $MD\_R$  representa o tempo de reparo para falhas detectadas e a Transição  $MU\_R$  representa o tempo de detecção e reparo para falhas não detectadas de imediato. Com relação às falhas não detectadas, a Transição  $MU\_R$  tem um acréscimo de 50% do valor do  $MTTR$  em relação às falhas detectadas. A transição imediata  $t_0$  é ativada quando  $(\#S\_ON \leq (R-1) \text{ AND } \#M\_ON = N)$  e a transição  $t_1$  é ativada quando  $(\#M\_ON < N)$ . Para a ação de falha detectada, o módulo com defeito é substituído de imediato pelo módulo em espera quando houver módulos em espera disponíveis. Quando o módulo for reparado, a transição imediata  $t_7$  será ativada se  $(\#M\_ON < N)$  devolvendo assim a marcação para o lugar  $M\_ON$ . Se  $(\#S\_ON \leq (R-1) \text{ AND } (\#M\_ON = N))$  a transição imediata  $t_8$  será ativada e o módulo reparado será devolvido para o lugar  $S\_ON$ . Tabela 2 contém os parâmetros das principais transições imediatas deste modelo. A disponibilidade é calculada pela expressão  $P\{\#M\_ON = N\}$ , aonde  $N$  é o número de módulos ativos. Por fim, as transições temporizadas possuem distribuições exponenciais (*exp*) e semântica de disparo do tipo single server (*ss*).

**Tabela 2:** Parâmetros Transições Imediatas – MRPR.

Transição	Peso	Prioridade	Função de Guarda
t0	-	-	$(\#S\_ON \leq (R-1) \text{ AND } (\#M\_ON = N))$
t1	-	-	$\#M\_ON < N$
t2	0,4	-	-
t3	0,6	-	-
t4	-	-	$\#S\_ON = 0$
t7	-	-	$\#M\_ON < N$
t8	-	-	$(\#S\_ON \leq (R-1) \text{ AND } (\#M\_ON = N))$



**Figura 5:** Modelo de Dependabilidade - Modular com Reparo.

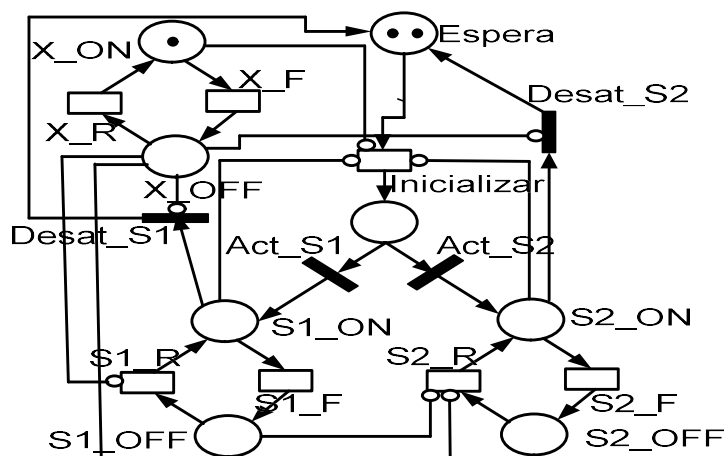
**Espera a Frio Dupla com Prioridade de Reparo (EFDPR).** Figura 6 (GUIMARÃES et al., 2020) mostra o modelo *SPN* que representa uma adaptação do mecanismo de redundância espera a frio (LEE et al., 1990)

considerando dois componentes em espera e prioridade de reparo. Este modelo será denominado de espera a frio dupla com prioridade de reparo. Neste modelo, a marcação no lugar  $X\_ON$  representa o componente principal no estado ativo e operacional. Dois módulos em espera, representados no lugar  $Espera$  podem ser utilizados em caso de falha do componente principal. Caso este componente falhe, em sua substituição será inicialmente ativado o módulo 1, representado pela marcação conduzida ao lugar  $S1\_ON$  pelo disparo das transições Inicializar e  $Act\_S1$ . Por sua vez, em caso de falha do componente principal e do módulo 1, será ativado o módulo 2, representado pela marcação conduzida ao lugar  $S2\_ON$  através do disparo das transições Inicializar e  $Act\_S2$ . Em caso de reparo do módulo principal, o estado inicial é reestabelecido. Isto é representado pelo disparo das transições imediatas  $Desat\_S1$  e  $Desat\_S2$ . O parâmetro  $MTTF$  dos componentes, ativo e em espera, representa os atrasos associados às transições  $S1\_F$ ,  $S2\_F$  e  $X\_F$ . Por sua vez, o parâmetro  $MTTR$  destes componentes representa os atrasos associados às transições  $S1\_R$ ,  $S2\_R$  e  $X\_R$ . As transições temporizadas possuem distribuições exponenciais (*exp*) e semântica de disparo do tipo single server (*ss*).

Tabela 3 contém os parâmetros associados às principais transições imediatas deste modelo. Por sua vez, em caso de falha do componente principal e dos módulos 1 e 2, a prioridade de reparo será do componente principal, do módulo 1 e do módulo 2 nesta ordem. Isto é representado neste modelo pelos arcos inibidores entre o lugar  $X\_OFF$  e as transições  $S1\_R$  e  $S2\_R$  e o arco inibidor entre o lugar  $S1\_OFF$  e a transição  $S2\_R$ . A disponibilidade é calculada pela expressão:  $P\{\#X\_ON=1 \text{ OR } \#S1\_ON=1 \text{ OR } \#S2\_ON=1\}$ .

**Tabela 3:** Parâmetros Transições Imediatas – EFDPR.

Transição	Prioridade	Peso	Função de Guarda
Act_S1	1	1	$\#S1\_ON=0 \text{ AND } \#S1\_OFF=0$
Act_S2	1	1	$\#S1\_OFF=1$



**Figura 6:** Modelo de Dependabilidade – Espera a Frio Dupla com Prioridade de Reparo.

**Espera a Frio Dupla com Prioridade de Reparo e  $N$  Componentes Ativos (EFDPRNCA).** Figura 7 mostra o modelo *SPN* que representa uma adaptação do mecanismo de redundância espera a frio (LEE et al., 1990) considerando  $N$  componentes ativos e dois componentes em espera com prioridade de reparo entre estes. Neste modelo, as marcações nos lugares  $X_i\_ON$  (o rótulo  $X_i$ , aonde  $i$  varia de 1 a  $N$ , deve ser substituído de acordo com o nome do componente) e  $S_t\_ON$ , aonde  $t$  assume os valores 1 e 2, representam os

componentes  $X_i$  e  $S_i$  no estado ativo e operacional. Por sua vez, a marcação nos lugares  $X_{i\_OFF}$  e  $S_{t\_OFF}$  representam os componentes  $X_i$  e  $S_i$  no estado de inatividade. O parâmetro  $MTTF$  de cada componente, ativo ou em espera, representa os atrasos associados às transições  $X_{i\_F}$ ,  $S_{1\_F}$  e  $S_{2\_F}$ . Por sua vez, o parâmetro  $MTTR$  destes componentes representa os atrasos associados às transições  $X_{i\_R}$ ,  $S_{1\_R}$  e  $S_{2\_R}$ .

Neste modelo, se um dos componentes ativos,  $X_1$  a  $X_N$ , falhar, este será substituído inicialmente pelo componente em espera  $S_1$ . Finalmente, caso um segundo componente ativo falhe, este será substituído pelo componente em espera  $S_2$ . A ordem de inicialização dos componentes em espera é definida pelas funções de guarda definidas nas transições imediatas  $t_1$  e  $t_2$  e são mostradas da Tabela 4. Por outro lado, as transições imediatas  $Desat\_S_1$  e  $Desat\_S_2$  representam respectivamente o retorno aos estados iniciais dos componentes em espera  $S_1$  e  $S_2$ . Este retorno será em ordem inversa à inicialização destes componentes, ou seja, primeiro retorna o componente  $S_2$  e então retorna o componente  $S_1$ . O parâmetro  $MTTF$  dos componentes, ativo ou em espera, representa os atrasos associados às transições  $X_{i\_F}$ ,  $S_{1\_F}$  e  $S_{2\_F}$ . Por sua vez, o parâmetro  $MTTR$  destes componentes representa os atrasos associados às transições  $X_{i\_R}$ ,  $S_{1\_R}$  e  $S_{2\_R}$ . As transições temporizadas possuem distribuições exponenciais (*exp*) e semântica de disparo do tipo single server (*ss*). Os parâmetros definidos para as transições imediatas são mostrados da Tabela 4.

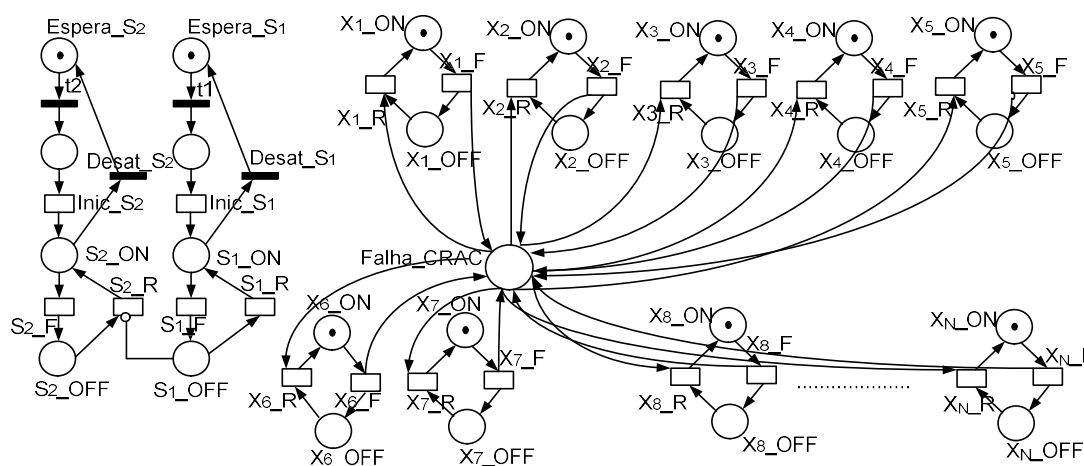


Figura 7: Modelo de Dependabilidade – Espera a Frio Dupla com Prioridade de Reparo e  $N$  Componentes Ativos.

Tabela 4: Parâmetros Transições Imediatas – EFDPRNCA.

Transição	Prioridade	Peso	Função de Guarda
$t_1$	3	1	((#Falha_CRAC=1) OR (#S2_OFF = 1))
$t_2$	5	1	((#Falha_CRAC=2) OR (#S1_OFF = 1))
$Desat\_S_1$	6	1	(#Falha_CRAC=0)
$Desat\_S_2$	4	1	((#Falha_CRAC=1) AND (#S1_ON = 1)) OR (#Falha_CRAC=0)

## METODOLOGIA

Esta seção detalhada a metodologia concebida para uma análise dos níveis de disponibilidade obtidos considerando um sistema de *data center* em função de diversas combinações de mecanismos de redundância em suas infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração. Nossa abordagem consiste de oito atividades (ver Figura 8): *entendimento do problema*; *obtenção de informações*; *cálculo importância para disponibilidade*; *definição arquiteturas redundantes*; *criação de modelos*; *validação de modelos*; *avaliação de*



cenários; interpretação dos resultados.

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.

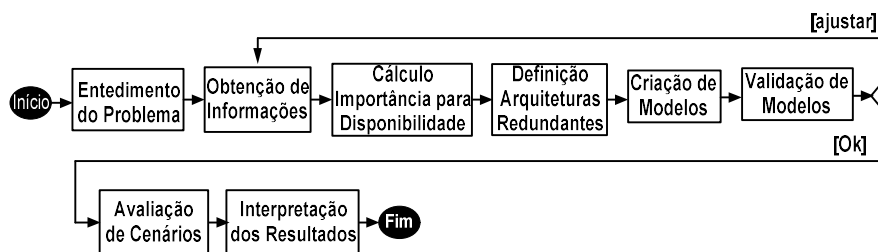


Figura 8: Metodologia Proposta.

A segunda atividade, Obtenção de Informações, trata a respeito da obtenção de informações para os modelos de dependabilidade. Estas informações são oriundas tanto dos fabricantes dos componentes a serem considerados no processo de modelagem, a exemplo do *MTTF*, como das empresas responsáveis pelas políticas de reparo, tal como o *MTTR*. Foram também utilizadas informações obtidas a partir de estudos científicos relacionados.

A terceira atividade é referente ao cálculo do índice de importância para disponibilidade (BARABADY et al., 2007) dos componentes em cada uma das infraestruturas. Equação 3 abaixo define o índice de importância para disponibilidade (BARABADY et al., 2007):

$$A_s = \frac{\partial A_s}{\partial A_i} \quad (3)$$

Onde,  $A_s$  é a disponibilidade do sistema, e  $A_i$  é a disponibilidade 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 do sistema. Para um sistema em série, o valor de  $A_s$  é obtido através das Equação 1. Por sua vez, para um sistema em paralelo, o valor de  $A_s$  é obtido através das Equação 2. Por fim, a disponibilidade do componente  $i$  com dois estados é obtida através da fórmula abaixo definida em (BARABADY et al., 2007):

$$A_i = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR} \quad (4)$$

A quarta atividade corresponde à definição de arquiteturas redundantes associadas às infraestruturas de um sistema de *data center*. Arquiteturas distintas serão caracterizadas por diferentes técnicas de redundância, junto com suas adaptações, 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 sobre a disponibilidade do sistema.

A quinta atividade refere-se à criação de modelos para o sistema analisado considerando os diferentes mecanismos de redundância em suas infraestruturas. Com relação aos modelos de disponibilidade, as características do sistema, mecanismos de redundância, nível de interação entre os componentes e políticas de manutenção tratadas irão determinar se iremos utilizar *SPN*, *RBD* ou uma abordagem hierárquica utilizando ambos mecanismos de modelagem. Para a construção dos modelos será

utilizada a ferramenta *Mercury* (SILVA et al., 2015).

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).

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. O fim desta fase é alcançado quando cada modelo proporciona resultados com exatidão apropriada.

Na próxima atividade a avaliação de diferentes cenários poderá ser executada. As métricas de interesse podem ser classificadas em duas classes: métricas transientes e métricas estacionárias. Métricas transientes são dependentes do tempo. Por sua vez, métricas estacionárias não dependem de qualquer instante de tempo. Finalmente, os resultados obtidos irão ser interpretados e explicados através da adoção de um vocabulário apropriado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nosso estudo de caso tem por objetivo realizar uma análise comparativa referente ao impacto causado à disponibilidade de um sistema de *data center* através da composição de diferentes mecanismos de redundância em suas infraestruturas. Serão propostas quatro arquiteturas ( $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ ) caracterizadas por diferentes níveis de redundância entre os componentes das infraestruturas de potência e de refrigeração, considerando uma infraestrutura de comunicação proposta em (GUIMARÃES et al., 2020).

A infraestrutura de comunicação utilizada nas quatro arquiteturas propostas é mostrada na Figura 9. Esta infraestrutura adota uma arquitetura com três camadas: núcleo, distribuição e acesso. Cada uma das camadas foi estruturada de forma completamente redundante. As camadas de núcleo e de distribuição adotam o mecanismo de redundância de espera morna (KUO et al., 2003) entre seus componentes.

Particularmente na camada de acesso, a redundância proporcionada pelos *switches* funciona da seguinte maneira: o *switch* de acesso S1.2 proporciona redundância ao *switch* de acesso S1.1; o *switch* de acesso S1.3 proporciona redundância ao *switch* de acesso S1.2; continuando nesta ordem, o *switch* de acesso 1.52 proporciona redundância ao *switch* de acesso S1.51 e o *switch* de acesso S1.1 proporciona redundância

ao switch de acesso S1.52.

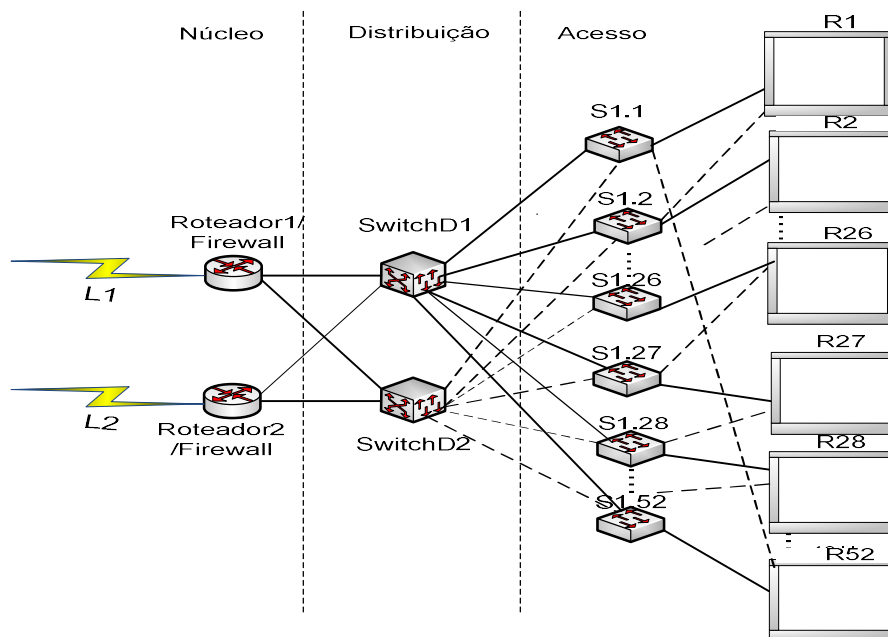


Figura 9: Infraestrutura de Comunicação.

Além disso, cada um dos racks contém dez (10) servidores e cada servidor possui uma completa redundância em relação ao correspondente servidor no próximo rack na sequência, ou seja, o primeiro servidor do rack R1 é completamente redundante com o primeiro servidor do próximo rack, R2; o segundo servidor do rack R1 é completamente redundante com o segundo servidor do rack R2. Esta mesma sequência vale para os servidores dos racks R3 e rack R4, rack R5 e rack R6, e assim por diante.

Figura 10(a) detalha os componentes da infraestrutura de refrigeração. Esta infraestrutura é composta basicamente por vários CRACs, resfriadores 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.

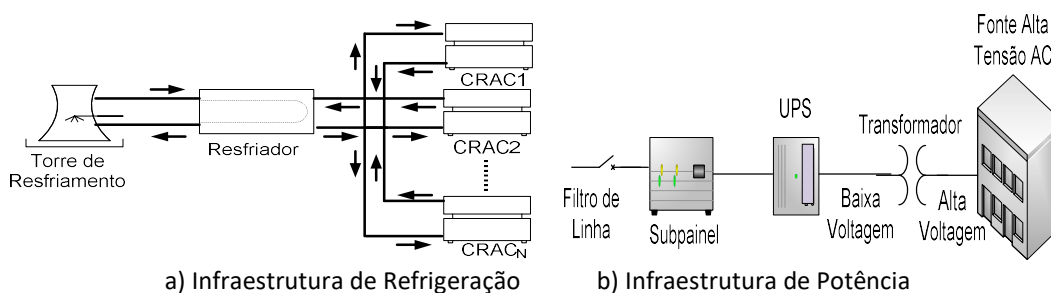


Figura 10: Infraestruturas de Potência e de Refrigeração.

Por sua vez, os componentes fundamentais que compõe a infraestrutura de potência são mostrados na Figura 10(b). A fonte de alta tensão AC fornece a energia necessária a partir de uma empresa concessionária de energia elétrica. Esta energia passa pelo transformador, transformando-se em energia com baixo nível de tensão. Por sua vez, o UPS (sigla proveniente do inglês *Uninterruptible Power Supply*), que possui um banco de baterias, proporciona energia aos subpainéis e filtros de linha que repassa aos demais

componentes conectados. Em caso de queda da *fonte de alta tensão AC*, o *UPS* pode fornecer energia sob boas condições (MARWAH et al., 2009) ou, alternativamente, a energia pode ser gerada localmente, por meio de *geradores* ou fontes de energia alternativa.

Considerando a infraestrutura de comunicação descrita acima, será necessário o cálculo do número de *CRACs* utilizado na infraestrutura de refrigeração em todas as arquiteturas que serão analisadas. Inicialmente, será calculado a quantidade de *BTUs* (sigla proveniente do inglês *British Thermal Unit*) necessária para proporcionar suporte para uma refrigeração adequada à infraestrutura de comunicação descrita considerando sua potência instalada (em *watts*). Através da ferramenta *Power Advisor* foi então calculado a necessidade de 312.000 *BTUs* que estarão distribuídos em vinte e seis (26) *CRACs*.

Tabela 5 mostra os parâmetros de dependabilidade (*MTTF* e *MTTR*) relacionados aos componentes das infraestruturas de comunicação, refrigeração e de potências que serão utilizados nos seus respectivos modelos de dependabilidade. Estes parâmetros foram obtidos em [13, 19, 23].

**Tabela 5:** Parâmetros de Entrada – Modelos de Dependabilidade.

Componente	MTTF	MTTR	Componente	MTTF	MTTR
Roteador <sub>x</sub> Firewall	12.181h	0,52h	SwitchAcesso <sub>xx</sub>	9.090h	0,64h
Enlace (L <sub>1</sub> ,L <sub>2</sub> )	1.332h	4,00h	Servidor	1.414h	0,99h
SwitchD <sub>x</sub> BalCarga	12.181h	0,52h	Torre de Refrigeração	24.816h	48,00h
CRAC	37.059h	8,00h	Resfriador	18.000h	48,00h
Fonte Alta Tensão AC	4.380h	8,00h	Transformador	282.581h	8,00h
UPS	50.000	8,00h	Subpainel	304.000	8,00h

Seguindo os passos da metodologia proposta, Tabela 6 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 às infraestruturas de um sistema de *data center*. Com relação à infraestrutura de potência, pode-se verificar que o componente *fonte de alta tensão AC* possui o maior índice de importância para disponibilidade, sendo seguido pelos componentes *UPS*, *transformador* e *subpainel*. Por sua vez, verifica-se que na 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 redundância de componentes acontece com o componente *torre de refrigeração* pois se trata de um componente de custo elevado.

**Tabela 6:** Valores Importância para Disponibilidade.

Componente	Impot. Para Disponib.	Componente	Import. Para Disponib.
Resfriador	1,00	Torre de Refrigeração	0,999269
CRAC	0,997555	Fonte Alta Tensão AC	1,00
UPS	0,998336	Transformador	0,998205
Subpainel	0,998203	-	-

Para a elaboração das quatro arquiteturas será considerado um nível de redundância crescente. Inicialmente, Arquitetura *A<sub>0</sub>* não possui redundância entre os componentes ativos das infraestruturas de refrigeração e de potência. A Arquitetura *A<sub>1</sub>* apresenta um maior nível de redundância através do mecanismo de *espera a frio com dois componentes ativos* (ver Figura 4) entre os componentes *fonte de tensão AC*,

transformador e gerador da infraestrutura de potência e do mecanismo de *espera a frio* entre os *resfriadores* da infraestrutura de refrigeração. O modelo *SPN* de dependabilidade que representa o mecanismo de redundância *espera a frio* foi proposto em (GUIMARÃES et al., 2015). Com relação à arquitetura  $A_2$ , ocorreu um incremento no nível de redundância tanto da infraestrutura de refrigeração como na infraestrutura de potência. A infraestrutura de refrigeração adotou os mecanismos de redundância *espera a frio dupla com prioridade de reparo* (ver Figura 6) entre os *resfriadores* e *modular com reparo e política de reposição* (ver Figura 5) entre os *CRACs* ativos e seus componentes em espera. Por sua vez, a infraestrutura de potência adotou o mecanismo de redundância *espera a frio* entre os *transformadores* (ativo e em espera) e entre os *UPSs* (ativo e em espera). Já a redundância entre os componentes *fonte alta tensão AC* e *gerador* é proporcionada pelo mecanismo *espera a frio dupla com prioridade de reparo*. Por fim, a Arquitetura  $A_3$  apresenta o maior nível de redundância. A infraestrutura de refrigeração adotou o mecanismo de *espera a frio dupla com prioridade de reparo* para redundância entre *resfriadores* e o de *espera a frio dupla com prioridade de reparo e N componentes ativos* (ver Figura 7) para redundância entre os *CRACs*. Com relação à infraestrutura de potência, é adotado o mecanismo *espera a frio dupla com prioridade de reparo* para a redundância entre os componentes *fonte alta tensão AC* e *gerador* assim como para a redundância entre os *UPSs*. Com relação à redundância entre os *transformadores* e entre *subpainéis* é utilizado o mecanismo de redundância *espera a frio*.

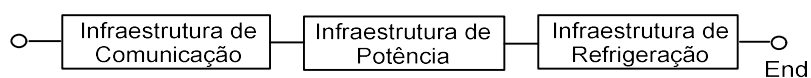


Figura 11: Modelo RBD de Dependabilidade - Infraestrutura de Comunicação.

Inicialmente, Figura 11 mostra o modelo hierárquico de dependabilidade do sistema de *data center*. Cada bloco representa o correspondente modelo de dependabilidade das infraestruturas de comunicação (ver Figura 9), de potência (ver Figura 10(a)) e de refrigeração (ver Figura 10(a)). O modelo *RBD* de dependabilidade que representa o bloco da infraestrutura de comunicação utilizada nas quatro arquiteturas propostas ( $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ ) é mostrado na Figura 12. Os enlaces de fibra e *UTP* (sigla proveniente do inglês *Unshielded Twisted Pair*), que interconectam os *roteadores*, *switches* e servidores, não foram considerados no processo de modelagem desta infraestrutura. Por sua vez, os modelos que representam os blocos das infraestruturas de potência e de refrigeração serão detalhados adiante e irão variar em função das arquiteturas consideradas.

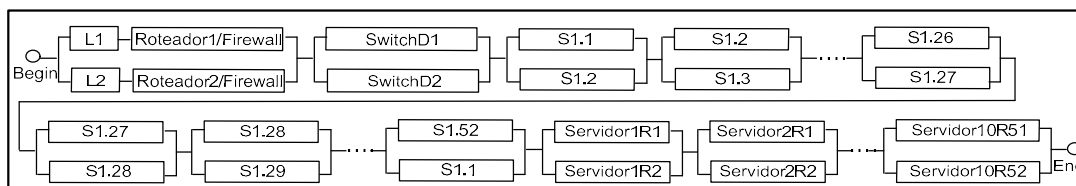
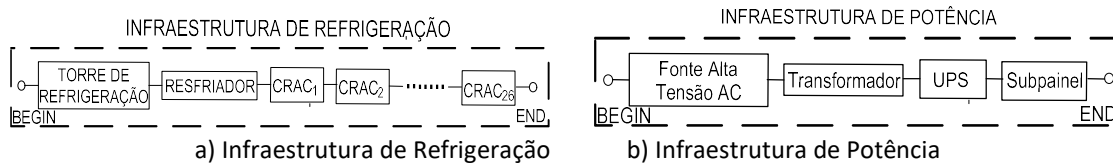


Figura 12: Modelo RBD de Dependabilidade - Infraestrutura de Comunicação.

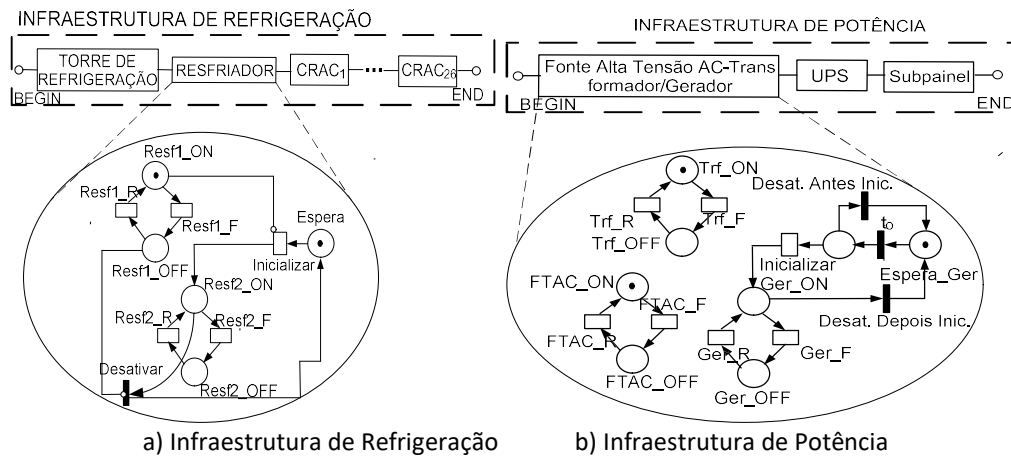
Com relação à primeira arquitetura ( $A_0$ ), Figura 13(a) mostra o modelo *RBD* de dependabilidade da

infraestrutura de refrigeração. Os principais componentes desta infraestrutura são representados pelos blocos *torre de refrigeração*, *resfriador* e vinte e seis (26) blocos representando cada unidade de *CRAC*. Por sua vez, Figura 13(b) mostra o modelo *RBD* de dependabilidade da infraestrutura de potência. Os principais componentes desta infraestrutura são representados pelos blocos *fonte alta tensão AC*, *transformador*, *UPS* e *subpainel*.



**Figura 13:** Modelos RBD de Dependabilidade – Arquitetura A<sub>0</sub>.

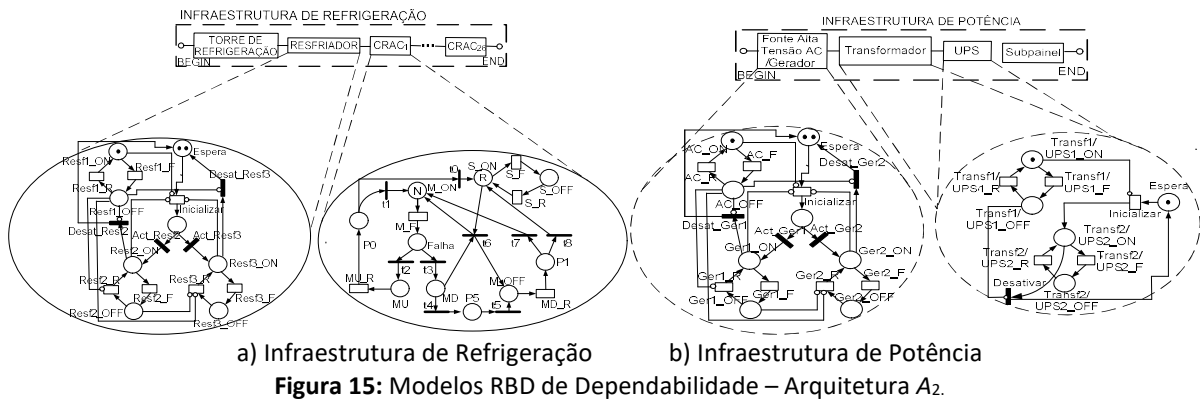
Figura 14 mostra os modelos hierárquicos de dependabilidade das infraestruturas de refrigeração (ver Figura 14(a)) e de potência (ver Figura 14(b)) da Arquitetura A<sub>1</sub>. Nestes modelos, o nível superior utiliza o mecanismo de modelagem *RBD*, aonde cada componente da infraestrutura é modelado como um bloco, e os modelos do nível mais baixo são do tipo *SPN* que representam as relações de redundância entre os componentes conforme descrito na definição desta arquitetura.



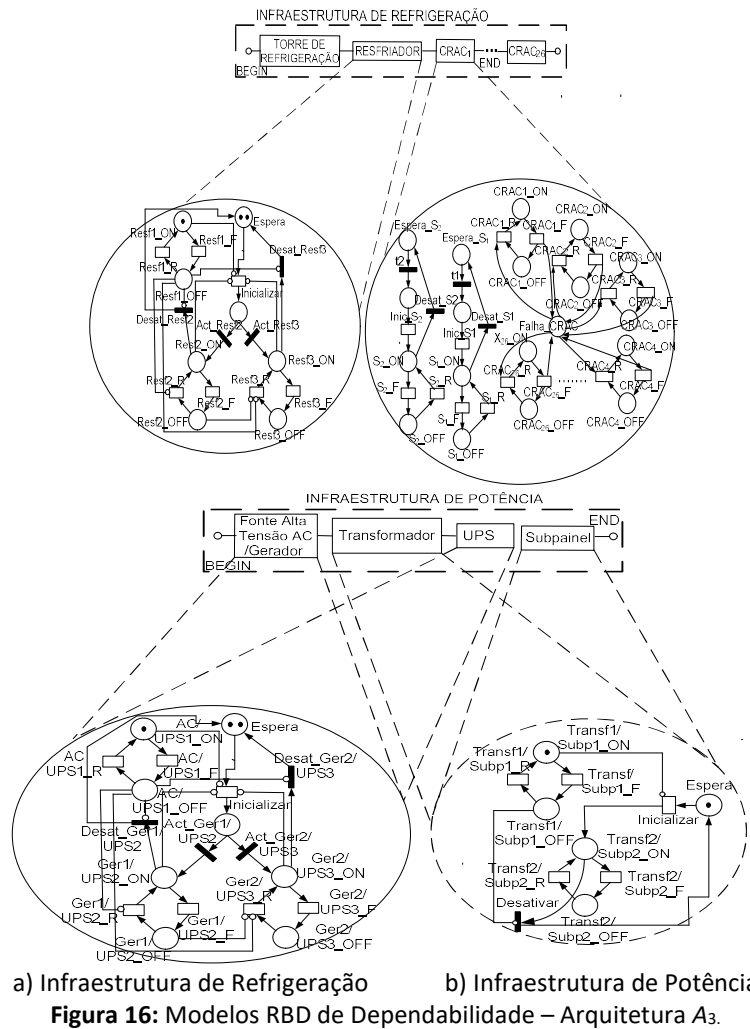
**Figura 14:** Modelos RBD de Dependabilidade – Arquitetura A<sub>1</sub>.

Figura 15 mostra os modelos hierárquicos de dependabilidade das infraestruturas de refrigeração (ver Figura 15(a)) e de potência (ver Figura 15(b)) da Arquitetura A<sub>2</sub>. O nível superior apresenta um modelo *RBD*, aonde cada componente da infraestrutura é modelado como um bloco, e os modelos do nível mais baixo são do tipo *SPN* que representam as relações entre os componentes redundantes conforme descrito na definição desta arquitetura.

Finalmente, Figura 16 mostra os modelos hierárquicos de dependabilidade das infraestruturas de refrigeração (ver Figura 16(a)) e de potência (ver Figura 16(b)) da Arquitetura A<sub>3</sub>. O nível superior apresenta um modelo *RBD*, aonde cada componente da infraestrutura é modelado como um bloco, e os modelos do nível mais baixo são do tipo *SPN* que representam as relações entre os componentes redundantes conforme definição desta arquitetura.

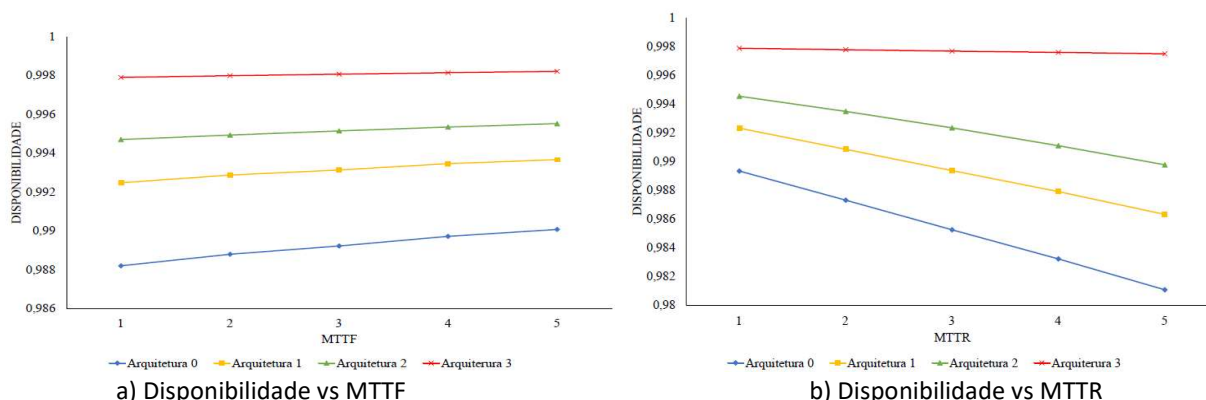


Após a definição dos modelos de dependabilidade de cada uma das arquiteturas propostas, estes serão utilizados para construir gráficos relacionando às variações de disponibilidade do sistema de *data center* em função da variação dos valores de *MTTF* e de *MTTR* de seus componentes.



Inicialmente, Figura 17(a) mostra a variação da disponibilidade do sistema em função do *MTTF* de seus componentes levando-se em conta as quatro arquiteturas propostas caracterizadas por diferentes níveis de redundância. Cada valor mostrado no eixo das abscissas corresponde a um cenário com valores pré-definidos de *MTTF* relacionados aos diferentes componentes do sistema. Tabela 7 detalha estes cenários. Conforme esperado, os valores da disponibilidade do sistema aumentam em função do aumento dos valores

de *MTTF* dos componentes em cada uma das arquiteturas propostas. Particularmente, Arquitetura  $A_0$  apresenta um aumento mais expressivo da disponibilidade em virtude da ausência de redundância entre os componentes das infraestruturas de refrigeração e de potência.



**Figura 17:** Mostra a variação da disponibilidade do sistema de data center em função do *MTTR* de seus componentes.

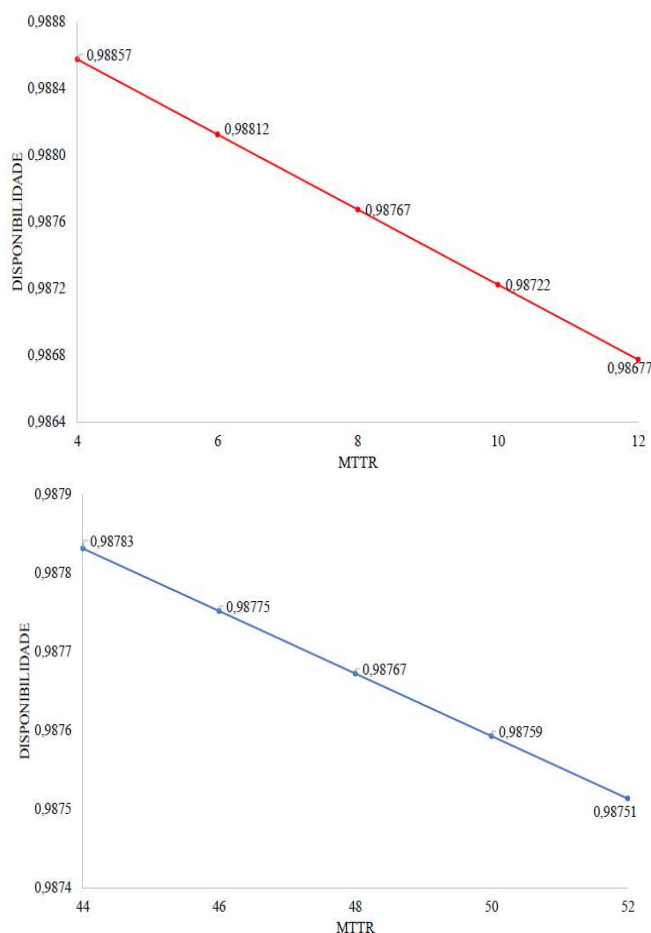
Figura 17(b) mostra a variação da disponibilidade do sistema de *data center* em função do *MTTR* de seus componentes levando-se em consideração as quatro arquiteturas propostas. De forma semelhante ao gráfico anterior, cada valor mostrado no eixo das abscissas corresponde a cenários com valores pré-definidos de *MTTR* relacionados aos diferentes componentes do sistema. Tabela 8 detalha estes cenários. Devido ao alto nível de redundância, a disponibilidade da Arquitetura  $A_3$  é menos sensível à variação do *MTTR* em seus componentes. Ao contrário, a disponibilidade da Arquitetura  $A_0$  é mais sensível à variação dos valores de *MTTR* de seus componentes.

**Tabela 7:** Cenários para Análise da Disponibilidade em Função do *MTTF*.

Cenário	Infr. Refrigeração – <i>MTTF</i> (h)			Infr. Potência – <i>MTTF</i> (h)				
	T. de Refrigeração	Resfriador	CRAC	F. Alta Tensão AC	Transformador	UPS	Subpainel	Gerador
1	22.816	16.000	35.057	4.380	753.201	240.000	1.420.000	240.000
2	24.816	18.000	37.057	4.599	763.201	250.000	1.520.000	250.000
3	26.816	20.000	39.057	4.818	773.201	260.000	1.620.000	260.000
4	28.816	22.000	41.057	5.037	783.201	280.000	1.720.000	280.000
5	30.816	24.000	43.057	5.256	793.201	290.000	1.820.000	290.000

Por fim, Figuras 18(a) e 18(b) detalham a variação da disponibilidade do sistema de *data center* em função do *MTTR* dos componentes *fonte de alta tensão AC* e *resfriador*. Estes componentes foram escolhidos por apresentarem os maiores valores do índice de importância para disponibilidade em suas respectivas infraestruturas conforme mostrado na Tabela 6. Particularmente, Figura 18(a) mostra a variação do *MTTR* do componente *fonte de alta tensão AC* e seu impacto sobre a disponibilidade de todo sistema considerando a Arquitetura  $A_0$ . Por fim, Figura 18(b) mostra a variação do *MTTR* do componente resfriador e seu impacto sobre a disponibilidade do sistema também considerando a Arquitetura  $A_0$ . Como exemplo, se o *MTTR* do componente *fonte de alta tensão AC* é alterado de 4h para 8h, o *downtime* do sistema passa de 100,13h para 108,01h. Desta maneira, políticas de manutenção que priorizem componentes com valores mais altos de importância para confiabilidade devem ser adotadas.





a) Disponibilidade Sistema vs MTTR Fonte Alta Tensão AC (b) Disponibilidade Sistema vs MTTR Resfriador

**Figura 18:** A variação do MTTR do componente fonte de alta tensão AC e seu impacto sobre a disponibilidade de todo sistema.

**Tabela 8:** Cenários para Análise da Disponibilidade em Função do MTTR.

Cenário	Infr. Refrigeração – MTTR (h)			Infr. Potência – MTTR (h)				
	T. de Refrigeração	Resfriador	CRAC	F. Alta Tensão AC	Transformador	UPS	Subpainel	Gerador
1	46	46	8	2	2	2	2	2
2	48	48	10	4	4	4	4	4
3	50	50	12	6	6	6	6	6
4	52	52	14	8	8	8	8	8
5	54	54	16	10	10	10	10	10

## CONCLUSÕES

Nosso trabalho propôs modelos analíticos, baseados nos mecanismos de modelagem *RBD* e *SPN* em uma abordagem hierárquica, a fim de proporcionar dados substanciais para um melhor entendimento relacionado a questões de dependabilidade de sistemas de *data centers*. Foram realizadas análises, de forma comparativa, da disponibilidade destes sistemas considerando de maneira integrada as infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração.

Mecanismos de redundância foram propostos para os componentes ativos das infraestruturas de potência e de refrigeração, considerando uma infraestrutura de comunicação proposta. Estes mecanismos de redundância foram estruturados em quatro arquiteturas ( $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ ) que são caracterizadas por níveis crescentes de redundância entre seus componentes. A determinação de quais componentes ativos terão

inicialmente o emprego de mecanismos de redundância irá ser estabelecido pelo índice de importância para disponibilidade. Algumas conclusões podem ser obtidas dos resultados deste estudo.

Primeiro, alguns componentes do sistema que possuem um maior índice de importância para disponibilidade impactam de forma mais significativa sobre a disponibilidade de sua infraestrutura e como consequência, sobre a disponibilidade do sistema. Desta forma, estes componentes precisam de maior atenção para a alocação de mecanismos de redundância de maneira a ocasionar um maior impacto sobre a disponibilidade destes sistemas. Os custos decorrentes da adoção destes mecanismos podem ser compensados pela alta disponibilidade obtida nas infraestruturas dos sistemas de *data centers*. Segundo, combinações dos mecanismos de redundância propostos para as infraestruturas nas diversas arquiteturas acarretou graus diferenciados de dependências relativas ao tempo de reparo dos componentes ativos destes sistemas. Terceiro, vale salientar que os modelos *SPN* de redundância propostos, representando adaptações de mecanismos largamente utilizados, são genéricos o bastante para serem utilizados em diferentes sistemas. Finalmente, para ilustrar a aplicabilidade dos resultados obtidos, um estudo foi realizado destacando o grau de dependência entre as diferentes arquiteturas de um sistema de *data center* relacionado a aspectos de dependabilidade.

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 dependabilidade das infraestruturas de comunicação, de potência e de refrigeração.

## 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.

BOLCH, G.; GREINER, S.; 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.

CALLOU, G.; MACIEL, P.; TUTSCH, D.; ARAÚJO, C.; SOUZA, R.. Estimating sustainability impact of high dependable data centers: a comparative study between Brazilian and us energy mixes. **Springer Computing Journal**, v.95, p.1137-

1170, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00607-013-0328-y>

CHIANG, D. T.; NIU, S.. Reliability of consecutive-k-out-of-n: F-system. **IEEE Transactions on Reliability**, v.R30, n.1, p.87-89, 1981. DOI: <http://doi.org/10.1109/TR.1981.5220981>

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.

GONÇALVES, G.; ROSENDO, D.; SANTOS, G. L.; KELNER, J.; SADOK, D.; GOMES, D. M.; ENDO, P. T.; MAHLOO, M.. Evaluating the cooling subsystem availability on a cloud data center. **IEEE Symposium on Computers and Communications**, p.736-741, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1109/ISCC.2017.8024615>

GUIMARÃES, A. P.; SILVA, A. P.. Análise de Aspectos de Dependabilidade em Infraestruturas de Data Centers Considerando Variação de Temperatura e Diferentes Mecanismos de Redundância. **Revista Brasileira de Administração Científica**, v.11, n.3, 2020.

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.

KUO, W.; ZUO, M. J.. **Optimal reliability modeling: Principles and applications**. 2003.

LEE, P. A.; ANDERSON, T.. **Fault tolerance: principles and practice**. 2 ed. Prentice-Hall, 1990.

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>

MARWAH, M.; SHARMA, R.; SHIH, R.; PATEL, C.; BHATIA, V.; MEKANAPURATH, M.; VELUMANI, R.; VELAYUDHAN, S.. Data analysis, visualization and knowledge discovery in sustainable data centers. In: BANGALORE ANNUAL COMPUTE CONFERENCE, 2. **Anais**. 2009. p.18.

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

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

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

ROCHA, E.; ENDO, P. T.; LEONI, G.; BRAGA, J.; LYNN, T.. Analyzing the impact of power infrastructure failures on cloud application availability. **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, p.1746-1751, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1109/SMC.2017.8122868>

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. **Anais**, 2015.

TRIVEDI, K. S.; KIM, D. S.; ROY, A.; MEDHI, D.. Dependability and security models. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON DESIGN OF RELIABLE COMMUNICATION NETWORKS, 7. **Anais**. 2009. p.11-20. DOI: <http://doi.org/10.1109/DRCN.2009.5340029>

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. 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 sob coordenação da **Sustenere Publishing**, 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.