

Dimensioning the relationship between availability and data center energy flow metrics

Dimensionando a relação da disponibilidade com as métricas de fluxo energético de *data centers*

Thiago Valentim Bezerra¹, Wenderson de Souza Leonardo¹, Gabriel Alves de Albuquerque Júnior¹, Gustavo Rau de Almeida Callou^{1*}

Abstract: The advancement of technology and the growing number of applications available to network users have increased the demand for services hosted in cloud environments. In 2020, more than 4 billion of people access these services through the Internet, a value 7% higher in comparison to the same period in 2019. To support the demand for such services, an environment that provides such conditions for applications available whenever needed has grown in importance. These environments are generally available from large data centers, which consume large amounts of electricity to provide such demand service capacity. In this context, this work proposes an integrated and dynamic strategy that demonstrates the impact of the availability on the energy consumption of the devices that compose the data center system architecture. In order to accomplish this, colored Petri net models were proposed for quantifying the cost, environmental impact and availability of the electric energy infrastructure of data centers. The models presented in this work are supported by the developed prototype. Two case studies illustrate the applicability of the proposed models and strategy. Significant results were obtained, showing an increase close to 100% in the system availability, with practically the same operational cost and environmental impact.

Keywords: Availability — Data centers — Energy flow model — Colored Petri nets

Resumo: Com o avanço da tecnologia e com uma maior quantidade de aplicações disponibilizadas para os usuários da rede, cresceu a procura por serviços hospedados em ambientes de nuvens. Sabe-se, por exemplo, que em janeiro de 2020, mais de 4 bilhões de pessoas fizeram acessos diários a estes serviços por meio da *Internet*, valor 7% maior comparado com o mesmo período de 2019. Para suportar tais serviços, é necessário um ambiente que forneça as condições para que as aplicações estejam sempre disponíveis. Geralmente, esses ambientes são disponibilizados por grandes *data centers*, os quais consomem grandes quantidades de energia elétrica para fornecer essa maior capacidade de serviços. Nesse contexto, este trabalho propõe uma estratégia integrada e dinâmica, que demonstra o impacto da disponibilidade dos equipamentos que compõem a arquitetura de *data centers* no consumo energético. Para isso, modelos em redes de Petri coloridas foram propostos para quantificação do custo, impacto ambiental e disponibilidade da infraestrutura de energia elétrica dos *data centers* em análise. Os modelos apresentados neste trabalho têm o suporte do protótipo ferramental desenvolvido. Dois estudos de caso foram propostos para mostrar a aplicabilidade dos modelos e da estratégia proposta. Resultados significativos foram obtidos, mostrando um aumento na disponibilidade do sistema de 100%, com praticamente o mesmo custo operacional e o mesmo impacto ambiental.

Palavras-Chave: Disponibilidade — Centro de dados — Modelo de fluxo de energia — Redes de Petri coloridas

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, Pernambuco, Brazil

*Corresponding author: gustavo.callou@ufrpe.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.22456/2175-2745.107176> • Received: 01/09/2020 • Accepted: 23/10/2020

CC BY-NC-ND 4.0 - This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

1. Introdução

Com a crescente demanda por serviços hospedados em ambientes de nuvens e com um aumento de usuários com acesso a *Internet*, foi necessário que os *data centers* aumentassem sua

capacidade de fornecimento e manutenção de aplicações, que são oferecidas para os usuários. Por exemplo, o número de pessoas em todo o mundo que acessaram a *Internet* cresceu para 4,54 bilhões em janeiro de 2020, um aumento de 7% (298

milhões de novos usuários) em comparação com o mesmo período de 2019 [1].

Os usuários da grande rede estão adotando novas tecnologias para atender suas necessidades, visto que um dos principais benefícios das tecnologias é a grande capacidade de processar os dados de forma rápida, o que exige que os sistemas tenham um maior espaço de armazenamento de informações [2]. A forma rápida da crescente utilização da computação em nuvem, ocorreu devido a possibilidade de disponibilizar infraestrutura sob demanda, utilizando serviços que não dependem de terceiros, como também, a capacidade de acessar recursos sem a necessidade de interação entre as empresas e o usuário [3, 4]. Para que tais serviços fornecidos pela computação em nuvem alcançassem, hoje, um nível de disponibilidade aceitável, foi necessário que eles adotassem estratégias redundantes de componentes. Contudo, o acréscimo de equipamentos para aumentar a disponibilidade e melhorar os serviços oferecidos, podem impactar diretamente na sustentabilidade.

Os *data centers* não são construídos apenas por componentes de TI, mas também por toda a infraestrutura de energia e refrigeração, que consomem uma parte significativa de energia. Estudos apontam que 34% do consumo total de energia é utilizado para manter o ambiente resfriado [5]. Os *data centers* podem ser divididos em infraestruturas de TI (tecnologia de informação), refrigeração e energia. O foco deste artigo está na infraestrutura de energia. O fluxo energético vem das concessionárias de energia elétrica através do transformador, chegando ao *no-break* através dos painéis de energia elétrica. Dessa forma, serão responsáveis por alimentar os *racks* e os componentes do *data center*. Portanto, este artigo enfoca a modelagem desse fluxo de energia.

Os modelos que são suportados pelo protótipo proposto, ajudam os projetistas de *data centers* na previsão dos custos operacionais, na fase de concepção do projeto. Estudos indicam que os *data centers* podem consumir de 100 a 200 vezes mais energia elétrica do que um escritório comum [6]. Ademais, o consumo de energia elétrica dos *data centers* dobram a cada 5 anos [7].

Portanto, este artigo tem como objetivo auxiliar os projetistas de nuvens ou *data centers*, propondo uma estratégia dinâmica e integrada usando as redes de Petri coloridas (CPN), para medir o impacto da disponibilidade na infraestrutura de energia dos *data centers*. Com isso, os projetistas podem estimar o impacto do custo e do consumo de energia, que é calculado em tempo de execução, ou seja, no momento em que um equipamento de infraestrutura elétrica fica inoperante, o modelo é capaz de estimar o impacto dessa inoperância. Além disso, o modelo proposto também realiza a verificação da capacidade máxima de potência que cada componente pode fornecer. Nesse contexto, será proposta uma ferramenta que faz a avaliação integrada do consumo de energia elétrica, sustentabilidade, custo e disponibilidade, sem depender do conhecimento prévio do formalismo.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A

Seção 2 mostra os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta as informações básicas para uma melhor compreensão desse trabalho. A Seção 4 apresenta os modelos propostos em redes de Petri coloridas. A Seção 5 ilustra a ferramenta proposta para quantificar os valores de fluxo e disponibilidade de energia. A Seção 6 apresenta dois estudos de caso para ilustrar a aplicabilidade dos modelos propostos. A Seção 7 conclui o artigo e apresenta as direções futuras dessa pesquisa.

2. Trabalhos Relacionados

Ao longo dos anos, muitos trabalhos propuseram estimar o consumo de energia, desempenho e confiabilidade dos sistemas. Callou et al. [8] apresentaram uma abordagem baseada em redes de Petri coloridas (CPN), para estimar o tempo de execução e o consumo de energia elétrica de sistemas embarcados. Nos modelos de CPN propostos, códigos probabilísticos foram utilizados para representar o fluxo de código dos sistemas embarcados e, assim, calcular o tempo de execução e verificar o consumo de energia resultante de sua execução. Este artigo teve o foco restrito em sistemas embarcados.

Andrade et al. [9] propuseram um conjunto de modelos em SPN para quantificação da disponibilidade e da segurança contra catástrofes de *data centers*. O trabalho atual, além de calcular a disponibilidade da arquitetura, verifica o consumo de energia dos equipamentos, quantificando o custo da arquitetura. Os autores em [10] apresentaram dois modelos diferentes para analisar cenários de disponibilidade e indisponibilidade de sistemas críticos de segurança. Os modelos propostos foram em redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN), cadeias de Markov e árvore de falhas. Contudo, o consumo de energia não foi o foco da pesquisa.

Melo et al. [11] apresentaram um modelo para avaliar ambientes de computação em nuvem, considerando os recursos disponíveis. Neste trabalho foi utilizado o RBD para a estimativa da sua disponibilidade, como também SPN. O presente trabalho propõe a utilização de modelos em CPN para estimar a disponibilidade, como também o fluxo energético.

Rocha et al. [12] apresentaram a relação entre a infraestrutura elétrica e a disponibilidade de softwares em um *data center*. Para isso, foram utilizados modelos em SPN para representar o comportamento da energia, e o RBD para estimar a disponibilidade. O trabalho não teve como objetivo a quantificação do impacto da disponibilidade no comportamento do fluxo de energia.

Liu et al. [13] apresentaram uma modelagem de um sistema de requisições de pedidos de determinado serviço em um *data center* de forma integrada, onde é analisado quando o serviço está inoperante e o tempo de espera pela requisição do serviço solicitado. Para isso, é utilizado o modelo CGSPN (*colored generalized stochastic Petri net*). O presente trabalho, além de analisar a disponibilidade do serviço de forma dinâmica, analisa o consumo energético do sistema modelado.

À medida que os *data centers* crescem em tamanho e complexidade, as falhas nesses ambientes tornam-se cada vez mais frequentes. Portanto, Sampaio et al. [14] avaliou

a eficácia de duas técnicas de tolerância a falhas, que são: redundância e tolerância proativa a falhas para serviços em nuvem. Os resultados mostraram que as técnicas proativas de tolerância a falhas superam as redundâncias tradicionais em relação aos custos para os usuários.

Com as novas demandas por serviços hospedados na nuvem, os *data centers* estão consumindo mais energia para armazenar as informações que estão sendo produzidas. Nesse sentido, Ferreira et al. [15] propõe um algoritmo de balanceamento de carga (PLDA-D) para otimizar a distribuição de energia das infraestruturas elétricas nos *data centers*. O algoritmo PLDA-D analisa o modelo de fluxo de energia que calcula as métricas de eficiência energética, sustentabilidade e custo dessas infraestruturas. Os resultados mostraram que o consumo de energia, o custo total e o impacto da sustentabilidade foram aprimorados em todos os estudos de caso.

O trabalho [16], apresentou uma estratégia baseada em modelo para quantificar o impacto da disponibilidade em arquiteturas de *data centers*. Resultados mostram a importância de estimar os custos operacionais antes de sua implementação real das infraestruturas elétricas.

Esse artigo propõe a quantificação dinâmica do impacto da falha dos equipamentos que compõe as infraestruturas elétricas de *data centers* no fluxo de energia desses sistemas. Sendo assim, esse trabalho adota redes de Petri coloridas para quantificar dinamicamente o impacto da disponibilidade no fluxo de energia dos sistemas elétricos de *data centers*.

3. Fundamentação teórica

Essa seção apresenta a fundamentação necessária que o leitor deve ter para um melhor entendimento do trabalho proposto.

3.1 Data center

O *data center* pode ser definido como sendo o ambiente de alto índice de processamento e armazenamento, onde estão instalados os aplicativos necessários para suportar os negócios empresariais. O planejamento da infraestrutura do *data center* é essencial para o bom funcionamento dos serviços de TI. A modelagem adequada do projeto de infraestrutura do *data center* é importante para o desempenho, resiliência, disponibilidade e escalabilidade [17].

É necessário que o *data center* tenha altos níveis de confiabilidade para melhor entregar o seu serviço. Para que isso aconteça, é interessante que a sua infraestrutura seja composta por: (i) fontes alternativas de energia, a fim de que quando ocorrer a falha de uma concessionária de energia elétrica o serviço não pare; (ii) equipamentos de redes com alta disponibilidade e redundantes, pois se um desses equipamentos parar de funcionar o outro assume o serviço; (iii) caminhos de dados redundantes para ampliar os trajetos alternativos.

A Figura 1 descreve as diferentes camadas necessárias para a implementação de um *data center*. Essas camadas vão desde a infraestrutura física até ao serviço de TI. As camadas tem domínios diferentes, isso mostra uma visão geral e um entendimento dos componentes que compõem um *data center*.

3.2 Redes de Petri

As redes de Petri Coloridas (CPN) são uma extensão das redes de Petri [18] que podem definir tipos complexos para *tokens* e possuem uma linguagem de programação própria (CPN ML) [19]. Assim, as CPNs são considerados redes de alto nível e permitem a modelagem de um problema com vários níveis de hierarquia. Todos esses fatores permitem uma descrição mais sintética dos modelos e a hierarquia facilita o entendimento do sistema modelado.

Da mesma forma em outros tipos de redes de Petri, os lugares são representados graficamente por elipses, nas CPNs por retângulos e o arco por setas. Esta pesquisa fez uso das CPN temporizadas. A principal diferença entre os modelos CPN com tempo e os modelos CPN sem tempo, é que a transição do modelo somente será habilitada quando o tempo da simulação for igual ao tempo estabelecido no *token* [20]. O processo de entrada das transições pode demandar valores de acordo com a função adotada e gerar um *token* com valor específico [21].

Para melhor entendimento do funcionamento das CPNs, a Figura 2 apresenta um modelo de um simples interruptor de luz, composto por duas transições e dois lugares. Quando o *token* está no lugar ON o seu valor é *light=1*, representando que o interruptor está com a luz ligada. Com o disparo da *transition_1* o *token* vai para o lugar OFF, modificando o seu valor para *light=0*, indicando que a luz está desligada. Já com o disparo da *transition_2*, o *token* volta para o lugar ON, representando que a luz está ligada (valor do *token light=1*).

A Figura 3 mostra as declarações do modelo da Figura 2 que representa um interruptor de luz. Neste modelo, existe uma declaração do conjunto de cor State que é um registro (record) denominado por *light*, do tipo inteiro. Nesse exemplo da Figura 2, o *token* inicia com o valor de *light=1*. Nas CPNs, todos os arcos devem ter o seu conjunto de cores associado para indicar qual tipo de *token* que pode passar pelo arco. Nesse exemplo, os tipos dos arcos são representados pelas variáveis IN e OUT, ambas do conjunto de cores (*colset*) State. Para uma referência completa sobre os conjuntos de cores e sintaxe do CPN ML, o leitor deve consultar [22].

3.3 Modelo de fluxo de energia

O modelo de fluxo de energia, chamado EFM [23], representa o fluxo de energia elétrica que passa pelos componentes do sistema, considerando sua eficiência e a capacidade máxima que cada componente pode suportar. A Figura 4 apresenta um modelo EFM que representa um sistema elétrico de um *data center* com 3 componentes (UPS, subpanel e PowerStrip). O *Source.Point* (associado ao nó de origem S) corresponde à energia demandada pela arquitetura e o *Target.Point* (associado ao nó de destino T) representa a energia consumida. Nesse processo, ocorrem perdas que dependem da eficiência de cada componente.

O *UPS* é responsável por prover a energia de forma ininterrupta e estabilizada; *SubPanel* é o quadro de energia do sistema; *PowerStrip* é uma régua de alimentação de energia



Figure 1. Infraestrutura típica de um *Data Center*.

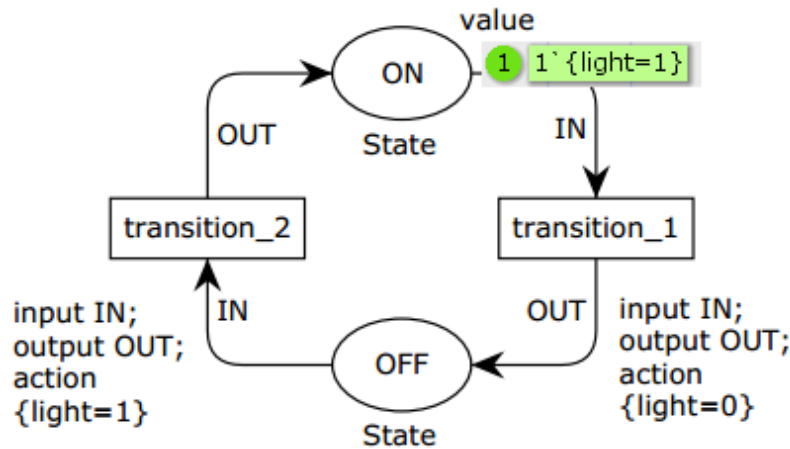


Figure 2. Representação de um interruptor de luz.

```

▼colset State = record light:INT;
▼(*Value in Token*)
val value={light=1};
▼var IN: State;
▼var OUT: State;

```

Figure 3. Declarações.

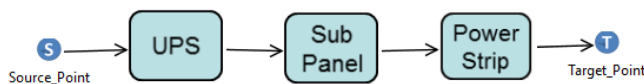


Figure 4. Modelo de Fluxo de Energia.

elétrica. Cada componente possui atributos como: eficiência, custo de aquisição, e a capacidade máxima de potência que o equipamento consegue suportar. Modelos EFM's são responsáveis por computar também a energia consumida pela arquitetura, o custo e a eficiência energética do sistema modelado. Esses resultados auxiliam projetistas de *data centers* a propor um novo ambiente ou otimizar um já existente.

Fluxo de Energia nos Equipamentos.

A verificação do fluxo de energia que passa pelos equipamentos, é calculada para que não exceda a capacidade máxima

de potência que cada equipamento pode prover. No modelo EFM, quando a energia excede a potência do equipamento, o sistema se torna falho do ponto de vista energético (mesmo podendo estar funcional em relação à disponibilidade).

Quantificando o custo.

O modelo EFM considera o custo de aquisição dos equipamentos dos *data centers* e os custos operacionais. O custo de aquisição (CA) corresponde aos recursos necessários para implementar a infraestrutura dos *data centers*. O custo operacional (CO) é o custo para manter o sistema no modo operacional, que é representado pela Equação 1.

$$CO = E_{consumida} \times T \times E_{custo} \times D \quad (1)$$

onde $E_{consumida}$ é a energia elétrica consumida; T é o período considerado; E_{custo} corresponde ao preço da energia; e D é a disponibilidade.

A Figura 5(a) representa um sistema simples de energia elétrica consistindo em dois nobreaks e um subpanel que fornece 100 kW de energia aos dispositivos de TI. Neste exemplo, os pesos atribuídos nas arestas que conectam o equipamento UPS1 e UPS2 ao componente SubPanel são, respectivamente, um e três. As setas com fundo branco indicam que

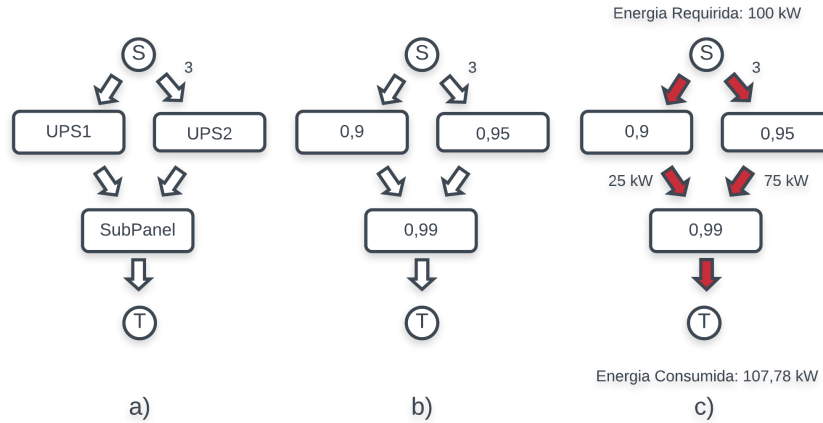


Figure 5. a) Sistema Simples; b) Valores da Eficiência; c) Energia Consumida.

não há energia em trânsito, enquanto as setas com fundo vermelho indicam que a energia elétrica está em trânsito, neste momento. Assim, o componente UPS2 fornece três vezes mais energia que o UPS1. De acordo com a Figura 5(b), a eficiência elétrica do UPS1, UPS2 e Subpanel é de 0,9; 0,95 e 0,99, respectivamente. Para fornecer a energia necessária de 100 kW, a energia consumida é de 107,78 kW, conforme mostrado na Figura 5(c).

3.4 Eficiência da Arquitetura.

É necessário conhecer a eficiência dos equipamentos, pois se o equipamento tiver uma eficiência baixa, maior será o consumo de energia deste equipamento. A verificação da eficiência da arquitetura é representada pela Equação 2,

$$Ef = \frac{E_{entrada}}{E_{saída}} \quad (2)$$

onde Ef é a eficiência da arquitetura, $E_{entrada}$ é a energia demandada pelo sistema de TI do *data center*, e o $E_{saída}$ é a energia de fato consumida, decorrente da eficiência energética dos dispositivos que acabam por ter energia dissipada em forma de calor, por exemplo.

3.5 Disponibilidade

A confiabilidade está correlacionada com os conceitos de disponibilidade e tolerância a falhas. Confiabilidade pode ser entendida como a probabilidade que um conjunto de serviços fique acessível por um determinado período. Em um sistema tolerante a falhas, a falha de um componente não fará com que todo o sistema falhe. A disponibilidade (A) pode ser calculada a partir do tempo médio de falha (MTTF) e do tempo médio de reparo (MTTR) [24], mostrado na Equação 3.

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3)$$

3.6 Downtime

É o tempo que o sistema ficou indisponível durante um período de tempo T . Essa indisponibilidade pode ser decorrente de algum problema específico ou alguma manutenção programada. O *downtime* é representado pela Equação 4,

$$downtime = (1 - D) * T \quad (4)$$

onde D é a disponibilidade da arquitetura e T o período de tempo.

3.7 Exergia

Exergia é definida como a parte da energia que será convertida em trabalho útil. O conceito de exergia é um resultado direto da segunda lei da termodinâmica, que trata da transferência de energia térmica, onde, nesse processo, sempre há uma perda [25, 26]. Como resultado, a exergia consumida ou destruída (ou simplesmente exergia para este trabalho) mostra a eficiência do sistema em relação à perda de energia.

Quantificando o consumo da exergia operacional

A exergia operacional é utilizada para identificar o sistema elétrico com maior eficiência energética. A Equação 5 que calcula o consumo da exergia operacional é:

$$Ex_{op} = \sum_{i=1}^n Ex_{opi} \times T \times D \quad (5)$$

onde Ex_{opi} é a exergia operacional de cada equipamento, T é o tempo em que o sistema estará em funcionamento, e D é a disponibilidade do sistema.

4. Modelo

Esta seção apresenta o modelo proposto em CPN para avaliar de forma dinâmica o impacto da disponibilidade dos equipamentos no fluxo de energia do sistema. A Figura 6 mostra a

arquitetura-base do sistema de potência comumente utilizada em *data centers* [27]. Esta arquitetura é composta por 4 componentes de um *data center*, são eles: *PowerStrip*, *SubPanel*, *SDT* (*Step Down transformer*) e *UPS*.

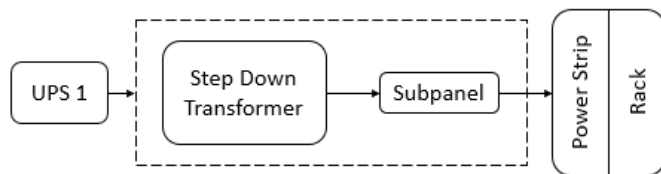


Figure 6. Arquitetura.

Neste exemplo, considera-se o sistema mais simples, sem replicação e, se qualquer um dos equipamentos vier a falhar, todo o sistema estará falho. Desta forma, o sistema somente estará disponível se todos os equipamentos estiverem disponíveis. Vale ressaltar que a disponibilidade da arquitetura é simulada em tempo de execução e seu impacto no modelo de fluxo de energia é quantificado.

A Figura 7 (a): demonstra um sistema simples de *data center* composto por 4 equipamentos, são eles: *Power Strip*, *SubPanel*, *SDT* e *UPS1*. Nesse modelo, o fluxo energético passa apenas por um caminho. A Figura 7 (b): mostra o fluxo energético quando não existe falha elétrica com a energia requerida de 100 kW, chegará no final do sistema com a energia de fato consumida de 107,80 kW. Já a Figura 7 (c): mostra o fluxo energético com falha no equipamento *SDT*. Como a energia não tem outro caminho para prosseguir, o sistema do ponto de vista elétrico estará falho.

4.1 Modelo proposto

A Figura 8 apresenta o modelo CPN, proposto para representar a arquitetura ilustrada na Figura 6. Nessa arquitetura os equipamentos *Power Strip*, *Sub Panel*, *SDT*, e *UPS* são representados no modelo CPN pelas transições PS, SB, SDT, UPS. Todas as transições desse modelo CPN são subpáginas, ou seja, possuem um outro modelo de mais baixo nível e que é representado na visão de mais alto nível pela transição. Vale destacar ainda que todas essas transições são instâncias da mesma transição e todas as configurações que estão em uma transição são replicadas nas outras subpáginas. A construção do modelo dessa forma fornece mais consistência, onde cada componente elétrico do *data center* irá fazer uso dos mesmos modelos, funções e variáveis pré-definidas no modelo CPN.

Os atributos dos *tokens* (do tipo *COMPONENT*) presentes nos lugares *ON* ou *OFF* (ver Figura 8) são de acordo com os valores setados como parâmetros para o MTTF, MTTR e custo, por exemplo. Sendo assim, durante a simulação o *token* carrega os atributos de cada equipamento. Para modificar a estrutura para uma arquitetura em paralelo é necessário adicionar um caminho “extra” e, assim, se distribuir a energia por mais de um caminho acessível.

O *token ini* no lugar 01 (ver Figura 8) habilita a transição PS que representa o início da execução do modelo. O *token ini*, mostrado na Figura 9(a), carrega todos os atributos que

serão utilizados durante a simulação do modelo. A variável *powerInitial* representa o valor da energia demandada do sistema e, no final da execução, esta variável representa a energia elétrica consumida; a variável *power* representa a energia demandada inicial, e por fim, a variável *ava* representa a disponibilidade do modelo. A Figura 9(b) mostra o conjunto de cores definido para o *token ini* do modelo CPN proposto. Esses valores representam a especificação de todos os atributos que o *token* carrega. O disparo da transição PS (ver Figura 8) consome o *token* do lugar 01, e a simulação continua a partir da subpágina da transição PS como mostrado na Figura 11.

Na Figura 8, além do *token* no lugar 01, existem outros *tokens* representados nos lugares ON e OFF que representam o estado inicial de cada componente do modelo. A Figura 10(a) ilustra a representação da configuração inicial do *token* utilizado para indicar um componente. Vale ressaltar que cada equipamento tem os seus respectivos atributos específicos como: nome e estado do equipamento, custo de aquisição, MTTF e MTTR, como também sua disponibilidade. A disponibilidade de toda a arquitetura é calculada após ser computada a disponibilidade de cada equipamento, sendo realizada ao final da execução. A Figura 10(b) mostra a definição do conjunto de cor (*colset*) *COMPONENT*, utilizado nos lugares que representam os componentes da arquitetura. Pode-se perceber que o conjunto de cores *COMPONENT* terá parâmetros para representar o tipo do componente (*componentType*), o nome (*name*), o preço (*acquisitionCost*), a potência máxima (*potMax*), a eficiência (*efficiency*), o estado (*state*), o MTTF e o MTTR, e a disponibilidade (*availability*).

O disparo da transição PS (ver Figura 8) faz com que um *token* seja removido do lugar 01. A Figura 11 mostra a subpágina da transição PS (ver Figura 8). Nesse modelo, a transição T01 estará habilitada quando existir um *token* no lugar 01 e outro no lugar 03S. Quando a transição T01 é disparada, um *token* do lugar 01 e outro do lugar 03S são consumidos. O leitor deve recordar que o fluxo energético só irá funcionar se todos os dispositivos do caminho estiverem funcionando. Com isso, percebe-se a relação dinâmica do modelo de fluxo de energia com o modelo de disponibilidade dos equipamentos.

A Figura 12 mostra a subpágina da transição Status do sub-modelo da Figura 11. Nessa subpágina é realizado o cálculo da disponibilidade. Também é realizada a mudança do estado do equipamento (i.e., ON para OFF ou OFF para ON). Quando a transição T03 é disparada, a função *reevalStateOff()* faz com que o estado do equipamento fique em OFF, indicando que o dispositivo não está operacional. Já quando a transição T04 é disparada, a função *reevalStateOn()* realiza o cálculo da disponibilidade (ver Equação 3) e o equipamento muda para o status ON, que representa o estado operacional.

A verificação da capacidade máxima que cada componente pode suportar, é necessária para que o fluxo de energia não exceda a capacidade máxima de potência que cada equipamento pode prover. Esta verificação acontece, por exemplo, na transição, T01 (ver Figura 11). Associada a essa transição

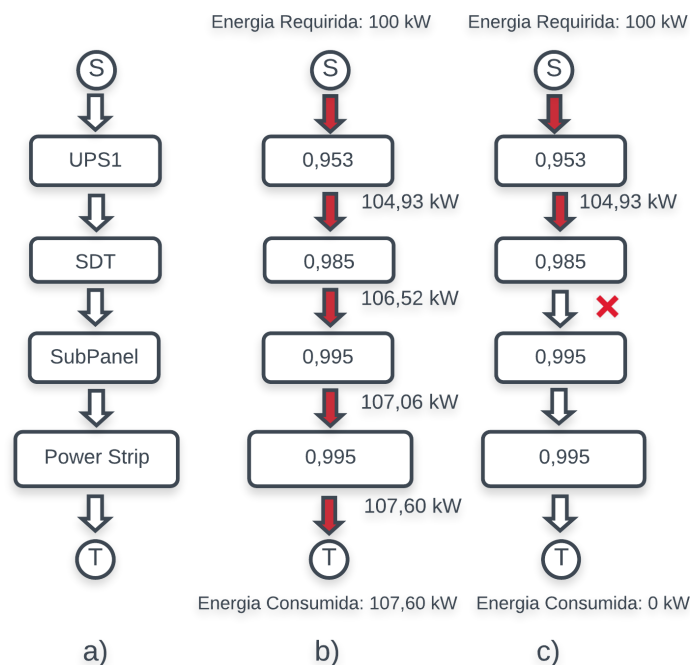


Figure 7. a) Sistema Simples; b) Sistema operante; c) Falha de um equipamento.

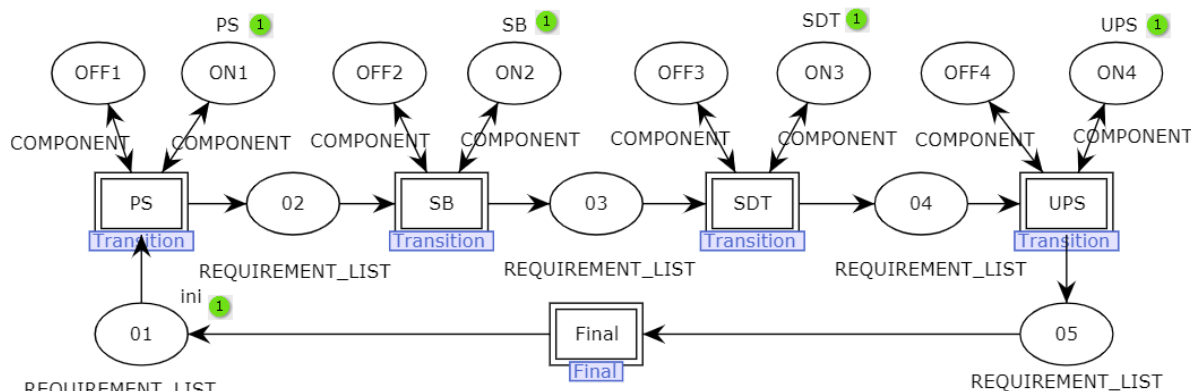


Figure 8. Modelo CPN - Arquitetura A1.

```
1* [(acquisitionCost,0.0),(powerInitial,
100.0),(power,100.0),(operationalExe
rgy,0.0),(exergy,0.0),(operationalCost
,0.0),(totalCost,0.0),(efficiencyTotal,0.
0),(downtime,0.0),(number9s,0.0),(ava
a,1.0)]
```

```
colset REQUIREMENT_TYPE = with
acquisitionCost | powerInitial | power | exergy
| operationalExergy | downtime | efficiencyTotal
| operationalCost | totalCost
| number9s | efficiency | ava ;
colset REQUIREMENT_VALUE = REAL;
colset REQUIREMENT = product
REQUIREMENT_TYPE * REQUIREMENT_VALUE;
colset REQUIREMENT_LIST = list REQUIREMENT;
```

a)

b)

Figure 9. Marcação inicial.

```
1` { componentType=PowerStrip,nam
e="PowerStrip",acquisitionCost=200.
0,potMax=500.0,efficiency=0.995,stat
e=on,statenum=1.0,MTTF=11511175.
63,MTTR=3.8,MTTF_INT=2300000,MTT
R_INT=4,availability=0.0}@0
```

```
▼ colset COMPONENT = record
  componentType:COMPONENT_TYPE *
  name:STRING *
  acquisitionCost:REAL *
  potMax:REAL *
  efficiency:REAL *
  state:ESTADO *
  statenum:REAL *
  MTTF:REAL *
  MTTR:REAL *
  MTTF_INT:INT *
  MTTR_INT:INT *
  availability:REAL timed;
```

a)

b)

Figure 10. Token representando o equipamento/componente.

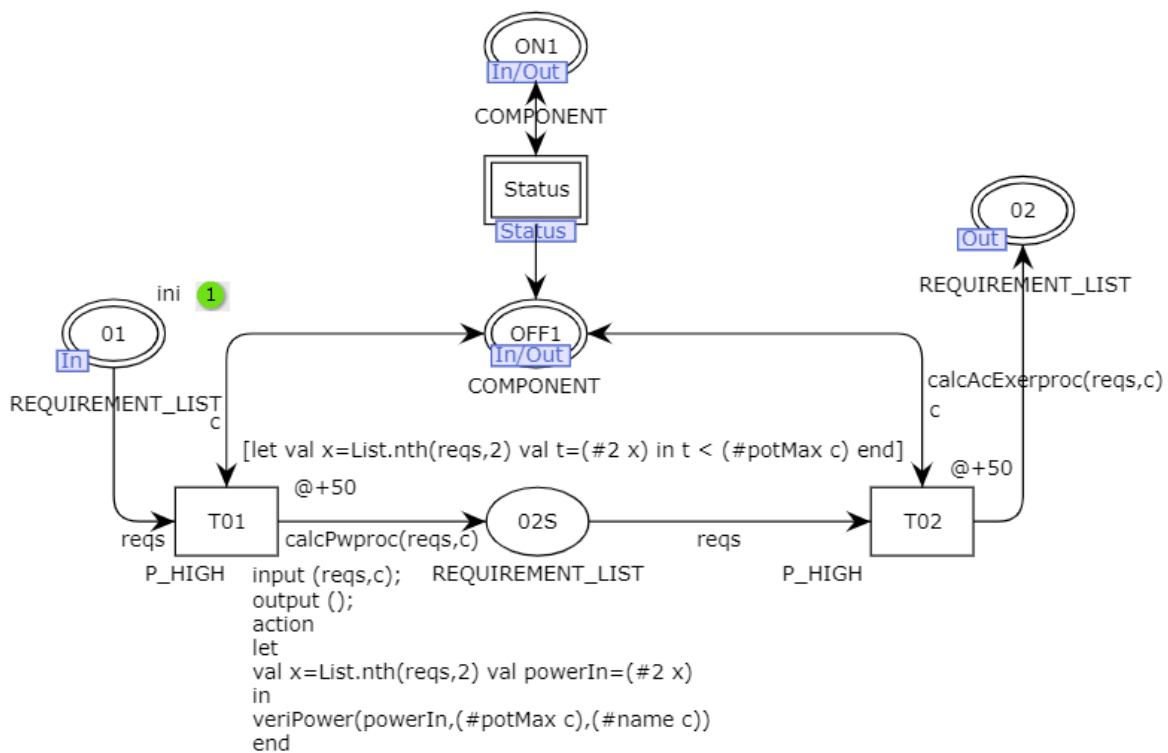


Figure 11. Modelo da subpágina da transição PS - componente Power Strip.

existe uma função *veriPower()* escrita em CPNml, que recebe como parâmetros: energia demandada, a potência máxima que o equipamento suporta e o nome do equipamento.

A função verifica se a energia que o equipamento está recebendo é maior do que a capacidade suportada. Se isso acontecer, a função registra em um arquivo (ver Figura 11 transição T01) qual equipamento não suportou o fluxo energético. A função de guarda associada à transição T02 da subpágina PS (ver Figura 11), determina a condição na qual essa transição estará habilitada (i.e., fluxo de energia que passa pelo equipamento for menor do que a potência máxima que o equipamento suporta). Caso contrário, o fluxo será paralisado.

A transição Final, localizada no modelo da Figura 8, tem

a função que define o critério de parada da simulação. Se as precisões desejadas foram atingidas, o sistema exibe os resultados. Caso contrário, o fluxo de execução segue. Após a simulação, obtemos as métricas de interesse, como consumo de energia, eficiência energética da arquitetura e disponibilidade. Vale ressaltar que o algoritmo na linguagem CPNml que executa esta operação, está descrito na transição Reset (veja a Figura 13).

O algoritmo na transição Reset (ver Figura 13) representa o processo adotado para o critério de parada, no qual o resultado do consumo de energia elétrica para cada execução do modelo CPN é incluído pela função *addIterData()*. Além disso, a função *checkEnd()* avalia se a simulação pode ou não

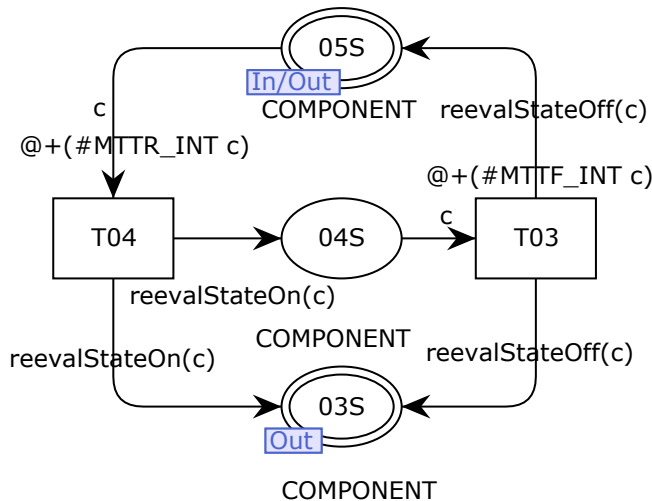


Figure 12. Transição Status.

continuar. Caso a simulação prossiga, outra função *newIter()* é executada para iniciar um novo ciclo com as variáveis reiniciadas. Caso contrário, a simulação é finalizada e a energia média, desvio padrão e o erro da energia são registrados em um arquivo pela função *writeFile1()*.

4.2 Caminho Redundante

Esta seção tem como objetivo mostrar o impacto da disponibilidade de equipamentos no fluxo energético. Para isso, um exemplo com caminho redundante será usado. Na composição paralela, o sistema funcionará se um de seus componentes estiver funcionando. Portanto, esse formato permite que mesmo na falha de um dispositivo a arquitetura continue sua operação.

A Figura 14(a) demonstra um sistema simples de *data center* composto por 3 equipamentos, são eles: PowerStrip, UPS1 e UPS2. O UPS1 e UPS2 estão representando a redundância do modelo, ou seja, se um dos caminhos vier a falhar, o fluxo energético passará pelo caminho que esteja com o equipamento operacional. Neste exemplo, as setas com fundo branco indicam que não há energia em trânsito, enquanto as setas com fundo vermelho indicam que a energia elétrica foi transmitida. A Figura 14(b) mostra o fluxo de energia elétrica quando não há falha em nenhum dos caminhos com a energia necessária de 100 kW. Assumindo tal demanda de valor, ele chegará ao final do sistema com a energia consumida de 108,18 kW. Os valores dentro das caixas indicam a eficiência energética do equipamento.

A Figura 14(c) mostra o fluxo de energia, assumindo que o dispositivo UPS2 falhou. Portanto, a energia está passando por apenas um caminho e, com a energia demandada de 100kW, resultará no consumo de 112,23kW. Pode-se perceber que existe, de fato, um impacto na disponibilidade do fluxo energético, onde, assumindo todos os componentes operacionais, existe um consumo de 108,18kW de energia. No caso de falha do UPS2, esse consumo aumentou para 112,23kW. Quando um caminho estiver inoperante, toda a energia do sistema fluirá automaticamente pelo caminho operacional (consulte a

Figura 14(c)).

A Figura 15 mostra a arquitetura paralela do *data center* que será usada para demonstrar a aplicabilidade do formalismo proposto. Essa arquitetura possui os seguintes equipamentos: *PowerStrip*, *Subpanel*, SDT, STS, UPS1 e UPS2. Essa arquitetura será modelada para ilustrar o impacto da disponibilidade de equipamentos no fluxo de energia do sistema. Para ilustrar o impacto de uma falha do dispositivo no fluxo de energia, propusemos um modelo de CPN para representar esse comportamento. A Figura 16 mostra o modelo de CPN no momento de escolher um dos caminhos disponíveis para o fluxo de energia.

Nesse momento, o modelo verifica qual equipamento está operacional e define a energia que fluirá para cada caminho. Se o modelo identificar que um caminho parou de funcionar, a energia será redirecionada para o caminho disponível. No entanto, se não houver um caminho disponível para lidar com o fluxo de energia demandado, o sistema será considerado em um estado de falha do ponto de vista elétrico, ficando o sistema inoperante. O disparo da transição TD01 chama as funções *calcWeiproc1()* e *calcWeiproc2()*, que recebem como parâmetros: *reqs*, *c* e *c1* dos tipos *REQUIREMENT_LIST*, *COMPONENT* e *COMPONENT*, respectivamente. Essas funções são responsáveis por realizar a verificação se o equipamento estiver inoperante, para direcionar o fluxo de energia ao longo do caminho operacional (se houver).

5. Ferramenta proposta

Uma ferramenta foi proposta para simplificar a modelagem da arquitetura usando os modelos CPNs propostos. A Figura 17 mostra a tela inicial da ferramenta que visa construir automaticamente o modelo de CPN, sem que seja necessário exigir ao usuário um conhecimento técnico sobre as CPNs. Nesta ferramenta, um Parser é responsável por converter o modelo da visão de alto nível da ferramenta em modelos formais (SPN, RBD e CPN). Neste trabalho, usamos a ferramenta para converter uma representação de alto nível (consulte a Figura 17) no padrão reconhecido pelo CPN Tools. Assim, o Parser se comunica com o CPN Tools [20] para permitir a avaliação e análise de modelos em redes de Petri coloridas.

A conversão para os modelos formais ocorre da seguinte forma: dentro de cada retângulo (vértice) são armazenados os dados básicos (MTTF e MTTR) usados pelos formalismos RBD, SPN e CPN para o cálculo da disponibilidade. Internamente na ferramenta, existe um parser para cada um dos formalismos, onde são executadas as seguintes etapas: (i) os vértices são convertidos na representação de um equipamento do formalismo associado ao parser; (ii) é realizada uma filtragem para identificar os vértices iniciais; (iii) esses vértices passam por um processo de mapeamento dos caminhos para os vértices finais, realizado através de uma adaptação em profundidade do algoritmo de busca; (iv) finalmente, esses caminhos são convertidos para a representação do formalismo associado ao parser.

A Figura 18 mostra como o mecanismo de avaliação é

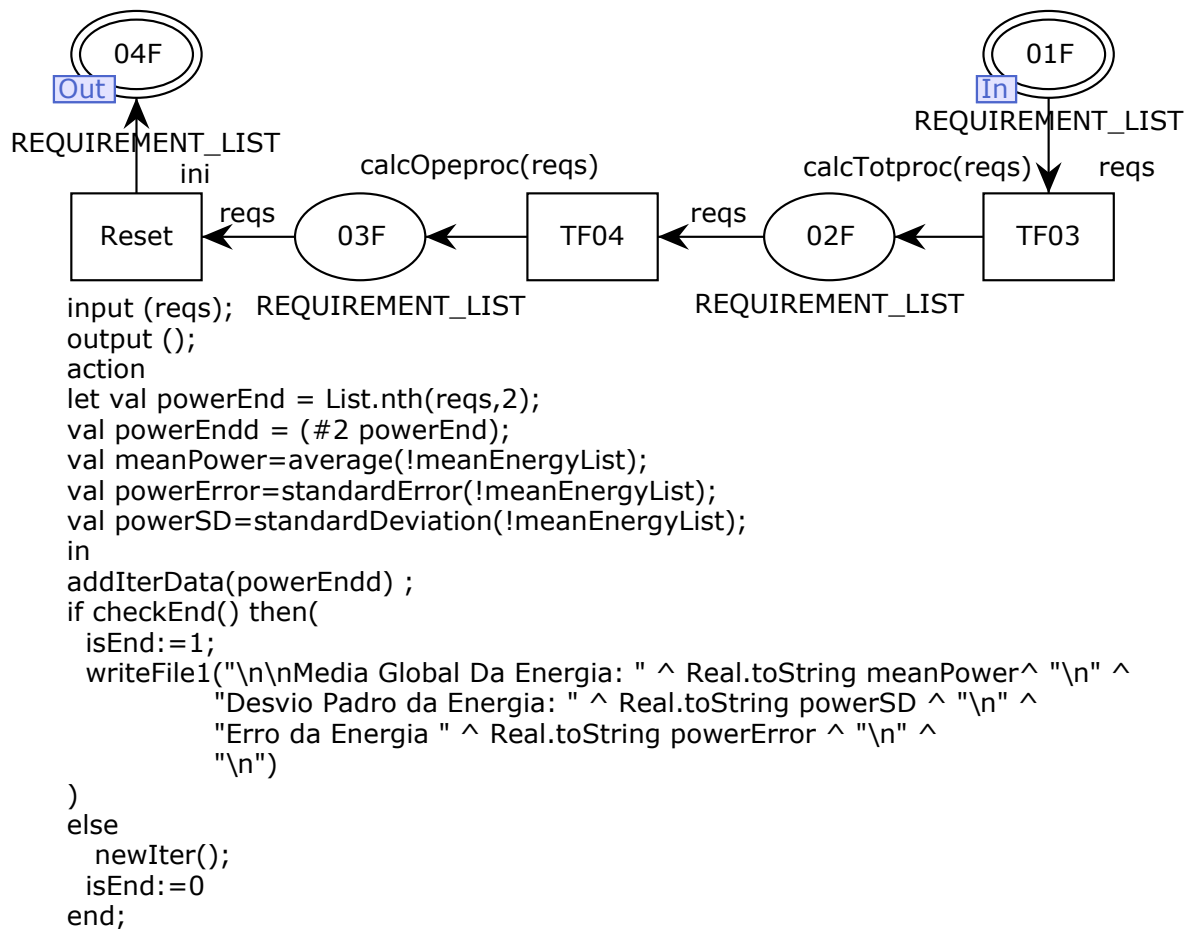


Figure 13. Transição Final.

integrado aos ambientes de computação existentes. Pode-se observar que, além da ferramenta desenvolvida com a visão única da representação dos sistemas computacionais de interesse, um parser é responsável por converter o modelo da ferramenta proposta nos modelos formais.

6. Estudo de Caso

Esta seção apresenta dois estudos de caso com o objetivo de ilustrar a aplicabilidade dos modelos propostos em um cenário real da infraestrutura elétrica de um *data center* típico.

6.1 Estudo de caso I

O primeiro estudo de caso concentra-se na validação da estratégia proposta com formalismos consolidados e cenários reais. A Tabela 1 mostra as arquiteturas de um *data center* (A1 a A5). A arquitetura A1 representa o caminho do fluxo em série e sem redundância. A arquitetura A2 corresponde a A1 com um UPS redundante e com a adição do STS, para poder fazer a escolha entre os 2 UPSs. Cada arquitetura sucessiva corresponde à anterior com um dispositivo adicional redundante. Os resultados dessa pesquisa, são comparados com o trabalho [23]. Vale salientar que no estudo de caso foi considerada a arquitetura proposta A1 em pleno funcionamento

do ponto de vista energético, não tendo a disponibilidade afetado a arquitetura. Os MTTFs, MTTRs, custo de aquisição e valores de eficiência energética de cada equipamento foram obtidos de [28, 27, 29] e são mostrados na Tabela 2.

6.2 Resultados

Para realizar os cálculos, foram atribuídos valores como parâmetros de entrada, como 100kW para a energia demandada pelo equipamento de TI. Para o custo da eletricidade, foram considerados o valor de USD 0.11 (preço por 1kWh) e o tempo de 5 anos, ou 43800 horas.

A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados da avaliação das 5 arquiteturas, em que 9s representa a disponibilidade em número de noves (calculado usando $-\log(1 - \text{disp}(\%)/100)$). Como esperado, a disponibilidade aumenta quando mais componentes redundantes são inseridos. Esta tabela também apresenta os resultados da avaliação para exergia operacional e energia consumida. A exergia operacional é usada para identificar o sistema elétrico com maior eficiência energética. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos com o modelo proposto para as métricas: custo de aquisição, custo operacional e custo total da arquitetura do *data center*. O custo da aquisição corresponde aos recursos necessários para implementar a ar-

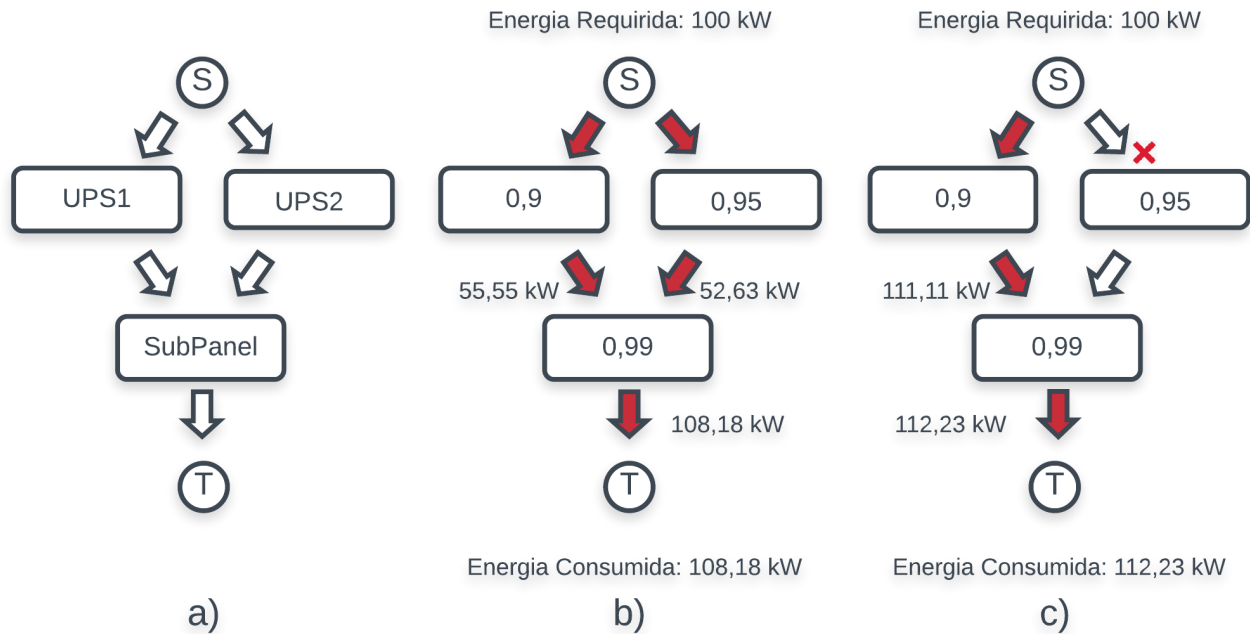


Figure 14. a) Sistema Simples; b) Sistema operante; c) Falha de um caminho.

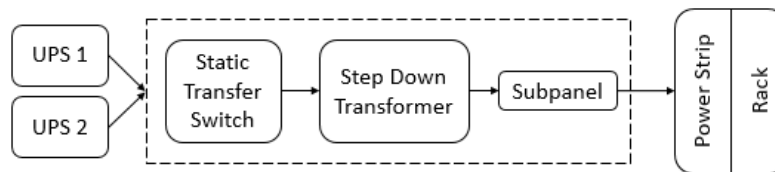


Figure 15. Arquitetura proposta em paralelo.

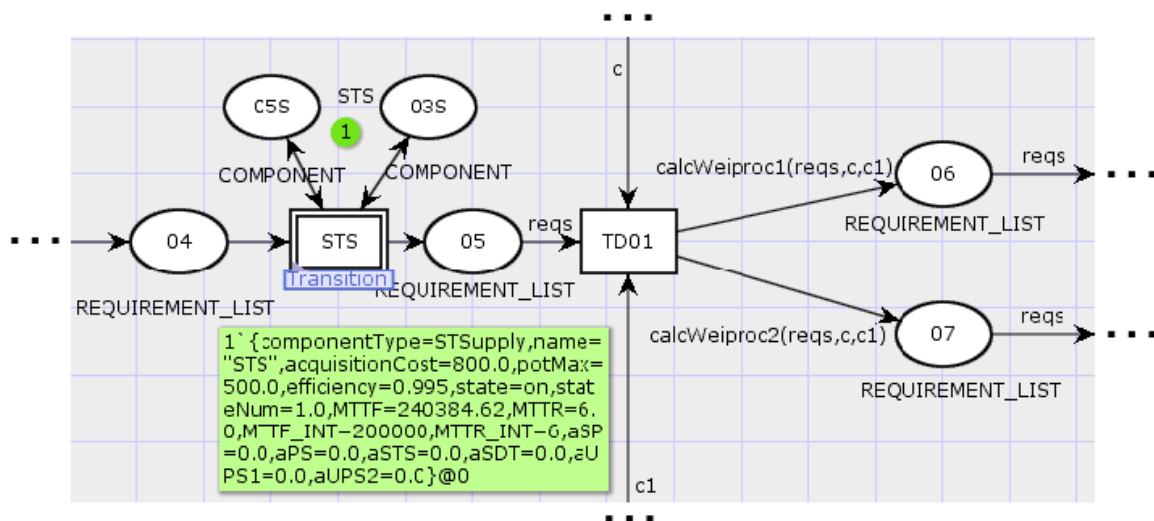


Figure 16. Verificação do fluxo energético.

quitadura do *data center*. Custo operacional é o custo para manter o sistema no modo operacional.

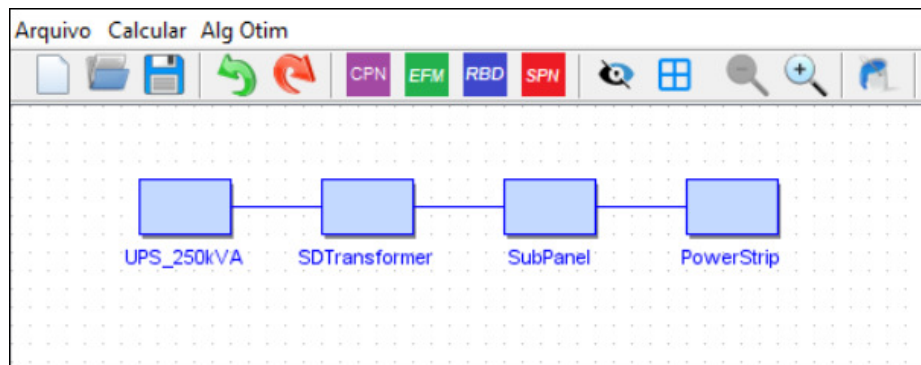


Figure 17. Ferramenta proposta.

Table 1. Resumo dos resultados.

Arquitetura	Disp. (%) (9s)	Efi. (%)	Exergia Ope. (GJ)	Ener. Cons. (kW)	C. de Aquisição (USD)	C. Opera. (USD)	C. Total (USD)
A1 (U-T-P-S)	99,98556 (3,84)	93,3	1198,68	107,60	4550,00	518400,00	522950,00
A2 (2U-ST-S-T-P-S)	99,98627 (3,86)	92,8	1283,67	108,14	8950,00	518500,00	527450,00
A3 (2U-2T-ST-S-P-S)	99,99731 (4,57)	92,8	1284,00	108,14	9500,00	518900,00	528400,00
A4 (2U-2T-2P-ST-S)	99,99989 (5,99)	92,8	1284,11	108,14	9700,00	521000,00	530700,00
A5 (2U-2T-2P-2S)	99,99999 (7,68)	93,3	1198,85	107,60	9100,00	518400,00	527500,00

U-UPS; T - Transformer; P - SubPanel; S - Rack power strip; STS - Static transfer switch

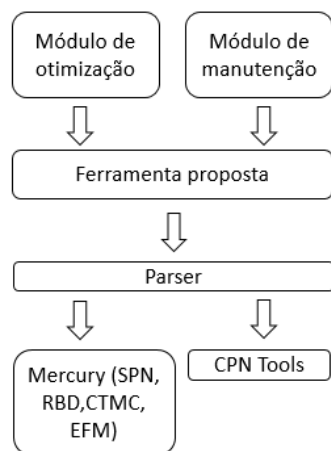


Figure 18. Ferramenta proposta.

Vale ressaltar que a energia consumida em todas as arquiteturas permanece praticamente a mesma, passando de 107,60kW para 108,14kW. Isso aconteceu devido ao fato do consumo de energia basear-se na eficiência dos dispositivos que compõem a arquitetura de energia do *data center*. Assumindo diferentes dispositivos redundantes (por exemplo, com eficiência energética diferente), isso pode ter um comportamento completamente diferente. Da mesma forma, o custo operacional também não variou muito. No entanto, a disponibilidade, em número de noves, teve um aumento de 100%, passando de 3,84 para 7,68, considerando a arquitetura A1 em comparação com A5.

O leitor deve lembrar-se do objetivo principal deste estudo de caso, que é validar os modelos propostos através de trabalhos anteriores disponíveis em [23]. Conseguimos alcançar exatamente os mesmos resultados, assumindo uma

Table 2. Valores de MTTF, MTTR, Custo de aquisição e eficiência.

Componentes	MTTF (h)	MTTR (h)	C. Aq. (USD)	Efi (%)
UPS	250.000,00	8,00	3600,00	95,3
SDT	1.412.908,33	156,01	550,00	98,5
Sub Panel	1.520.000,00	2,40	200,00	99,5
Power Strip	11.511.175,63	3,80	200,00	99,5
STS	240.384,62	6,00	800,00	99,5
ATS	500.000,00	0,33	800,00	99,5

nova estratégia que também é capaz de quantificar o impacto da disponibilidade no fluxo de energia do sistema em análise. Isso foi alcançado pelos modelos de CPN propostos, que podem quantificar dinamicamente o impacto de uma falha do dispositivo no fluxo de energia elétrica em tempo de execução, o que não era o foco do trabalho anterior [23].

Assim, o uso desses modelos para quantificar o impacto na disponibilidade em tempo real nas arquiteturas, permite que os projetistas prevejam o consumo de energia antes da implementação, bem como calculem o consumo final de eletricidade, levando em consideração a disponibilidade de equipamentos que compõem a infraestrutura do sistema.

7. Estudo de Caso II

O objetivo deste segundo estudo de caso é mostrar o impacto da disponibilidade no fluxo de energia das arquiteturas de *data center*. As arquiteturas analisadas aqui são as mesmas do estudo de caso anterior (consulte Tabela 1).

No entanto, agora estamos considerando a disponibilidade para quantificar seu impacto no fluxo de energia. A arquitetura A1 é construída em arranjo em série, ou seja, se algum dos dispositivos deste modelo ficar indisponível, todo o sistema, do ponto de vista elétrico, ficará indisponível.

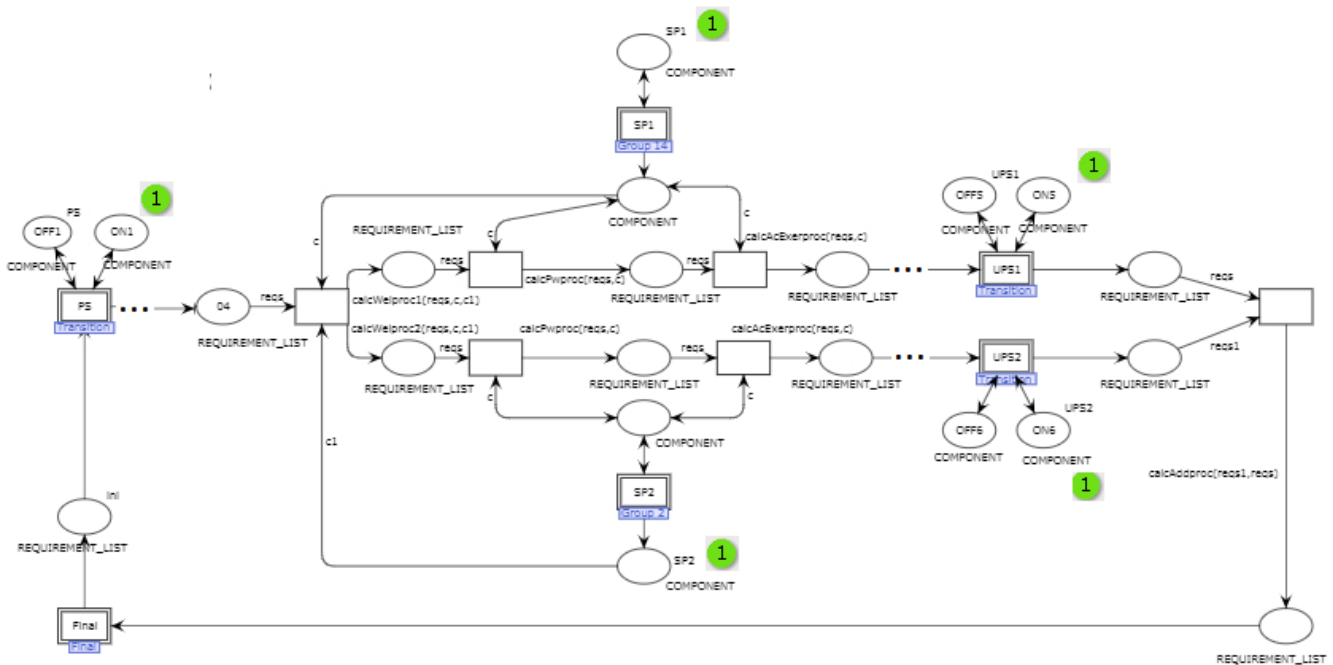


Figure 19. Modelo CPN: arquitetura A4.

Assim, a análise do modelo proposto representado pela arquitetura A1 (veja a Figura 8) mostra dois resultados possíveis em relação à energia elétrica. São eles: (i) todo o equipamento está em operação; ou (ii) quando algum equipamento estiver indisponível, ou seja, o sistema como um todo falhar.

A Figura 19 mostra o modelo representando a arquitetura A4. O modelo representado aqui, corresponde a uma versão simplificada do modelo completo. Por exemplo, o ATS, SDT1 e SDT2 são representados pelo "...", presente no modelo.

Vale ressaltar que aumentar a possibilidade de caminhos redundantes, também aumenta os possíveis resultados para o nosso modelo proposto e, principalmente, o impacto da disponibilidade no fluxo de energia. Os outros modelos CPNs, as arquiteturas A2, A3 e A5, que não estão representadas neste Estudo de caso, são semelhantes a este, e suas diferenças são encontradas no número de dispositivos replicados".

Os trabalhos anteriores não consideravam o impacto da disponibilidade em tempo de execução sobre o consumo de energia, implicando em uma maior erro nas métricas aferidas no modelo. Este estudo passou a considerar este impacto, que é o que ocorre em um sistema real, diminuindo o erro embutido nas métricas. Em alguns dos estudos de caso apresentados neste trabalho, este erro chegou a ~ 30%.

7.1 Resultados

Este estudo de caso começa comparando o consumo de energia das arquiteturas A2 e A5, ora impactando a disponibilidade do fluxo de energia, ora sem impactar. As Figuras 20 (a), (b), (c) e (d) mostram os resultados do consumo de energia das arquiteturas A2, A3, A4 e A5, considerando esses dois cenários: (i) sem disponibilidade, afetando o fluxo de energia e (ii) com a disponibilidade, afetando o fluxo de energia do *data center*.

A primeira barra com a cor mais escura de todos os gráficos mostra a energia consumida quando a disponibilidade não afeta o sistema, enquanto a segunda barra com a cor mais clara mostra o impacto da disponibilidade no sistema.

A Figura 20 (a) mostra um consumo de energia de 108,14 kW quando a disponibilidade não afeta o fluxo de energia; no momento em que a disponibilidade começa a afetar, o consumo de energia cai para 76,39 kW. Essa queda no consumo também ocorre nas arquiteturas A3, A4 e A5, como mostrado nas Figuras 20 (b), (c) e (d), respectivamente. Conclui-se que, durante o processo de simulação, se algum dos componentes elétricos estiver inoperante, o consumo de energia deste sistema será menor, se comparado ao sistema sem a presença de falhas nos componentes elétricos.

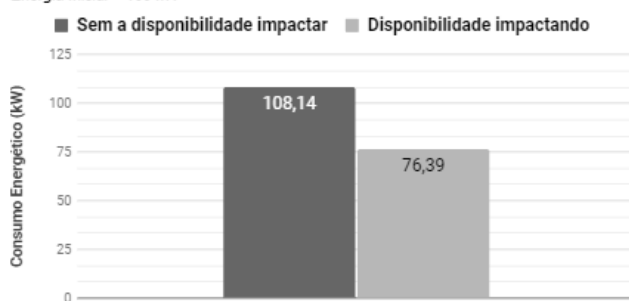
Continuamos esse estudo de caso diminuindo o MTTF de apenas um equipamento (UPS) para demonstrar mais facilmente o alto impacto da disponibilidade no consumo de energia elétrica. Portanto, uma vez que um equipamento tem menor disponibilidade, devido ao menor MTTF, isso resulta em maiores impactos no ponto de vista do fluxo de energia, conforme destacado.

A Figura 21 mostra a relação do impacto da disponibilidade no fluxo de energia, resultando em menor consumo final de energia pela arquitetura. A primeira barra mais escura do gráfico mostra o consumo de energia da arquitetura A1 sem integração com a disponibilidade. A segunda barra corresponde aos resultados alcançados assumindo o impacto da disponibilidade no fluxo de energia.

A partir da terceira barra, reduzimos o MTTF do dispositivo UPS. Por exemplo, essa terceira barra reduziu o MTTF de 50000 para 40000 horas. Da mesma forma, também aplicamos essa redução nas outras barras. Assumindo os resulta-

Comparação da energia quando a disponibilidade afeta o fluxo energético - Arquitetura A2.

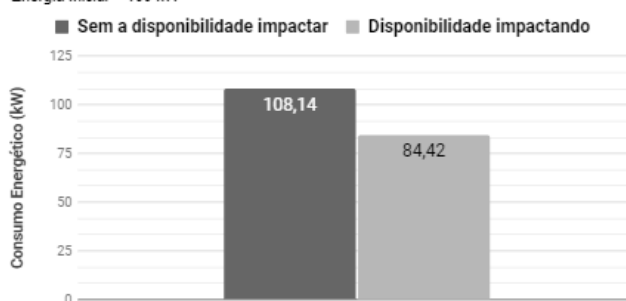
Energia Inicial = 100 kW



(a) Consumo energético - Arquitetura A2

Comparação da energia quando a disponibilidade afeta o fluxo energético - Arquitetura A3.

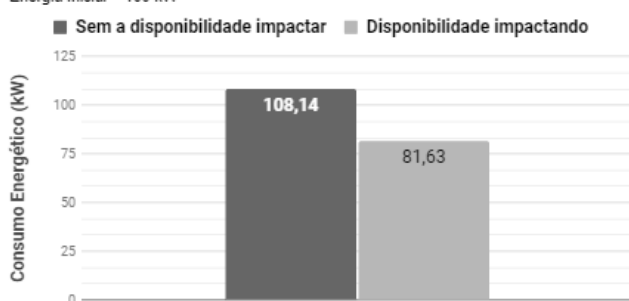
Energia Inicial = 100 kW



(b) Consumo energético - Arquitetura A3

Comparação da energia quando a disponibilidade afeta o fluxo energético - Arquitetura A4.

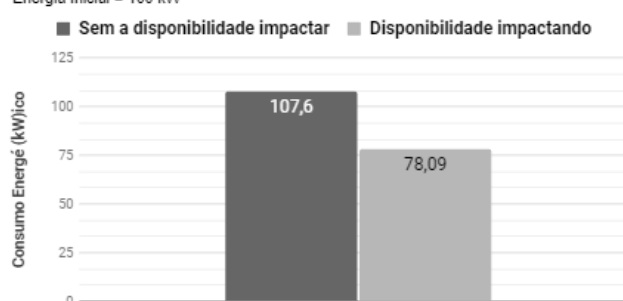
Energia Inicial = 100 kW



(c) Consumo energético - Arquitetura A4

Comparação da energia quando a disponibilidade afeta o fluxo energético - Arquitetura A5.

Energia Inicial = 100 kW



(d) Consumo energético - Arquitetura A5

Figure 20. Consumo energético da arquitetura A2 à A5.

Energia consumida pela arquitetura A1 levando em consideração a mudança do MTTF do UPS

Energia Inicial = 100 kW

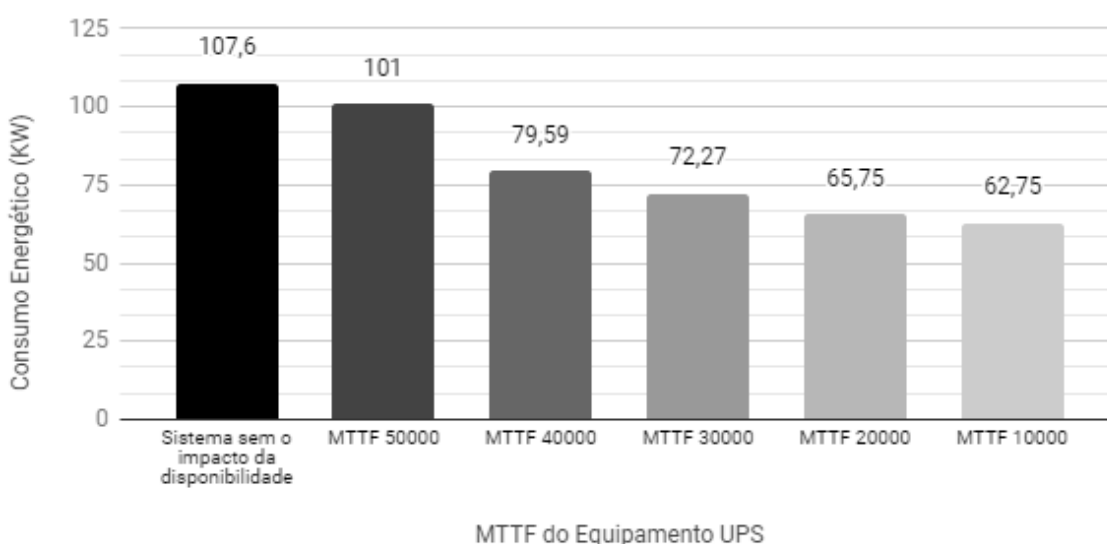


Figure 21. Consumo Energético - Arquitetura A1.

dos alcançados, a disponibilidade reduziu o consumo de energia do primeiro caso (barra preta na Figura 21) de 107,6kW

para 62,75kW. Portanto, isso mostra o alto impacto que a disponibilidade pode ter no fluxo de energia do sistema.

7.2 Observações finais

Os experimentos realizados mostraram a aplicabilidade dos modelos e abordagens propostas, nos quais a energia consumida pela infraestrutura do *data center* foi impactada devido à disponibilidade do sistema. Nosso segundo estudo de caso teve esse foco, para mostrar essa diferença. Por exemplo, os resultados apresentados na Figura 21 mostraram que a variação do MTTF de um dispositivo (por exemplo, UPS) afeta o consumo de energia do sistema. Isso aconteceu devido ao fato de, assumindo que o dispositivo não está operacional, o sistema não consumirá a mesma quantidade de energia durante esse período, pois, se o ambiente conseguir suportar a mesma carga de energia, ele pode variar o consumo em função da eficiência energética dos caminhos redundantes diferentes em cada equipamento, o que afeta a energia total consumida.

Além disso, considerando os resultados mostrados na Figura 20, podemos ver que, assumindo os cenários com caminhos redundantes, a falha de um dispositivo em um caminho redireciona o fluxo de energia apenas para o caminho disponível, o que pode afetar a energia consumida

8. Conclusão

Para possibilitar que serviços oferecidos aos usuários da *Internet* atinssem um nível aceitável de disponibilidade, as empresas que gerenciam grandes *data centers* tiveram que se adaptar à nova realidade, visto que nos últimos anos, verificou-se um aumento gradativo de usuários a procura de tais serviços. Contudo, essa adaptação pode gerar custos operacionais extras. É essencial que os projetistas possam antecipar os valores dessas adaptações e, analisar se essas adaptações aumentaram, de fato, o nível de disponibilidade.

Portanto, este trabalho propôs uma estratégia integrada e dinâmica, demonstrando o impacto na disponibilidade dos equipamentos que compõem as arquitetura de *data center* no consumo de energia. A estratégia leva em consideração uma técnica de modelagem com CPN para quantificar custo, impacto ambiental e disponibilidade da infraestrutura elétrica do *data center*.

Neste sentido, a partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o uso de estratégias na criação de modelos para quantificar o custo e verificar a disponibilidade do *data center* antes da construção real, pode permitir que os projetistas estimem o consumo de energia, como também, possibilita a avaliação da disponibilidade. Como futuros direcionamentos, espera-se estender os modelos propostos em CPN para adicionar novas funcionalidades como, por exemplo, quantificar o consumo energético de serviços hospedados nos *data centers*.

Além disso, outro direcionamento possível dessa pesquisa se trata da quantificação do impacto da indisponibilidade de energia no sistema *data center*.

9. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FACEPE pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Author contributions

Thiago Valentim Bezerra foi o autor principal do trabalho, responsável pela construção dos modelos em CPNs e validação dos resultados. Wenderson de Souza Leonardo contribuiu com a criação da ferramenta proposta no trabalho. Gabriel Álves de Albuquerque Junior ajudou na concepção dos modelos CPNs e foi responsável pela revisão do trabalho. Gustavo Rau de Almeida Callou foi o orientador do trabalho, contribuindo na criação dos Modelos CPNs propostos e na orientação da metodologia, bem como na revisão do trabalho.

Referências

- [1] KEMP, S. Digital 2020: 3.8 billion people use social media. *We are social*, 2020.
- [2] CHANGCHIT, C.; CHUCHUEN, C. Cloud computing: An examination of factors impacting users' adoption. *Journal of Computer Information Systems*, Taylor & Francis, v. 58, n. 1, p. 1–9, 2018.
- [3] LAWLER, J.; JOSEPH, A.; HOWELL-BARBER, H. H.-B. A case study of determinants of an effective cloud computing strategy. *Review of Business Information Systems (RBIS)*, v. 16, n. 3, p. 145–156, 2012.
- [4] MELL, P.; GRANCE, T. Draft nist working definition of cloud computing. *Referenced on June. 3rd*, v. 15, n. 32, p. 2, 2009.
- [5] UZAMAN, S. K. et al. A systems overview of commercial data centers: initial energy and cost analysis. *International Journal of Information Technology and Web Engineering (IJITWE)*, IGI Global, v. 14, n. 1, p. 42–65, 2019.
- [6] POESS, M.; NAMBIAR, R. O. Energy cost, the key challenge of today's data centers: A power consumption analysis of tpc-c results. *Proc. VLDB Endow.*, VLDB Endowment, v. 1, n. 2, p. 1229–1240, ago. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14778/1454159.1454162>.
- [7] BUYYA, R.; VECCHIOLA, C.; SELVI, S. T. *Mastering Cloud Computing: Foundations and Applications Programming*. 1st. ed. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2013.
- [8] CALLOU, G. et al. Energy consumption and execution time estimation of embedded system applications. *Microprocessors and Microsystems*, Elsevier, v. 35, n. 4, p. 426–440, 2011.
- [9] ANDRADE, E. et al. Availability modeling and analysis of a disaster-recovery-as-a-service solution. *Computing*, Springer, p. 1–26, 2017.

- [10] TALEBBERROUANE, M.; KHAN, F.; LOUNIS, Z. Availability analysis of safety critical systems using advanced fault tree and stochastic petri net formalisms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, v. 44, p. 193–203, 2016.
- [11] MELO, C. et al. Capacity-oriented availability model for resources estimation on private cloud infrastructure. In: IEEE. *Dependable Computing (PRDC), 2017 IEEE 22nd Pacific Rim International Symposium on*. [S.l.], 2017. p. 255–260.
- [12] ROCHA, É. et al. Analyzing the impact of power infrastructure failures on cloud application availability. In: IEEE. *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2017 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 1746–1751.
- [13] LIU, Y. et al. A colored generalized stochastic petri net simulation model for service reliability evaluation of active-active cloud data center based on it infrastructure. In: IEEE. *2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*. [S.l.], 2017. p. 51–56.
- [14] SAMPAIO, A. M.; BARBOSA, J. G. A comparative cost analysis of fault-tolerance mechanisms for availability on the cloud. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, Elsevier, v. 19, p. 315–323, 2018.
- [15] FERREIRA, J. et al. An algorithm to optimise the energy distribution of data centre electrical infrastructures. *International Journal of Grid and Utility Computing*, Inderscience Publishers (IEL), v. 11, n. 3, p. 419–433, 2020.
- [16] VALENTIM, T.; CALLOU, G. A model-based strategy for quantifying the impact of availability on the energy flow of data centers. *The Journal of Supercomputing*, Springer, p. 1–24, 2020.
- [17] HEADQUARTERS, A. Cisco data center infrastructure 2.5 design guide. *Cisco Validated Design I. Cisco Systems, Inc*, 2007.
- [18] MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989.
- [19] MILNER, R. *The definition of standard ML: revised*. [S.l.]: MIT press, 1997.
- [20] JENSEN, K.; KRISTENSEN, L. M.; WELLS, L. Coloured petri nets and cpn tools for modelling and validation of concurrent systems. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, Springer, v. 9, n. 3-4, p. 213–254, 2007.
- [21] JENSEN, K. A brief introduction to coloured petri nets. In: SPRINGER. *International Workshop on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*. [S.l.], 1997. p. 203–208.
- [22] JENSEN, K.; KRISTENSEN, L. M. *Coloured Petri nets: modelling and validation of concurrent systems*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- [23] CALLOU, G. R. d. A. *Assessment to support the planning of sustainable data centers with high availability*. [S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 2013.
- [24] AVIZIENIS, A. et al. *Fundamental concepts of dependability*. [S.l.]: University of Newcastle upon Tyne, Computing Science, 2001.
- [25] DINCER, I. Thermodynamics, exergy and environmental impact. *Energy sources*, Taylor & Francis, v. 22, n. 8, p. 723–732, 2000.
- [26] SCHMIDT, D. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 41, n. 3, p. 331–336, 2009.
- [27] AVELAR, V. Comparing availability of various rack power redundancy configurations. *APC White Paper*, v. 48, p. 1–22, 2003.
- [28] IEEE Gold Book 473, Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. [S.l.: s.n.], 2010.
- [29] HEWLETT-PACKARD. *Hp power advisor tool*. 2013. (<http://h18004.www1.hp.com/products/solutions/power>).