

Luiz Nelson dos Santos Lima
Orientador: Francisco Airton Silva

Análise de Dependabilidade e Medidas de Recuperação de Desastres em Sistemas Hospitalares Inteligentes

Picos - PI
13 de junho de 2025

Luiz Nelson dos Santos Lima
Orientador: Francisco Airton Silva

Análise de Dependabilidade e Medidas de Recuperação de Desastres em Sistemas Hospitalares Inteligentes

Modelo de Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharelado em Sistemas de Informação na Universidade Federal do Piauí. Este modelo está em conformidade com as normas ABNT.

Universidade Federal do Piauí
Campus Senador Helvídio Nunes de Barros
Bacharelado em Sistemas de Informação

Picos - PI
13 de junho de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Serviço de Processamento Técnico da Universidade Federal do Piauí
Biblioteca José Albano de Macêdo

L732a Lima, Luiz Nelson dos Santos.

Análise de dependabilidade e medidas de recuperação de desastres em sistemas hospitalares inteligentes / Luiz Nelson dos Santos Lima – 2025.
48 f.

1 Arquivo em PDF

Indexado no catálogo *online* da biblioteca José Albano de Macêdo-CSHNB
Aberto a pesquisadores, com restrições da Biblioteca

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Piauí, Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação, Picos, 2025.
“Orientador: Francisco Airton Silva”

1. Sistemas automatizados. 2. Recuperação da informação. 3. Tecnologias hospitalares. I. Lima, Luiz Nelson dos Santos. II. Silva, Francisco Airton. III. Título.

CDD 005

Elaborada por Maria Leticia Cristina Alcântara Gomes
Bibliotecária CRB n° 03/1835

ANÁLISE DE DEPENDABILIDADE E MEDIDAS DE RECUPERAÇÃO DE DESASTRES
EM SISTEMAS HOSPITALARES INTELIGENTES

LUIZ NELSON DOS SANTOS LIMA

Monografia aprovada como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas
de Informação.

Data de Aprovação

Picos – PI, 24 de junho de 2025

Documento assinado digitalmente
 FRANCISCO AIRTON PEREIRA DA SILVA
Data: 23/06/2025 11:35:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Francisco Airtton Pereira da Silva

Documento assinado digitalmente
 ISRAEL CARDOSO ARAUJO
Data: 23/06/2025 11:45:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Israel Cardoso Araújo

Documento assinado digitalmente
 ALAN RAFAEL FERREIRA DOS SANTOS
Data: 25/06/2025 12:24:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Alan Rafael Ferreira dos Santos

Agradecimentos

Esta conquista é, antes de tudo, um testemunho da força que Deus me concedeu para superar todos os desafios. A jornada até aqui foi marcada pela luta, pelas incertezas, mas em cada obstáculo, encontrei a fé necessária para seguir em frente. Meu eterno reconhecimento se estende à minha família, o alicerce seguro sobre o qual construí tudo que sou. Aos meus pais, Luiz e Leidiane, minha gratidão vai além das palavras. Devo a vocês não apenas o apoio incondicional e os sábios conselhos que me guiaram, mas a própria formação do meu caráter e a crença de que eu era capaz. Vocês foram meu porto seguro. A força que possuo foi moldada pelo amor de quatro mulheres incríveis: minha mãe, por seu cuidado infinito e incansável; minhas avós, Neusa e Manoelina, por todo o carinho e prestatividade que me fizeram sentir amparado; e minha tia Socorro, que sempre me acolheu e se preocupou comigo. Agradeço também aos meus primos mais próximos: Willian, Bruna e Daiane, por toda a preocupação, pelas risadas e pelos momentos de leveza que foram essenciais para aliviar a pressão.

Há amigos que a vida, generosamente, transforma em irmãos. Arthur Sabino e Vandirleya Barbosa, vocês são a prova disso. Tornaram-se os irmãos que eu não tive, e em cada dificuldade encontrei em vocês uma parceria verdadeira e forte; em cada vitória, uma celebração sincera. Tenho um profundo carinho e apreço por vocês (e, depois de mim, são as duas pessoas mais teimosas que conheço kkk). Vocês me inspiram a ser melhor e a retribuir o bem que recebo. Sentimento que se estende a Naelly (Chatanaelly) e João Neto, sou imensamente grato por cada momento, pelas risadas, brincadeiras e por uma amizade tão genuína. A todos os meus familiares que, de perto ou de longe, contribuíram de alguma forma — seja com apoio emocional, espiritual ou financeiro —, minha eterna gratidão.

Nesta jornada, construí amizades que se tornaram pilares. Aos amigos do grupo "Os Miúdos", meu carinho e gratidão sempre. Passamos juntos por tantos "perrengues" que a vida adulta e acadêmica nos impõe. E, ao mesmo tempo, criamos nossas próprias alegrias, tornando tudo mais suportável e divertido. Obrigado por isso! Ao professor Airton, agradeço imensamente pelo acolhimento, pelos conselhos e pelas valiosas conversas que transcenderam a academia e me guiaram como mentor. Da mesma forma, a Leonel (Perrigo), um grande e inesperado amigo que ganhei no grupo do PASID e que é um cara sem palavras, obrigado, meu palhaço.

Esta monografia, portanto, transcende o papel de um trabalho acadêmico; ela é o registro de uma história de luta e superação, a minha história. Cada página carrega não apenas a minha energia, mas a de todos que estiveram comigo. Este trabalho materializa o fim de um ciclo, mas a força coletiva que ele representa é o que me impulsionará para os próximos. Por isso, a todos vocês, meus amigos: STAY ALIVE!

Sonho que se sonha só, é só um sonho que se sonha só. Mas sonho que se sonha junto é realidade.

Raul Seixas

Resumo

A Internet das Coisas Médicas (IoMT) tem ganhado relevância na era da saúde digital. A pandemia do Coronavírus (COVID-19) colocou uma pressão sem precedentes nos sistemas de saúde, destacando a necessidade de inovações e pesquisas voltadas para a IoMT. A sobrecarga em Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) tornou-se um problema crítico. A pandemia acelerou a pesquisa e o desenvolvimento nesta área, impulsionados pela demanda crescente por serviços médicos confiáveis e sustentáveis, mesmo diante de falhas frequentemente imprevisíveis na infraestrutura. As infraestruturas de saúde inteligentes enfrentam obstáculos significativos em termos de garantir disponibilidade e confiabilidade, particularmente quando ocorrem falhas ou desastres nos servidores locais. Interrupções imprevistas em qualquer componente da infraestrutura de TI médica, desde um sistema de energia em uma localização remota até sistemas de computação locais em um hospital inteligente, podem levar a falhas críticas nos serviços de monitoramento médico. Essas falhas podem ter implicações sérias, incluindo a perda de vidas, que pode ser fatal nos casos mais extremos. Esta monografia apresenta a proposta de quatro modelos de Redes de Petri Estocásticas (SPN) que permitem identificar os componentes mais críticos de um sistema de hospital inteligente com e sem recuperação de desastres. Por meio de uma análise de dependabilidade foi possível identificar qual dos sistemas tem maior disponibilidade e confiabilidade. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade para identificar quais elementos do sistema tem maior impacto na disponibilidade. Dessa forma, esta monografia tem o potencial de auxiliar arquitetos de sistemas no desenvolvimento de arquiteturas distribuídas, levando em consideração pontos de falha e medidas de recuperação em hospitais inteligentes.

Palavras-chaves: Internet das Coisas, Hospital Inteligente, Recuperação de Desastres, Confiabilidade, Disponibilidade.

Abstract

The Internet of Medical Things (IoMT) has gained significant relevance in the era of digital health. The Coronavirus (COVID-19) pandemic placed unprecedented pressure on healthcare systems, highlighting the need for innovations and research focused on IoMT. The overload of Wireless Sensor Networks (WSNs) has become a critical issue. The pandemic accelerated research and development in this area, driven by the growing demand for reliable and sustainable medical services, even in the face of often unpredictable infrastructure failures. Smart healthcare infrastructures face significant challenges in ensuring availability and reliability, particularly during server failures or disasters affecting local infrastructure. Unexpected disruptions in any component of the medical IT infrastructure—ranging from a power system in a remote location to local computing systems in a smart hospital—can lead to critical failures in medical monitoring services. Such failures may have serious implications, including loss of life, which can be fatal in the most extreme cases. This monograph presents a proposal of four Stochastic Petri Net (SPN) models that enable the identification of the most critical components in a smart hospital system, both with and without disaster recovery. Through a dependability analysis, it was possible to determine which of the systems offers greater availability and reliability. Additionally, a sensitivity analysis was conducted to identify which system elements have the greatest impact on availability. In this way, this monograph has the potential to assist system architects in developing distributed architectures that take into account failure points and recovery measures in smart hospitals.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Componentes SPNs.	16
Figura 2 – Modelos SPN de dependabilidade genéricos.	17
Figura 3 – Exemplo genérico de gráfico de efeito dos fatores	19
Figura 4 – Gráficos de interação genéricos.	20
Figura 5 – Arquitetura do Sistema	24
Figura 6 – Modelo Sem Recuperação de Desastres.	27
Figura 7 – Modelo com Recuperação de Desastre	30
Figura 8 – Modelo de Confiabilidade.	31
Figura 9 – Impacto dos fatores nos dois estudos de caso	34
Figura 10 –Interação entre os fatores e seu impacto no sistema sem recuperação de desastres	36
Figura 11 –Interação entre os fatores e seu impacto no sistema com recuperação de desastres	38
Figura 12 –Resultados de disponibilidade dos dois estudos de caso	40
Figura 13 –Resultados da Confiabilidade do Sistema Com e Sem Medidas de Re- cuperação de Desastres	41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados	21
Tabela 2 – Expressões de guarda para o modelo	27
Tabela 3 – Expressões de guarda para o modelo	30
Tabela 4 – Parâmetros de entrada para os modelos propostos	32
Tabela 5 – Tabela de Design	33
Tabela 6 – Tabela de Combinação	35

Lista de abreviaturas e siglas

IoT	Internet das Coisas
IoMT	Internet das Coisas Médicas
SPN	Redes de Petri Estocásticas
RSSF	Redes de Sensores sem Fio
TI	Tecnologia da Informação
EHR	Registro Eletrônico de Saúde
DoE	Design de Experimentos
MTTF	Tempo Médio para Falha
MTTR	Tempo Médio para Reparo
CS	Servidor em Nuvem
ES	Servidor de Borda Principal (Edge Server)
ESR	Servidor de Borda em Espera
PG	Rede Elétrica
PS	Controlador de Energia
IN	Inversor de Energia Solar
CC	Controle de Carga
BS	Armazenamento em Bateria
SP	Painel Solar
EDG	Gerador de Energia
GT	Gateway
SV	Supervisor
RT	Roteador
B	Quarto – Leitos

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Objetivos	13
2	Justificativa	14
3	Referencial Teórico	15
3.1	Hospitais Inteligentes	15
3.2	Redes de Petri Estocásticas	15
3.3	Dependabilidade	16
3.4	Recuperação de Desastres	17
3.5	Análise de sensibilidade com DoE	18
4	Trabalhos Relacionados	21
5	Arquitetura do Sistema	24
6	Modelagem Proposta	26
6.1	Modelos de Disponibilidade	26
6.1.1	Modelo Sem Recuperação de Desastres	26
6.1.2	Modelo com Recuperação de Desastres	29
6.2	Modelo de Confiabilidade	30
7	Análise de Resultados	32
7.1	<i>Design of Experiments</i>	32
7.1.1	Sem Recuperação de Desastres	33
7.1.2	Com Recuperação de Desastres	37
7.2	Disponibilidade	38
7.3	Confiabilidade	39
7.3.1	Discussão de Resultados	41
8	Conclusão	43
9	Publicações	44
	Referências	46

1 Introdução

A pandemia da COVID-19 gerou uma crise global sem precedentes, sobrecarregando os sistemas de saúde e evidenciando limitações estruturais, especialmente em ambientes altamente dependentes de tecnologia. Redes de Sensores sem Fio (RSSF), amplamente utilizadas no monitoramento e tratamento médico, foram particularmente pressionadas. Diante disso, intensificou-se a busca por soluções mais robustas e resilientes, com destaque para a Internet das Coisas (IoT), cuja infraestrutura permite o processamento, armazenamento e acesso remoto a informações por meio de dispositivos inteligentes conectados à Internet (ABDULKAREEM et al., 2021; BRADLEY et al., 2015). A aplicação da IoT na área médica impulsionou o desenvolvimento da Internet das Coisas Médicas (IoMT), um campo emergente com grande potencial para otimizar a eficácia do monitoramento remoto da saúde (SRIVASTAVA et al., 2022).

Nesse cenário, a infraestrutura elétrica desempenha papel crítico para sustentar a operação contínua de sistemas baseados em IoMT. A confiabilidade energética é essencial para permitir monitoramento ininterrupto, posicionamento flexível dos dispositivos, redução da intervenção humana e maior facilidade de manutenção (AMMAR et al., 2022). Em hospitais inteligentes, é imprescindível que a infraestrutura elétrica seja concebida com redundância e mecanismos de segurança capazes de mitigar falhas rapidamente. Para isso, é necessário integrar sistemas de energia solar, baterias, geradores e redes elétricas convencionais, de forma que atendam às exigências de disponibilidade e resposta imediata em contextos emergenciais (BURIAN; GONTIJO; ALVAREZ, 2019). Além disso, estratégias de baixo custo e com eficiência energética são fundamentais para viabilizar essas soluções de maneira sustentável.

A saúde inteligente abrange o uso combinado de tecnologias como IoT, redes móveis, computação em nuvem, big data, 5G, inteligência artificial e biotecnologia (ALSHEHRI; MUHAMMAD, 2020). A infraestrutura desses ambientes inclui: (i) sensores sem fio para o monitoramento remoto de pacientes; (ii) dispositivos de rede, como gateways e roteadores, para transmissão de dados; (iii) plataformas de processamento local e em nuvem para análise em tempo real; e (iv) dispositivos médicos inteligentes conectados à IoT, como bombas de infusão e monitores de sinais vitais (SILVA et al., 2022). A operação contínua desses recursos é vital para uma resposta rápida e eficaz em situações críticas, onde a confiabilidade da informação é determinante para decisões médicas seguras (RODRIGUES et al., 2021).

A infraestrutura computacional hospitalar precisa operar com elevada precisão e agilidade. Em momentos de grande demanda, a capacidade de um único servidor local pode não ser suficiente, tornando essencial o suporte de servidores em nuvem, que permitem o acesso remoto e a continuidade do atendimento em condições adversas. A computa-

ção em nuvem, portanto, oferece uma base resiliente para o armazenamento de dados e execução de serviços sob demanda (SOOKHAK et al., 2015). Complementarmente, a computação de borda destaca-se pela sua baixa latência e sensibilidade ao contexto, sendo indispensável em sistemas de saúde inteligentes, onde decisões devem ser tomadas com agilidade (ISLAM et al., 2021). A falha de um servidor de borda pode comprometer seriamente o sistema, tornando essencial a presença de servidores de backup que assegurem a continuidade do serviço em caso de falhas.

Apesar dos avanços trazidos pela IoMT, os desafios relacionados à confiabilidade e à disponibilidade das infraestruturas de TI hospitalares ainda são expressivos. Interrupções inesperadas, especialmente em cenários de desastres, podem ter consequências fatais. Por isso, é necessário que essas infraestruturas sejam projetadas com foco em tolerância a falhas. A modelagem de confiabilidade e disponibilidade é uma abordagem eficaz para quantificar os impactos de eventos adversos, permitindo projetar sistemas mais robustos sem a necessidade de implementações físicas imediatas. Isso proporciona uma base sólida para o planejamento de soluções resilientes, sustentáveis e eficazes para hospitais inteligentes.

1.1 Objetivos

Esta monografia analisa a confiabilidade e propõe medidas de recuperação de desastres para sistemas inteligentes utilizados em ambientes hospitalares. Para isso, são utilizados modelos baseados em Redes de Petri Estocásticas (SPN), capazes de avaliar a disponibilidade e confiabilidade do sistema frente a falhas de hardware, software, ocorrência de desastres e estratégias de recuperação.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver quatro modelos SPN — dois para análise de disponibilidade e dois para confiabilidade — permitindo a comparação entre cenários com e sem estratégias de recuperação de desastres em sistemas hospitalares inteligentes.
- Projetar e incorporar mecanismos de recuperação de desastres nos modelos SPN, avaliando seu impacto na continuidade operacional e na manutenção dos serviços de saúde críticos.
- Aplicar a técnica de *Design of Experiments* (DoE) para identificar e priorizar os componentes com maior influência sobre a disponibilidade e a confiabilidade, contribuindo para a otimização do sistema por meio de intervenções direcionadas.

2 Justificativa

Os sistemas hospitalares inteligentes desempenham um papel fundamental na garantia de acesso rápido a informações médicas críticas, como registros de pacientes e resultados de exames, para evitar atrasos no tratamento e erros médicos, salvaguardando, em última instância, a vida dos pacientes (MOHANTY; MOHAPATRA; MOHANTY, 2024; LORIA; NAYAK; NISHIT, 2024). Interrupções na disponibilidade podem resultar em atrasos no tratamento, erros médicos e colocar em risco a vida dos pacientes. Além disso, a confiabilidade desses sistemas é essencial para assegurar a integridade e precisão dos dados, fundamentando decisões clínicas em informações confiáveis e evitando diagnósticos errôneos, prescrições inadequadas e outras consequências adversas para os pacientes.

A implementação de um plano de recuperação de desastres é essencial para os hospitais mitigarem os impactos de eventos imprevistos, como falhas de hardware, ataques cibernéticos ou desastres naturais (PFENNINGER; KÖNIGSDORFER, 2024). 96% dos hospitais implementaram apenas parcialmente planos de contingência abrangentes para garantir a prestação de cuidados seguros quando os sistemas de TI falham (MARTIN et al., 2019). Dessa maneira, ao avaliar a disponibilidade e confiabilidade desses sistemas com uma abordagem de recuperação de desastres, os hospitais podem garantir uma resposta rápida e eficaz a emergências, minimizando o tempo de inatividade e protegendo a continuidade dos serviços de saúde.

Portanto, a avaliação contínua da disponibilidade e confiabilidade em sistemas hospitalares inteligentes, com ou sem recuperação de desastres, é crucial para garantir a conformidade com regulamentações de saúde e o processamento correto de dados. A justificativa desta monografia baseia-se na necessidade de avaliar a confiabilidade e disponibilidade contínua dos sistemas hospitalares, fortalecendo não apenas a segurança dos pacientes, mas também protegendo a reputação e a credibilidade das instituições de saúde a longo prazo. Essa avaliação contínua pode garantir que os sistemas estejam sempre preparados para enfrentar os desafios do ambiente de saúde em constante evolução, oferecendo o melhor atendimento possível aos pacientes.

3 Referencial Teórico

Nesta seção, serão apresentados os principais conceitos essenciais que servirão como base para uma compreensão aprofundada da proposta desta monografia. Os conceitos incluem hospitais inteligentes, SPNs, recuperação de desastres, dependabilidade e análise de sensibilidade com DoE.

3.1 Hospitais Inteligentes

Hospital inteligente é o conceito utilizado para se referir a hospitais digitalizados que contam com processos automatizados e otimizados baseados em IoT (RODRIGUES et al., 2021). Os hospitais inteligentes representam uma evolução significativa na prestação de serviços de saúde, integrando tecnologias avançadas para aprimorar a eficiência, a segurança e a qualidade do atendimento ao paciente. A integração da IoT em hospitais inteligentes permite a coleta em tempo real de dados provenientes de dispositivos médicos, sensores e equipamentos hospitalares, possibilitando o monitoramento contínuo do estado de saúde dos pacientes e a gestão eficiente de recursos. Por meio da IoT, é viável implementar sistemas de monitoramento remoto, rastreamento de ativos hospitalares e controle de temperatura em ambientes sensíveis, contribuindo para a prevenção de infecções e a segurança do paciente.

Os Hospitais Inteligentes permitem a criação de novos tratamentos, mais precisos e com maior riqueza de informação (RODRIGUES et al., 2021). A automação desempenha um papel fundamental na eficiência operacional dos hospitais inteligentes, agilizando processos como agendamento de consultas, triagem de pacientes, preparação de medicamentos e gestão de inventário. Sistemas automatizados de registro eletrônico de saúde (EHR) simplificam o acesso às informações do paciente, promovendo uma comunicação mais eficaz entre profissionais de saúde e melhorando a coordenação do cuidado. A implementação bem-sucedida de hospitais inteligentes não apenas melhora a experiência do paciente e a qualidade do atendimento, mas também contribui para a redução de custos operacionais, o aumento da eficiência dos processos e a sustentabilidade do sistema de saúde na totalidade.

3.2 Redes de Petri Estocásticas

As SPNs consistem em duas seções: a seção estrutural, que define a topologia do modelo com lugares, transições e conexões, e a seção de dados (ou parâmetros), que especifica informações estocásticas, como taxas de transição e probabilidades de disparo, para

descrever o comportamento probabilístico do sistema. As redes de Petri são ferramentas usadas para analisar sistemas com concorrência e sincronização (MARSAN, 1990; PETRI, 1962; REISIG, 1985; PETERSON, 1981). As SPNs podem ser identificadas como um grafo direcionado dividido em duas partes, preenchidas com quatro tipos de objetos. Esses objetos são lugares, transição, token e arcos direcionados que conectam lugares a transições e transições a lugares (RODRIGUES et al., 2020). A Figura 1 mostra os componentes que representam uma SPN.

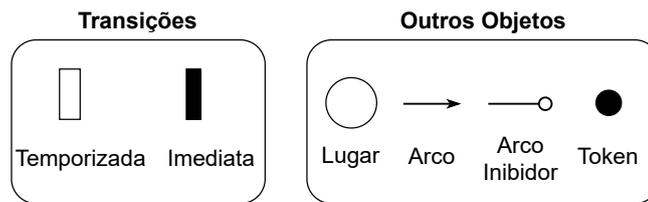


Figura 1 – Componentes SPNs.

As transições são classificadas conforme o atraso entre a habilitação e o disparo de uma transição; tal atraso pode estar ausente (uma transição imediata), determinístico ou amostrado a partir de uma distribuição dada (estocástico). Ao disparar, uma transição remove um token de sua localização de entrada e o deposita em sua localização de saída (VOLOVOI, 2006). Por outro lado, as transições imediatas são disparadas instantaneamente, sem qualquer período de espera. Círculos brancos simbolizam a representação de lugares, e setas simbolizam arcos para estabelecer conexões entre lugares e transições. Arcos inibitórios são simbolizados por uma linha com uma pequena bola branca na extremidade, onde podem bloquear ou permitir o fluxo de tokens de um lugar para outro. Um token simbolizado por uma pequena bola preta também é atribuído a um lugar específico. O token representa os dados ou objetos que transitam no sistema. Em modelos de SPNs que avaliam a disponibilidade e confiabilidade do sistema, o conceito de componentes ativos e inativos desempenha um papel crucial.

3.3 Dependabilidade

Avaliação da dependabilidade está relacionada ao estudo do efeito de erros, defeitos e falhas no sistema, uma vez que estes provocam um impacto negativo nos atributos de dependabilidade. Uma falha é definida como a falha de um componente, subsistema ou sistema que interage com o sistema em questão (MACIEL et al., 2012). Um erro é definido como um estado que pode levar a ocorrência de uma falha. Um defeito representa o desvio do funcionamento correto de um sistema. A avaliação de dependabilidade denota a capacidade que um sistema tem de oferecer um serviço de forma confiável. As medidas de dependabilidade são confiabilidade e disponibilidade, manutenibilidade, performabilidade, segurança, testabilidade, confidencialidade e integridade (LAPRIE; AVIZIENIS;

KOPETZ, 1992). Os modelos SPN proporcionam grande flexibilidade na representação de aspectos de dependabilidade.

A Figura 2a apresenta um exemplo genérico de um modelo de SPNs para disponibilidade. Se houver um token em `componente_ativo`, significa que o componente está em funcionamento. O componente entra em um estado de falha se a transição `evento_falha` estiver habilitada. Um token é disparado para a localização `componente_inativo`, representando que o componente está indisponível. Essa transição é modelada de acordo com um processo estocástico (geralmente seguido por uma distribuição exponencial) definido pelo parâmetro tempo médio para falha (MTTF). A transição `evento_reparo` representa o reparo, definido pelo tempo médio para reparo (MTTR). Neste exemplo, a disponibilidade do componente é a probabilidade de pelo menos um token em `componente_ativo`. A Figura 2b apresenta um modelo genérico para confiabilidade. A diferença com o modelo de disponibilidade é a remoção do componente `evento_reparo`. Os outros componentes do modelo seguem o mesmo fluxo. Neste contexto, o modelo de confiabilidade visa representar o funcionamento contínuo do sistema ou componente sem considerar a possibilidade de reparos, ou manutenção.

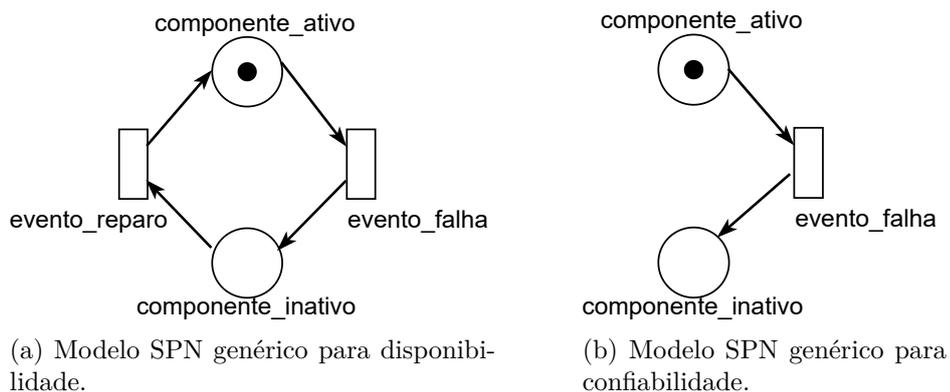


Figura 2 – Modelos SPN de dependabilidade genéricos.

3.4 Recuperação de Desastres

A recuperação de desastres consiste em um conjunto de políticas, estratégias, ferramentas e procedimentos voltados à restauração e manutenção da operação de infraestruturas tecnológicas e sistemas essenciais após a ocorrência de eventos disruptivos, sejam eles naturais — como terremotos, incêndios e inundações — ou provocados por falhas técnicas e ataques cibernéticos (ANDRADE; NOGUEIRA, 2020). Em contextos críticos, como sistemas de saúde e gerenciamento de tráfego, nos quais decisões devem ser tomadas em tempo real, a resiliência operacional é fundamental. Por isso, sistemas baseados em IoT devem ser projetados com mecanismos robustos de tolerância a falhas, nos quais as estratégias de recuperação de desastres desempenham papel central.

A implementação eficaz dessas estratégias envolve ações coordenadas para proteger, replicar e restaurar dados, serviços e recursos de infraestrutura de TI, para reduzir o tempo de inatividade e mitigar impactos financeiros, operacionais e humanos. Em ambientes de saúde inteligente, onde a interrupção de sistemas pode comprometer vidas, a recuperação rápida é vital para assegurar a continuidade dos serviços. Além de sua função operacional, a recuperação de desastres está intrinsecamente relacionada à sustentabilidade e à conformidade regulatória das instituições. Prover mecanismos de resposta ágeis e estruturados frente a falhas permite às organizações manterem sua integridade, protegerem seus ativos digitais e se adaptarem a um cenário tecnológico cada vez mais sujeito a riscos. Dessa forma, a recuperação de desastres deixa de ser apenas uma medida reativa e assume um papel estratégico na gestão de sistemas críticos.

3.5 Análise de sensibilidade com DoE

A análise de sensibilidade consiste em uma abordagem sistemática utilizada para investigar como as respostas de um modelo reagem a variações extremas nos valores dos parâmetros de entrada ou a alterações significativas em sua estrutura (KLEIJNEN, 1995). Essa técnica pode ser entendida como um conjunto de experimentos nos quais o pesquisador manipula determinadas variáveis ou fatores de entrada com o objetivo de observar o impacto resultante nas saídas do sistema (ARAÚJO et al., 2021). A definição dos parâmetros a serem modificados é feita por meio de um plano experimental bem estruturado, cuja finalidade é maximizar a extração de informações relevantes com o menor número possível de simulações.

Com base nas variações aplicadas aos parâmetros, é possível identificar tendências e padrões no comportamento do sistema, o que auxilia diretamente na identificação de gargalos, na priorização de componentes críticos e na orientação de estratégias de otimização. A literatura especializada apresenta diversas formas de visualizar os resultados obtidos por meio da análise de sensibilidade (FEITOSA et al., 2021; COSTA et al., 2016; SANTOS et al., 2021). Dentre essas formas, destacam-se três tipos principais de representações gráficas: o gráfico de efeito dos fatores, os gráficos de efeitos principais e os gráficos de interação.

O gráfico de efeito dos fatores, por exemplo, é comumente representado por barras dispostas em ordem decrescente de impacto, permitindo identificar de forma clara e objetiva quais fatores exercem maior influência sobre a métrica analisada. Quanto maior a altura da barra, maior o impacto do fator correspondente sobre a variável de saída. A Figura 3 apresenta um exemplo ilustrativo desse tipo de gráfico, no qual são comparados três fatores: A, B e C. Nesse caso, observa-se que o fator C apresenta o maior impacto relativo, seguido pelos fatores A e B.

Os gráficos de efeitos principais desempenham um papel importante na análise de

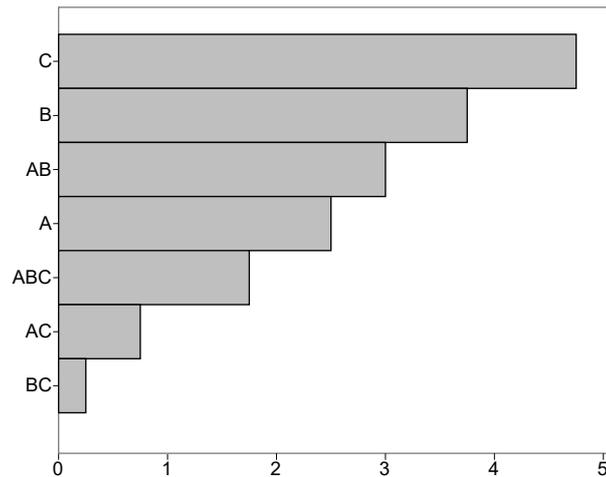
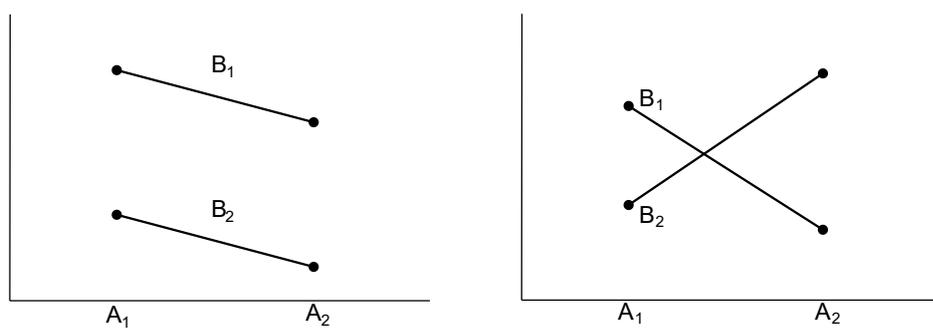


Figura 3 – Exemplo genérico de gráfico de efeito dos fatores

mudanças nos níveis médios de um ou mais fatores. Eles apresentam visualmente a resposta média para cada nível de fator, conectando esses pontos usando linhas. Esse tipo de gráfico é especialmente valioso para comparar o impacto relativo de diferentes fatores. O sinal e a magnitude do ponto de efeito principal são, respectivamente, o valor de resposta média e a intensidade do efeito. Uma inclinação mais acentuada da linha reflete uma maior magnitude do efeito principal, enquanto uma linha horizontal indica a ausência de um efeito principal; isso significa que cada nível de fator afeta a resposta de maneira semelhante. A interação entre os fatores A e B pode ser calculada usando a equação 3.1. $E_{A,B(+1)}$ refere-se ao efeito do fator A quando o fator B está definido em um nível alto. Por outro lado, $E_{A,B(-1)}$ indica o efeito do fator A quando o fator B está em um nível baixo.

$$I_{A,B} = \frac{1}{2} (E_{A,B(+1)} - E_{A,B(-1)}) \quad (3.1)$$

Os gráficos de interação têm o objetivo de identificar interações entre fatores. Uma interação ocorre quando a influência de um determinado fator no resultado é alterada (amplificada ou reduzida) pela variação nos níveis de outro fator. Se as linhas no gráfico forem paralelas, isso indica a ausência de interação entre os fatores. Por outro lado, se as linhas não forem paralelas, é um sinal de uma interação significativa entre os fatores em questão. A Figura 4a representa um exemplo em que não há interações entre os fatores, pois as linhas são paralelas. A Figura 4b exemplifica um caso de interação entre fatores, pois as linhas se intersectam. Neste caso, a mudança sob uma métrica dada para o fator A no nível A1 é maior do que no nível A2. Mudanças nos níveis do fator A para alguma métrica dada indicam uma dependência do fator A nos níveis do fator B.



(a) Gráficos de interação com baixa interação entre fatores

(b) Gráficos de interação com alta interação entre fatores

Figura 4 – Gráficos de interação genéricos.

4 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta uma revisão de literatura relacionada ao contexto do trabalho proposto. Os artigos foram selecionados considerando seis critérios de seleção: contexto, especificação do sistema, tipo de modelo, avaliação de disponibilidade e confiabilidade, e, finalmente, componentes relacionados à energia. A descrição detalhada dos artigos é baseada na classificação dos mesmos. Os trabalhos foram classificados em dois grupos principais com base no contexto. O contexto do estudo é relevante ao considerar em qual setor de hospital inteligente a literatura está mais situada. A Tabela 1 mostra algumas contribuições importantes dos trabalhos relacionados a este estudo, seguidas pelos seus critérios de seleção.

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados

Trabalho	Contexto	Especificação do Sistema	Tipo de Modelo	Disponibilidade	Confiabilidade	Sistema de Energia
(RODRIGUES et al., 2021)	Sistema de Hospital Inteligente	Borda/Nuvem	SPN	✓	✓	×
(SANTOS et al., 2020)	Sistema de Saúde IoT	Névoa, Nuvem	SPN, RBD	✓	×	×
(SANTOS et al., 2022)	Sistema de Saúde IoT	Névoa, Nuvem	SPN, RBD	✓	×	×
(LISBOA et al., 2018)	Sistema de Saúde IoT	Borda, Névoa, Nuvem	SPN, RBD	✓	×	×
(ANDRADE; NOGUEIRA, 2020)	Sistema de Hospital Inteligente	Borda, Nuvem	SPN, RBD	✓	×	×
(NGUYEN et al., 2021b)	Sistema de Hospital Inteligente	Névoa, Nuvem	FT, CTMC	✓	✓	×
(RAHMANI; MIRMAHALEH, 2022)	Sistema de Hospital Inteligente	Borda	CMs	×	✓	✓
(VALENTIM et al., 2023)	Sistema de Saúde IoT	Névoa, Nuvem	SPN	✓	×	×
(STRIELKINA; KHAR-CHENKO; UZUN, 2018)	Sistema de Saúde IoT	Indefinido	CTMC	✓	×	×
(NGUYEN et al., 2021a)	Sistema de Hospital Inteligente	Borda, Névoa	SPN	✓	×	×
(EXEMPLAR; AUTOR, 2023)	Sistema de Hospital Inteligente	Borda, Nuvem	SPN	✓	✓	✓
(HEALTH; EXPERTS, 2024)	Sistema de Hospital Inteligente	Indefinido	Análise Delphi	×	×	×
Esta monografia	Sistema de Hospital Inteligente	Borda, Nuvem	SPN	✓	✓	✓

Sistema de Hospital Inteligente A primeira classificação é descrita conforme os trabalhos que apresentam o contexto do Sistema de Hospital Inteligente. O trabalho de (RODRIGUES et al., 2021) enfatiza a necessidade de tempos de resposta rápidos e disponibilidade constante em hospitais inteligentes. Sugere o uso de Redes de Petri Estocásticas para avaliação de desempenho e disponibilidade desses sistemas, o que poderia melhorar a eficiência operacional e de atendimento. (ANDRADE; NOGUEIRA, 2020) propõem um modelo baseado em Redes de Petri para avaliar a confiabilidade de soluções de recuperação de desastres em infraestruturas críticas de IoT. Este modelo visa ajudar a garantir a disponibilidade e resiliência dessas infraestruturas em situações adversas, fornecendo uma abordagem sistemática para sua análise.

O trabalho de (NGUYEN et al., 2021b) propõe uma metodologia para quantificar a confiabilidade e segurança em uma infraestrutura de IoMT com computação em (nuvem, névoa, borda). Utiliza modelos hierárquicos e considera falhas, incluindo ataques cibernéticos. (RAHMANI; MIRMAHALEH, 2022) propõem uma metodologia para quantificar a confiabilidade e segurança em uma infraestrutura de IoMT com computação em borda. Analisa cinco estudos de caso e quatro cenários operacionais para melhorar a arquitetura de sistemas IoMT no mundo real. O trabalho de (NGUYEN et al., 2021a) propõe um modelo abrangente para avaliar a performabilidade de sistemas de informação médica em hospitais locais. O estudo destaca a importância de técnicas de balanceamento de carga e failover para melhorar a continuidade e a qualidade dos serviços médicos, especialmente em situações de alta demanda, como pandemias.

(EXEMPLAR; AUTOR, 2023) propõem um modelo baseado em Redes de Petri Estocásticas para avaliar desempenho e disponibilidade em sistemas hospitalares inteligentes. O estudo utiliza dados reais e análise sensível com DoE, destacando o impacto positivo da redundância energética na redução de falhas. Já o trabalho de (HEALTH; EXPERTS, 2024) apresenta uma análise prospectiva sobre o futuro dos hospitais inteligentes, com destaque para a adoção de IA, conectividade 5G e sustentabilidade. Apesar de não aplicar modelagem quantitativa, oferece insights relevantes para a evolução de arquiteturas hospitalares robustas e flexíveis.

Sistema de Saúde IoT A segunda classificação é baseada em trabalhos que apresentam o contexto do Sistema de Saúde IoT. A classificação refere-se a trabalhos que focam no monitoramento, não no sistema em si. O trabalho de (SANTOS et al., 2020) destaca a crescente adoção de IoT em cuidados de saúde domiciliares e os desafios associados, como segurança e desempenho. O trabalho enfatiza a importância da disponibilidade do sistema de saúde e apresenta uma abordagem de otimização para maximizar a disponibilidade dentro das restrições orçamentárias. (SANTOS et al., 2022) abordam o uso de tecnologias como computação em névoa e nuvem com IoT para melhorar a disponibilidade de sistemas eletrônicos de saúde, destacando a importância da disponibilidade neste contexto. Utiliza

modelos estocásticos e algoritmos de otimização para maximizar a disponibilidade do sistema, considerando restrições orçamentárias, e compara três algoritmos de otimização.

(LISBOA et al., 2018) exploram como o IoT pode melhorar os sistemas de saúde com sensores e infraestrutura de borda, nuvem e névoa para monitoramento de saúde. Analisam o impacto das falhas na disponibilidade do sistema, enfatizando sensores e dispositivos na névoa como componentes críticos. (VALENTIM et al., 2023) discutem os crescentes investimentos em saúde inteligente habilitada por IoT e a importância da disponibilidade do sistema. Introduz um modelo de Rede de Petri Estocástica Generalizada para avaliar a disponibilidade de uma arquitetura IoT Médica baseada em nuvem privada. (STRIELKINA; KHARCHENKO; UZUN, 2018) abordam o surgimento da IoMT para monitoramento de saúde, abordando os riscos de falhas de dispositivos e infraestruturas. Propõe o uso de modelos de *Markov* para considerar questões de segurança e inclui um estudo de caso sobre ataques a vulnerabilidades no sistema de saúde IoT.

Principais Destaques desta Monografia O objetivo desta monografia é criar modelos de SPN para analisar as métricas de dependabilidade de um sistema de hospital inteligente. A análise é realizada modelando um sistema de hospital inteligente. A análise das métricas de dependabilidade traz vantagens ao oferecer compreensão clara, identificação precisa de requisitos e detecção de problemas, por exemplo. Os fatores mencionados ajudam a modelar o sistema, facilitando o planejamento, permitindo a avaliação de alternativas e reduzindo riscos, resultando em implementações mais eficientes e colaborativas.

A avaliação do modelo de SPN proposto considera a análise de disponibilidade e confiabilidade do sistema. O modelo possui duas versões principais. A primeira versão é um modelo sem recuperação de desastres, e a segunda versão é um modelo considerando a recuperação de desastres. A análise permitirá comprovar qual dos tipos de sistema possui melhor disponibilidade e confiabilidade. Além disso, a análise sensitiva com DoE permite verificar como o sistema se comportará com as alterações de recursos dos componentes do sistema. Dessa forma, os modelos serão feitos para que os projetistas ajustem os parâmetros da estrutura e o número de componentes conforme necessário.

5 Arquitetura do Sistema

Esta seção descreve a arquitetura proposta. A Figura 5 apresenta a arquitetura utilizada neste estudo. A arquitetura foi dividida em duas partes principais para melhor compreensão. A primeira parte, à esquerda, refere-se ao sistema de energia que alimenta o hospital. A segunda parte, à direita, é o hospital inteligente e seus componentes.

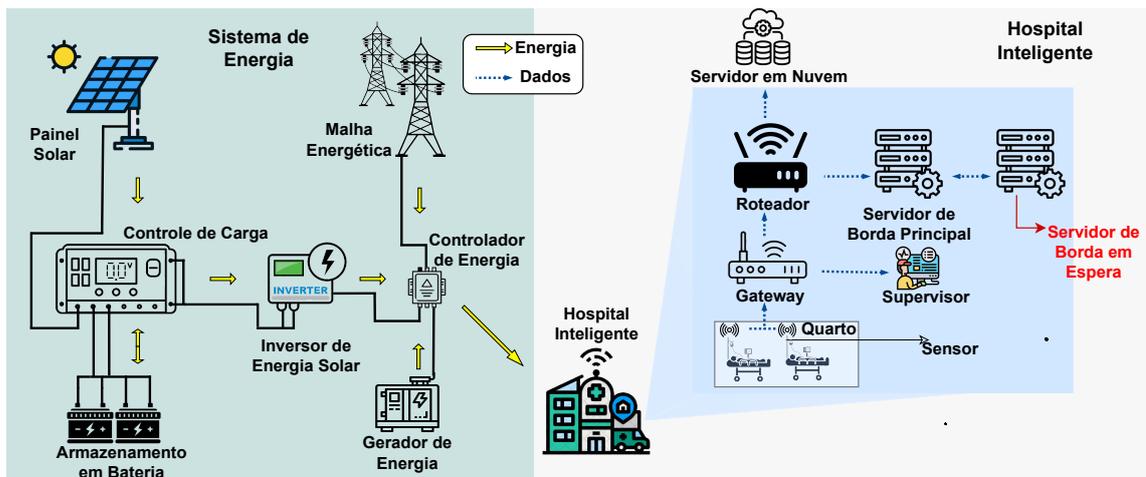


Figura 5 – Arquitetura do Sistema

O *sistema de energia* é composto por três principais fontes de energia: uma *rede elétrica*, um *gerador de energia* e um *sistema de energia solar* com painéis solares. A *rede elétrica* representa a energia pública fornecida por empresas públicas ou privadas que não possuem conexão direta com o hospital. O *gerador de energia* funciona com diesel, fornecendo energia ao hospital durante uma queda de energia. O *sistema de energia solar* é composto por painéis solares, controladores de carga, armazenamento de baterias e inversor de energia solar; o *armazenamento de baterias* refere-se às baterias que armazenam a energia solar produzida pelos painéis solares. As baterias mantêm o fornecimento de energia ao hospital por um curto período até que a energia principal seja restabelecida; o *controlador de carga* controla a energia dos painéis armazenada nas baterias; o *inversor de energia solar* pode ser entendido como um conversor de energia eletromagnética, no qual ocorre a conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) (RAMPINELLI, 2010); o *controlador de energia* controla quais fontes de energia serão direcionadas ao hospital. Dado o panorama dos componentes energéticos, o sistema de energia funciona considerando a energia solar como a principal fonte de alimentação do hospital. A rede elétrica é utilizada quando a energia solar falha. Em último caso, o gerador é ativado quando as outras duas fontes de energia falham.

O *hospital inteligente* é composto por componentes que distribuem informações mo-

monitoradas sobre os pacientes. Quartos com sensores presentes nas camas dos pacientes geram as informações monitoradas. As informações são encaminhadas para um gateway que distribui esses dados para o supervisor do paciente e para um roteador. O supervisor é responsável por analisar todos os dados e tomar medidas quando necessário. O roteador transmite os dados do gateway para um servidor na borda do hospital e para um servidor em nuvem remoto. O servidor de borda manterá os dados localmente no hospital para gerar relatórios, consultas e auxiliar na tomada de decisões. O hospital depende significativamente desses dados, portanto, outro servidor de borda é incorporado ao sistema — um servidor de espera (ou parcialmente ligado). O servidor de espera é ativado assim que o servidor principal do hospital apresenta alguma falha, não relacionada a uma queda de energia. O servidor deve estar parcialmente ligado para ser ativado mais rapidamente quando o principal estiver inoperante. O servidor em nuvem remoto armazena os dados remotamente como backup para o monitoramento remoto dos pacientes. Para que os componentes do hospital funcionem, a energia deve estar operando.

6 Modelagem Proposta

Nesta seção são apresentados os modelos desenvolvidos com base na arquitetura descrita anteriormente. As configurações utilizadas na modelagem refletem as principais características estruturais e operacionais do sistema proposto. Os modelos foram elaborados para avaliar as métricas de disponibilidade e confiabilidade do sistema hospitalar inteligente, considerando dois cenários distintos: com e sem estratégias de recuperação de desastres. Todas as simulações foram conduzidas por meio da ferramenta Mercury, especializada na análise de desempenho e dependabilidade de sistemas complexos (MACIEL et al., 2017; PINHEIRO et al., 2021).

Durante o processo de modelagem, foi necessário adotar algumas simplificações, devido à complexidade inerente da arquitetura original. Limitações como a interação com usuários, vulnerabilidades de segurança e efeitos relacionados a mudanças climáticas não foram consideradas, uma vez que a inclusão desses elementos implicaria em uma expansão substancial do modelo, tornando sua análise mais custosa e menos objetiva. Dessa forma, o foco central desta monografia concentra-se na representação e análise do processo de falha do servidor local de borda, considerado um dos elementos mais críticos para a continuidade operacional do hospital inteligente.

6.1 Modelos de Disponibilidade

Esta subseção apresenta dois modelos utilizados para calcular a disponibilidade dos sistemas: disponibilidade sem recuperação de desastres e com recuperação de desastres.

6.1.1 Modelo Sem Recuperação de Desastres

A Figura 6 mostra o modelo de disponibilidade sem recuperação de desastres. O hospital está operacional se todos os seus componentes internos estiverem ativos e se qualquer componente de energia estiver funcionando. Dois componentes principais no modelo controlam os estados dos setores de energia e hospitalar: *Power System* e *Hospital Inteligente*. O controle utiliza expressões de guarda em *RESTORED*, *BLACKOUT*, *RECOVER* e *FAIL*. Os dois componentes utilizados permitem o cálculo da disponibilidade do sistema. As transições do modelo que apresentam texto em vermelho com *e.g.* seguidas de um número indicam que a transição possui uma expressão de guarda.

A Tabela 2 apresenta as expressões de guarda para ativação. Uma expressão de guarda é uma expressão booleana que permite que uma transição seja habilitada e possa ser disparada. Além da marcação atual permitir isso, a transição só se torna habilitada e pode

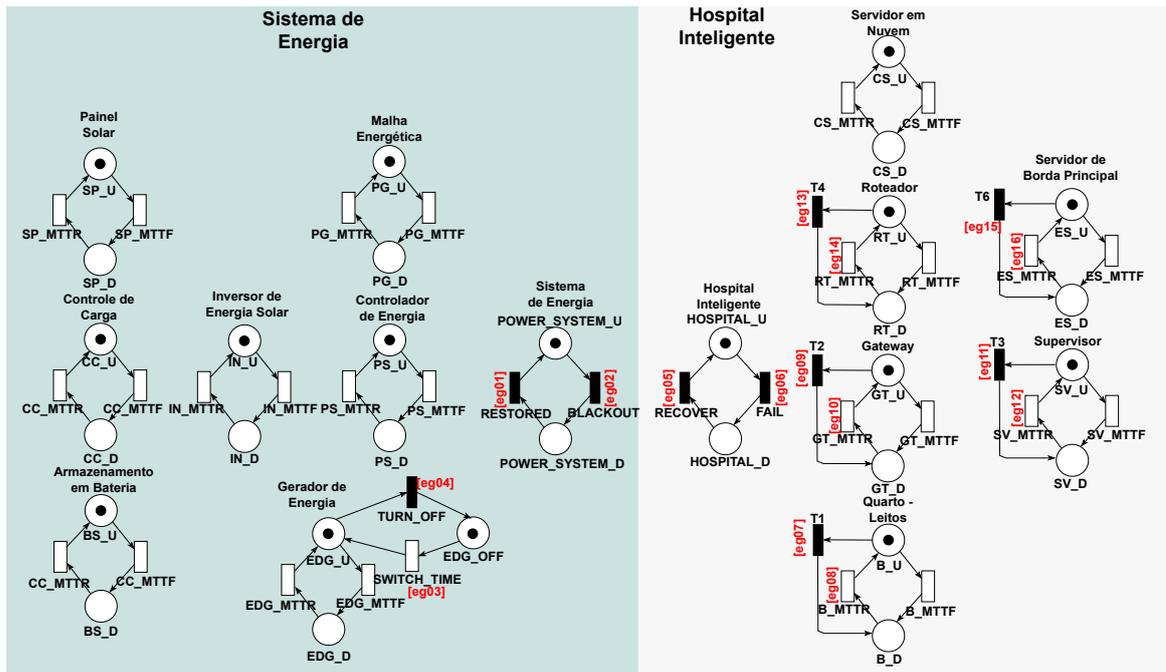


Figura 6 – Modelo Sem Recuperação de Desastres.

ser disparada quando a expressão de guarda atribuída a ela é avaliada como verdadeira (MoDCS Research Group, 2020).

Tabela 2 – Expressões de guarda para o modelo

Índice de Expressões	Expressões de Guarda
eg01	$((PS_U > 0) \text{ AND } (IN_U > 0) \text{ AND } (CC_U > 0) \text{ AND } ((SP_U > 0) \text{ OR } (BS_U > 0))) \text{ OR } (PG_U > 0) \text{ OR } (EDG_U > 0)$
eg02	$((PS_U < 1) \text{ OR } (IN_U < 1) \text{ OR } (CC_U < 1) \text{ OR } ((SP_U < 1) \text{ AND } (BS_U < 1))) \text{ AND } (PG_U < 1) \text{ AND } (EDG_U < 1)$
eg03	$((PS_U < 1) \text{ OR } (IN_U < 1) \text{ OR } (CC_U < 1) \text{ OR } ((SP_U < 1) \text{ AND } (BS_U < 1))) \text{ AND } (PG_U < 1)$
eg04	$((PS_U > 0) \text{ AND } (IN_U > 0) \text{ AND } (CC_U > 0) \text{ AND } ((SP_U > 0) \text{ OR } (BS_U > 0))) \text{ OR } (PG_U > 0)$
eg05	$((CS_U > 0) \text{ AND } (ES_U > 0) \text{ AND } (RT_U > 0) \text{ AND } (GT_U > 0) \text{ AND } (B_D = 0) \text{ AND } (SV_U > 0)) \text{ AND } (POWER_SYSTEM_U > 0)$
eg06	$(CS_U < 1) \text{ OR } (ES_U < 1) \text{ OR } (RT_D > 0) \text{ OR } (GT_D > 0) \text{ OR } (B_D > 0) \text{ OR } (SV_D > 0)$
eg07, eg09, eg11, eg13, eg15	$(POWER_SYSTEM_D > 0)$
eg08, eg10, eg12, eg14, eg16	$(POWER_SYSTEM_U > 0)$

O componente *Power System* representa o estado de energia do sistema, seja ele ativo ou inativo. O *Power System* é considerado ativo quando há um token em *POWER_SYSTEM_U* e inativo quando há um token em *POWER_SYSTEM_D*. As mudanças de estado são controladas pelas transições *BLACKOUT* e *RESTORED*. As transições mencionadas pos-

suem expressões de guarda. A transição *RESTORED* é ativada quando há pelo menos uma fonte de energia ativa, conforme a expressão *eg01*. A transição *BLACKOUT* é ativada quando todas as fontes de energia estão indisponíveis, conforme a expressão *eg02*.

O componente *Hospital Inteligente* denota o estado do hospital. O hospital é considerado ativo quando todos os seus respectivos componentes estão ativos. O estado inativo ocorre quando qualquer um dos componentes possui um token no estado inativo. O *Hospital Inteligente* está ativo quando há um token em *HOSPITAL_U* e inativo quando está em *HOSPITAL_D*. O controle das mudanças entre os estados ativo e inativo ocorre nas transições *FAIL* e *RECOVER*. A transição imediata *FAIL* é ativada quando todos os componentes de energia falham, indicando uma queda de energia. A expressão utilizada nesta transição é *eg06*. A transição imediata *RECOVER* é ativada quando pelo menos uma fonte de energia ativa alimenta o hospital. A expressão de guarda utilizada é *eg05*.

O *Gerador de Energia* é um componente específico do setor de energia do sistema. O comportamento do gerador difere dos demais componentes do sistema. O uso do gerador depende de uma condição específica. A transição *SWITCH_TIME* garante que o gerador de energia entre em estado de uso somente quando não houver mais nenhuma fonte de energia disponível. A expressão de guarda é dada por *eg03*. A transição imediata *TURN_OFF* garante que esse componente seja desligado imediatamente assim que algum outro componente de energia voltar a estar ativo. A expressão correspondente é dada por *eg04*.

O funcionamento dos componentes de energia segue o fluxo previamente explicado na Seção 5. O *Solar Panel* gera energia ao receber luz solar; o *Controle de Carga* ajusta o nível de carga enviado às baterias e ao inversor solar; as *Baterias* armazenam energia que sustenta o painel solar e, eventualmente, pode ser usada para alimentar o hospital por um curto período; o *Solar Inverter* converte a energia solar para o hospital; o *Switch Power* escolhe qual fonte de energia deve assumir quando uma das fontes falha; e, por fim, o *Gerador de Energia* só é ativado se todas as fontes de energia falharem.

Os componentes do hospital seguem as características já mencionadas anteriormente. Sensores nos quartos dos pacientes coletam dados vitais dos pacientes em leitos; as informações dos pacientes são distribuídas ao supervisor e aos servidores de borda e em nuvem. Os componentes do *Hospital Inteligente* possuem transições imediatas representadas por *T1*, *T2*, *T3*, *T4*, *T6*. Essas transições garantem a falha imediata dos componentes do hospital caso a energia falhe e ocorra um apagão. As expressões utilizadas para esses elementos são *eg07*, *eg09*, *eg11*, *eg13*, *eg15*. As transições temporizadas denotadas nos componentes com *MTTF* indicam o tempo médio até que um componente do sistema falhe naturalmente. Transições temporizadas denotadas com *MTTR* indicam o tempo médio de recuperação de um componente quando este está inativo. Os componentes do modelo só recuperam seu estado de atividade se o *Power System* estiver ativo. Os tempos manipulados nesses componentes são cruciais para a análise da disponibilidade geral do

sistema.

Os principais componentes, *Power System* e *Hospital Inteligente*, controlam o estado de atividade de ambos os setores do sistema. Esses componentes auxiliam no cálculo da métrica de disponibilidade. A disponibilidade é calculada com base na probabilidade de que o *Power System* e o *Hospital Inteligente* estejam operando simultaneamente. A Equação 6.1 é usada para calcular a disponibilidade (A).

$$A = P((\#POWER_SYSTEM_U > 0) \text{ AND } (\#HOSPITAL_U > 0)) \quad (6.1)$$

P representa a probabilidade, e $(\#)$ indica o número de tokens em um determinado elemento do modelo. Ao avaliar a disponibilidade do sistema, também é importante calcular o Tempo de Inatividade (D). O Tempo de Inatividade pode ser obtido pela Equação: 6.2.

$$D = (1 - A) \times 8766 \quad (6.2)$$

A é a disponibilidade do sistema, e 8766 é o número de horas presentes em um ano.

6.1.2 Modelo com Recuperação de Desastres

A Figura 7 mostra os elementos adicionados para incluir a recuperação de desastres. A recuperação de desastres é utilizada para o servidor de borda; o componente é adicionado ao *Hospital Inteligente*. Para considerar uma falha do servidor de borda que não seja causada por uma queda de energia, foi adicionado o elemento ES_D , que indica uma falha do servidor devido a um desastre diferente de falta de energia. Quando há um token em ES_D , isso indica um tempo de inatividade do servidor principal de borda relacionado a desastre. O token em ESR_HOT indica que o servidor de backup está em *espera ativa*, ou seja, em espera ou parcialmente ligado. O token em ESR_HOT pode atingir o estado de uso em ESR_U ou o estado de espera em ESR_D . O tempo de inatividade do servidor principal devido a desastre ativa a transição TO_ESD , que possui uma condição de guarda para o token aguardar até alcançar o estado de uso. A condição de guarda é representada por *eg18*.

O servidor de backup retorna ao modo de espera caso o servidor principal volte à atividade. Assim que o servidor principal tiver o token em ESD disparado para ES_U novamente, a transição RED_ES é disparada. A transição mencionada indica que o servidor de espera que havia assumido retorna ao estado de espera. A condição de guarda que ativa o disparo de RED_ES é *eg19*. Por fim, o servidor de backup pode atingir o estado inativo por dois motivos. O primeiro motivo é a ocorrência de uma queda de energia. A transição imediata $T7$ garante que o servidor reserva altere seu estado para inativo, conforme a condição de guarda *eg20*. O segundo motivo ocorre por causas naturais. Assim como o servidor principal, o servidor de backup pode falhar com o tempo e se tornar inativo. O servidor de backup pode falhar enquanto estiver em espera ou em estado de uso.

As transições que indicam o tempo médio antes de o servidor falhar são representadas por ESR_MTTF , ESR_MTTF2 .

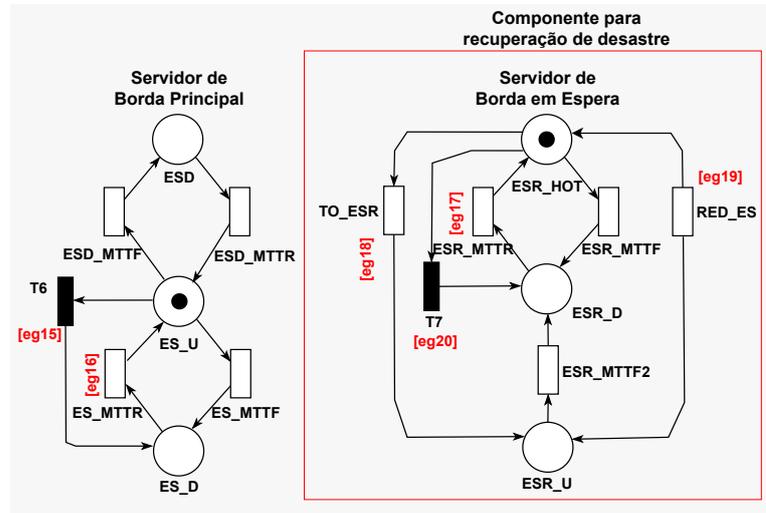


Figura 7 – Modelo com Recuperação de Desastre

A Tabela 3 mostra as expressões de guarda adicionadas ao modelo anterior para considerar a recuperação de desastres no servidor de borda. O cálculo da disponibilidade (A) e do tempo de inatividade (D) é realizado com as mesmas equações mencionadas anteriormente. A disponibilidade é avaliada considerando os elementos adicionados ao modelo base e o tempo de inatividade. A utilização dos componentes centrais *Power System* e *Hospital Inteligente* ajuda a manter a mesma equação para o cálculo.

Tabela 3 – Expressões de guarda para o modelo

Índices de Expressões	Expressões de Guarda
eg18	(ESD>0)
eg17	(POWER_SYSTEM_U>0)
eg19	((ES_U>0)
eg20	(POWER_SYSTEM_D>0)

6.2 Modelo de Confiabilidade

Confiabilidade é a probabilidade condicional de um sistema permanecer operacional em um intervalo de tempo $[0, t]$, considerando que ele estava operacional em $t = 0$ (SILVA et al., 2022). A Figura 8 apresenta o modelo de confiabilidade. O modelo já inclui a adição do componente de recuperação de desastres, mas o componente de Servidor de Borda em Espera é desconsiderado para o cálculo. O funcionamento do modelo segue o mesmo do modelo de disponibilidade. A diferença em relação ao modelo de disponibilidade é que os componentes não possuem elementos que permitam a recuperação do estado inativo

para o estado ativo. A remoção desses elementos auxilia no cálculo da confiabilidade do sistema.

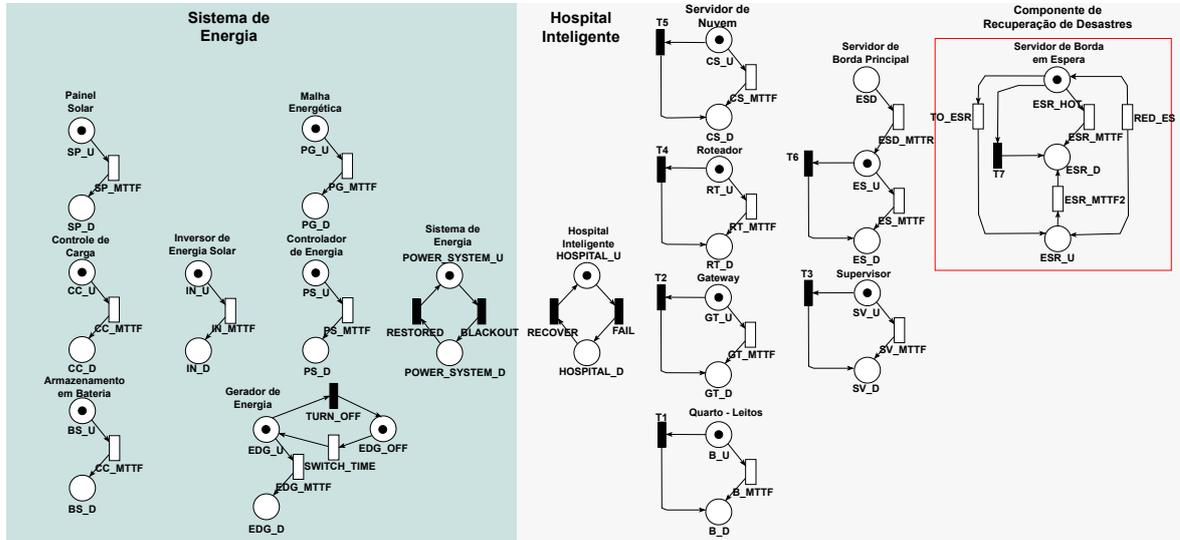


Figura 8 – Modelo de Confiabilidade.

A confiabilidade (R) dos modelos mencionados é calculada pela Equação 6.3, onde P indica a probabilidade de o sistema estar inativo em qualquer um dos setores que o representam. A equação auxilia na geração de um gráfico que mostra como a confiabilidade diminui ao longo do tempo.

$$R = 1 - P\{(\#POWER_SYSTEM_D > 0)OR(\#HOSPITAL_D > 0)\} \quad (6.3)$$

7 Análise de Resultados

Nesta seção, discutiremos os principais resultados das análises de sensibilidade, destacando a relevância dessas informações para a implementação de sistemas computacionais no ambiente hospitalar, com foco em seus componentes de infraestrutura mais importantes, bem como na disponibilidade e confiabilidade do sistema. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados para alimentar os modelos propostos. Os valores utilizados foram extraídos de alguns estudos validados. Os parâmetros foram obtidos de (SILVA et al., 2022; ARAUJO et al., 2020; RODRIGUES et al., 2021; MARQUSEE; ERICSON; JENKET, 2020; PERDUE; GOTTSCHALG, 2015).

Tabela 4 – Parâmetros de entrada para os modelos propostos

Componentes	MTTF (Horas)	MTTR (Horas)
Sensors/Atuadores	300,000	1
Gateway	480,770	8
Supervisor	44,957	1
Roteador	698,220	8
Servidores em Nuvem	760	0.74
Servidores em Borda	940	1.37
Painel Solar	219,000	8
Armazenamento de Bateria	47,829	8
Controle de Carga	70,080	8
Inversor de Energia Solar	24,820	8
Gerador de Energia	636	37
Rede Elétrica	8757	4.807

7.1 Design of Experiments

Neste trabalho, foi aplicada a técnica de *Design of Experiments* (DoE) para realizar a análise de sensibilidade do sistema hospitalar inteligente, considerando dois cenários distintos: um sem recuperação de desastres e outro com a adoção de estratégias de recuperação. A utilização dessa abordagem metodológica consistente é fundamental para identificar quais combinações de variáveis exercem maior influência sobre a métrica de desempenho do sistema, permitindo uma avaliação precisa dos fatores mais críticos (SILVA et al., 2023).

A análise foi conduzida por meio de simulações nas quais os fatores de entrada foram sistematicamente variáveis. O objetivo foi compreender como alterações nesses parâmetros afetam os resultados do sistema, possibilitando a extração de informações significativas sobre a sensibilidade dos componentes envolvidos. A Figura 9 apresenta o gráfico de efeito dos fatores, que ilustra a influência relativa de cada fator sobre a métrica analisada.

Os fatores são organizados em barras de altura decrescente, facilitando a visualização comparativa. Quanto maior a barra, maior a influência do respectivo fator, o que auxilia no ranqueamento da importância dos elementos do sistema.

Além disso, as Figuras 10 e 11 apresentam os gráficos de interação entre os fatores. Esses gráficos utilizam linhas para representar a resposta do sistema conforme as combinações dos níveis dos fatores. A presença de linhas paralelas indica ausência de interação entre os fatores, enquanto linhas que se cruzam ou divergem sugerem que os efeitos de um fator são dependentes do nível do outro, caracterizando uma interação significativa. Essas representações são essenciais para compreender como a combinação de variáveis pode potencializar ou atenuar os impactos sobre a disponibilidade e confiabilidade do sistema.

No experimento conduzido para o sistema em estudo, foram exploradas diferentes camadas da arquitetura por meio da análise de sensibilidade. Contudo, nesta seção são apresentados apenas os fatores que demonstraram interações significativas, uma vez que tais interações foram identificadas com base no impacto combinado dos fatores sobre a métrica de disponibilidade do sistema. Para essa análise, foram selecionados cinco fatores considerados relevantes na estrutura modelada: (i) *ES_MTTF*, correspondente ao tempo médio até a falha do servidor de borda; (ii) *PG_MTTF*, referente ao tempo médio até a falha da rede elétrica; (iii) *SV_MTTF*, associado ao tempo médio até a falha do supervisor; (iv) *B_MTTF*, relacionado ao tempo médio até a falha dos sensores; e (v) *SP_MTTF*, que representa o tempo médio até a falha dos painéis solares.

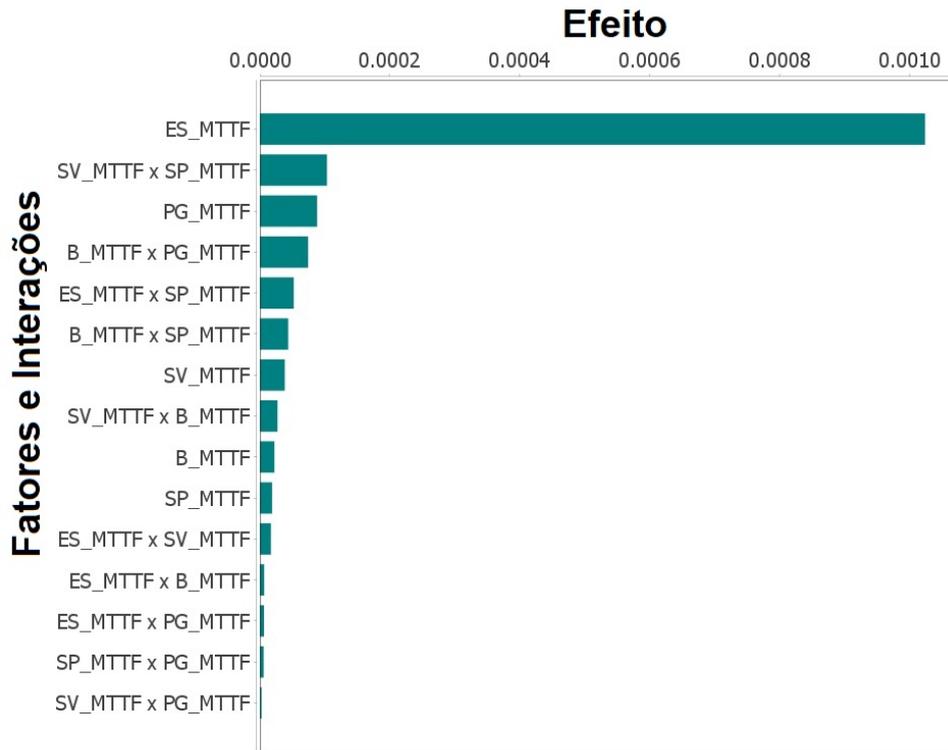
Cada um desses fatores foi avaliado em dois níveis distintos: um nível inferior (configuração baixa) e um nível superior (configuração alta), de modo a permitir a comparação dos efeitos em diferentes condições operacionais. A Tabela 5 apresenta os valores atribuídos a cada fator em ambos os níveis de configuração. Já a Tabela 6 exibe todas as combinações possíveis entre os fatores e seus respectivos níveis, conforme utilizado nas simulações. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada dos efeitos individuais e combinados dos fatores, contribuindo para a compreensão da sensibilidade do sistema frente a variações estruturais e operacionais.

Tabela 5 – Tabela de Design

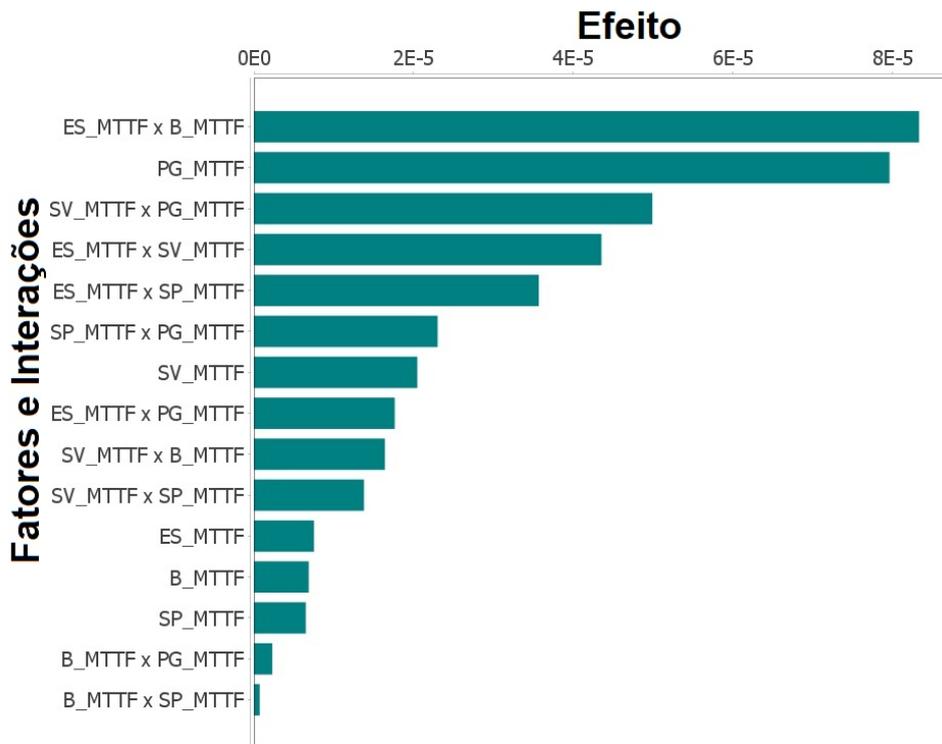
Nome do Fator	Configuração Baixa	Configuração Alta
ES_MTTF	940.0	1410.0
SV_MTTF	44957.0	67435.5
B_MTTF	300000.0	450000.0
SP_MTTF	219000.0	328500.0
PG_MTTF	8757.0	13135.5

7.1.1 Sem Recuperação de Desastres

A Figura 9a exibe o gráfico de efeito dos fatores no modelo sem recuperação de desastres, revelando a magnitude e a importância dos fatores em relação à métrica de disponibilidade. Esse gráfico identifica os fatores que têm impacto significativo nas simulações,



(a) Impacto de diferentes fatores no sistema sem recuperação de desastres



(b) Impacto de diferentes fatores no sistema com recuperação de desastres

Figura 9 – Impacto dos fatores nos dois estudos de caso

resultando em valores diferentes quando seus níveis são alterados. Entre os fatores analisados, o tempo até a falha do servidor de borda é o mais relevante, o que indica que o tempo até a falha é crucial para a eficiência do sistema. Além disso, o tempo até a falha

Tabela 6 – Tabela de Combinação

ES_MTTF	SV_MTTF	B_MTTF	SP_MTTF	PG_MTTF	SRD & CRD
940.00	44957.00	300000.00	219000.00	8757.00	0.99
940.00	44957.00	300000.00	219000.00	13135.50	0.99
940.00	44957.00	300000.00	328500.00	8757.00	0.99
940.00	44957.00	300000.00	328500.00	13135.50	0.99
940.00	44957.00	450000.00	219000.00	8757.00	0.99
940.00	44957.00	450000.00	219000.00	13135.50	0.99
940.00	44957.00	450000.00	328500.00	8757.00	0.99
940.00	44957.00	450000.00	328500.00	13135.50	0.99
940.00	67435.50	300000.00	219000.00	8757.00	0.99
940.00	67435.50	300000.00	219000.00	13135.50	0.99
940.00	67435.50	300000.00	328500.00	8757.00	0.99
940.00	67435.50	300000.00	328500.00	13135.50	0.99
940.00	67435.50	450000.00	219000.00	8757.00	0.99
940.00	67435.50	450000.00	219000.00	13135.50	0.99
940.00	67435.50	450000.00	328500.00	8757.00	0.99
940.00	67435.50	450000.00	328500.00	13135.50	0.99
1410.00	44957.00	300000.00	219000.00	8757.00	0.99
1410.00	44957.00	300000.00	219000.00	13135.50	0.99
1410.00	44957.00	300000.00	328500.00	8757.00	0.99
1410.00	44957.00	300000.00	328500.00	13135.50	0.99
1410.00	44957.00	450000.00	219000.00	8757.00	0.99
1410.00	44957.00	450000.00	219000.00	13135.50	0.99
1410.00	44957.00	450000.00	328500.00	8757.00	0.99
1410.00	44957.00	450000.00	328500.00	13135.50	0.99
1410.00	67435.50	300000.00	219000.00	8757.00	0.99
1410.00	67435.50	300000.00	219000.00	13135.50	0.99
1410.00	67435.50	300000.00	328500.00	8757.00	0.99
1410.00	67435.50	300000.00	328500.00	13135.50	0.99
1410.00	67435.50	450000.00	219000.00	8757.00	0.99
1410.00	67435.50	450000.00	219000.00	13135.50	0.99
1410.00	67435.50	450000.00	328500.00	8757.00	0.99
1410.00	67435.50	450000.00	328500.00	13135.50	0.99

da rede elétrica e o tempo até a falha do supervisor também desempenham um papel importante no contexto estudado.

Por outro lado, o tempo até a falha dos sensores e dos painéis solares possui menor influência. Embora seja um fator relevante, seu impacto na disponibilidade é relativamente pequeno. O gráfico de efeito dos fatores fornece informações sobre os efeitos absolutos dos fatores, permitindo determinar quais efeitos são significativos, mas não possibilita identificar se eles aumentam ou diminuem a disponibilidade. A Figura 10a mostra a interação entre os fatores *ES_MTTF* e *PG_MTTF*. Pode-se observar que esses fatores não apresentam qualquer interação entre si, mantendo um padrão de paralelismo em todas as opções possíveis de tempo de falha dos componentes. Isso significa que suas variações não influenciam uma à outra, independentemente do tempo de falha da rede elétrica ou do servidor de borda.

A Figura 10b mostra a interação entre os fatores *ES_MTTF* e *SV_MTTF*. Os tempos até a falha do supervisor apresentam movimentos semelhantes, quase se sobrepondo. No entanto, quando o tempo até a falha é de 67435,5h, o sistema sempre apresenta melhor disponibilidade, variando de aproximadamente 99,600% a 99,700%, independentemente

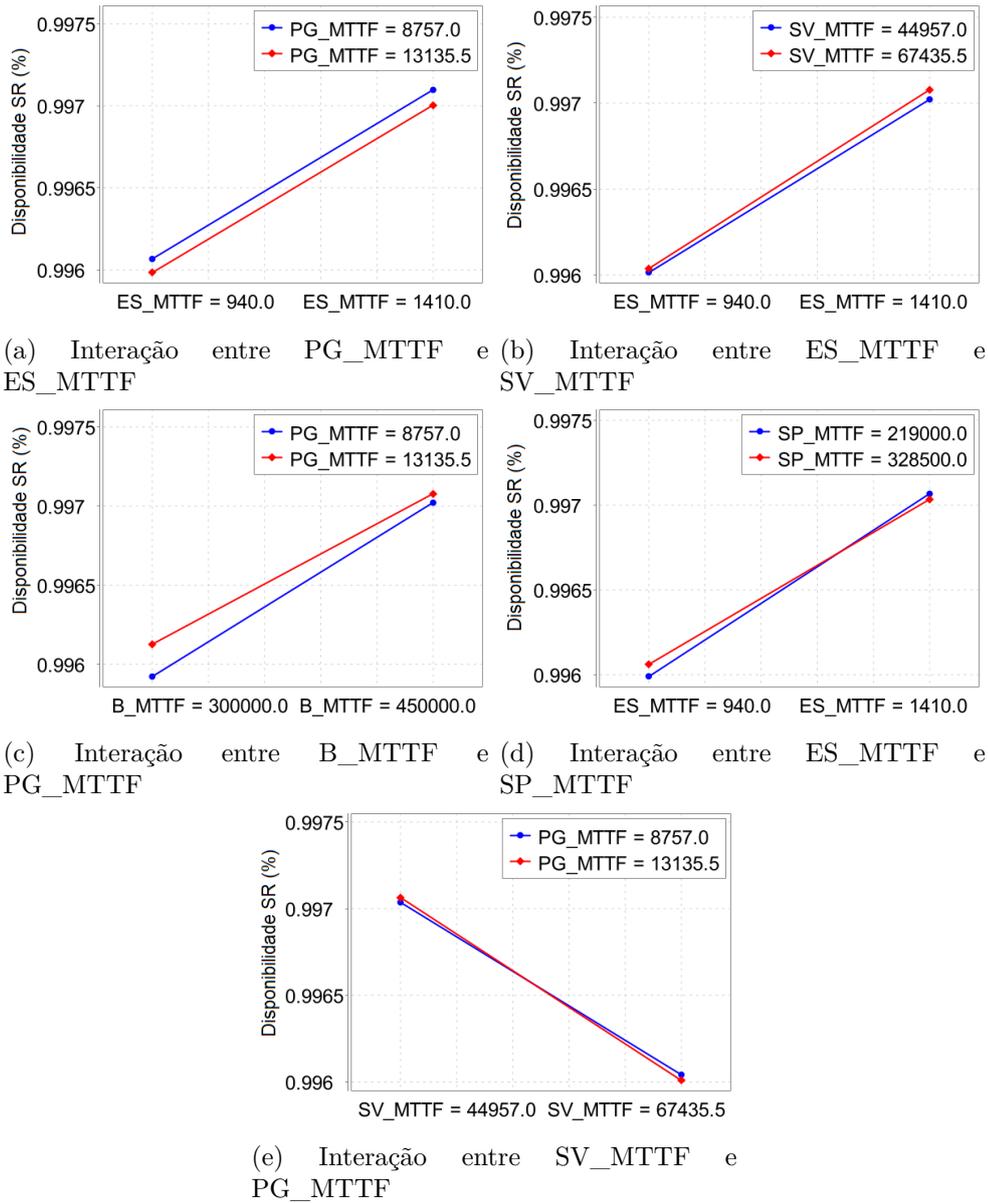


Figura 10 – Interação entre os fatores e seu impacto no sistema sem recuperação de desastres

do tempo até a falha do servidor de borda. A Figura 10c demonstra a interação entre os fatores B_MTTF e PG_MTTF . Os tempos até a falha da rede elétrica apresentam movimentos semelhantes, mas quando o tempo até a falha é de 13135,5h, sempre resulta em uma melhor disponibilidade, variando entre aproximadamente 99,600% e 99,700%, independentemente do tempo até a falha dos sensores.

A Figura 10d mostra a interação entre os fatores ES_MTTF e SP_MTTF . Os tempos até a falha dos painéis solares apresentam movimentos semelhantes. Contudo, quando o tempo até a falha é de 328500h, há uma boa disponibilidade com o servidor de borda apresentando tempo até a falha de 940h. Já quando o tempo até a falha dos painéis solares é de 219000h, a melhor disponibilidade ocorre quando o servidor de borda possui 1410h de tempo até a falha. A Figura 10e mostra a interação entre os fatores SV_MTTF e PG_MTTF . Os tempos até a falha da rede elétrica apresentam movimentos semelhantes.

No entanto, quando o tempo até a falha é de 8757h, obtém-se boa disponibilidade quando o supervisor possui tempo até a falha de 67435,5h. Por outro lado, quando o tempo até a falha da rede elétrica é 8757h, a melhor disponibilidade é alcançada quando o supervisor tem 44957h de tempo até a falha.

7.1.2 Com Recuperação de Desastres

A Figura 9b apresenta o gráfico de efeito dos fatores no modelo com recuperação de desastres, destacando a diferença no impacto dos fatores sobre a métrica de disponibilidade em comparação com o sistema sem recuperação. Nesse gráfico, é possível observar que, com a recuperação do servidor de borda, outros fatores sofreram alterações significativas dentro do sistema. O tempo até a falha da rede elétrica tornou-se o fator mais relevante no sistema, indicando que o tempo até a ocorrência da falha da rede passou a ser o mais impactante para a disponibilidade. Além disso, o tempo até a falha de outros fatores, como o supervisor, os sensores e os painéis solares, aumentou sua importância no sistema todo. No entanto, os tempos até a falha dos sensores e dos painéis solares continuam sendo os componentes com menor influência sobre a disponibilidade do sistema.

A Figura 11a mostra a interação entre os fatores ES_MTTF e PG_MTTF . De modo geral, a rede elétrica com 8757h de tempo até a falha sempre apresenta melhor disponibilidade do que com 13135,5h, atingindo aproximadamente 99,898%. Considerando 8757h como tempo de falha da rede elétrica, o aumento no tempo de falha do servidor de borda de 940h para 1410h gera uma leve elevação na disponibilidade. É possível que, para um valor ainda maior de tempo até a falha do servidor de borda, os resultados de disponibilidade sejam ainda melhores, mantendo o tempo de falha da rede elétrica em 8757h.

A Figura 11b mostra a interação entre os fatores ES_MTTF e SV_MTTF . Os fatores apresentam uma interação significativa. Quando se utiliza 940h como tempo até a falha do servidor de borda, o melhor tempo até a falha do supervisor é 44957h, resultando em uma disponibilidade de aproximadamente 99,895%. A melhor disponibilidade é alcançada com 1410h como tempo de falha do servidor de borda e 67435,5h como tempo de falha do supervisor, atingindo cerca de 99,896% de disponibilidade. A Figura 11c demonstra a interação entre os fatores B_MTTF e PG_MTTF . De modo geral, a rede elétrica com 8757h de tempo até a falha sempre apresenta melhor disponibilidade, entre aproximadamente 99,894% e 99,895%, em comparação com 13135,5h. Nota-se que a melhor disponibilidade ocorre com 8757h como tempo até a falha da rede elétrica e 300000h como tempo até a falha dos sensores, atingindo cerca de 99,895%.

A Figura 11d mostra a interação entre os fatores ES_MTTF e SP_MTTF . Quando o tempo até a falha do servidor de borda é 940h, o melhor desempenho dos painéis solares ocorre com 219000h, maximizando a disponibilidade em até aproximadamente 99,896%. Quando o tempo até a falha do servidor de borda é 1410h, o tempo de falha ideal dos painéis solares é 328500h, com a disponibilidade máxima alcançada em torno de 99,894%.

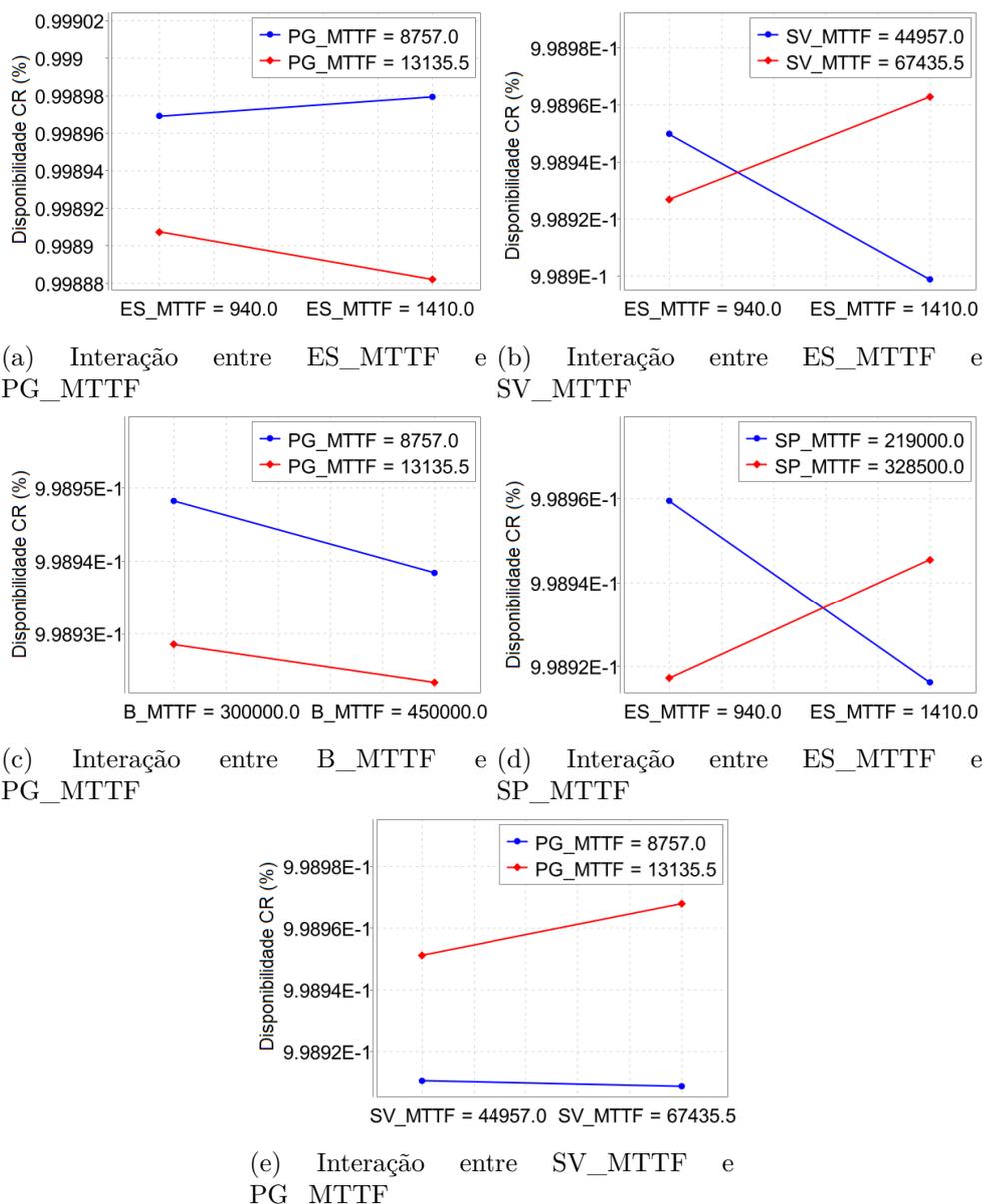


Figura 11 – Interação entre os fatores e seu impacto no sistema com recuperação de desastres

A Figura 11e exibe a interação entre os fatores *SV_MTTF* e *PG_MTTF*. Em geral, a rede elétrica com 13135,5h de tempo até a falha sempre apresenta melhor disponibilidade, em torno de 99,897%, em comparação com 8757h. Considerando 13135,5h como tempo de falha da rede principal, observa-se um leve aumento na disponibilidade quando o tempo até a falha do supervisor varia de 44957h para 67435,5h. O resultado pode ser ainda mais elevado se o tempo de falha do supervisor for ampliado, mantendo os 13135,5h da rede elétrica.

7.2 Disponibilidade

Neste estudo, foram utilizadas abordagens específicas para analisar a disponibilidade do sistema hospitalar inteligente, com o intuito de compreender os efeitos da ausência

e da presença de medidas de recuperação de desastres sobre sua operabilidade. A Figura 12a apresenta o gráfico de disponibilidade referente ao modelo sem recuperação de desastres, evidenciando a importância do servidor de borda como componente crítico na determinação da disponibilidade global do sistema.

A análise demonstrada no gráfico revela que alterações nos níveis de confiabilidade do servidor de borda — expressas pelo tempo médio até a falha — provocam variações significativas nos resultados das simulações. Observa-se que, na ausência de mecanismos de recuperação, o sistema torna-se sensível às falhas desse componente, refletindo diretamente na métrica de disponibilidade. Especificamente, a Figura 12a mostra que, à medida que o tempo até a falha do servidor de borda aumenta, a disponibilidade do sistema também se eleva. Essa tendência reforça a necessidade de estratégias de mitigação focadas na robustez do servidor de borda, uma vez que sua falha compromete a continuidade dos serviços hospitalares e impacta diretamente a resiliência da infraestrutura computacional.

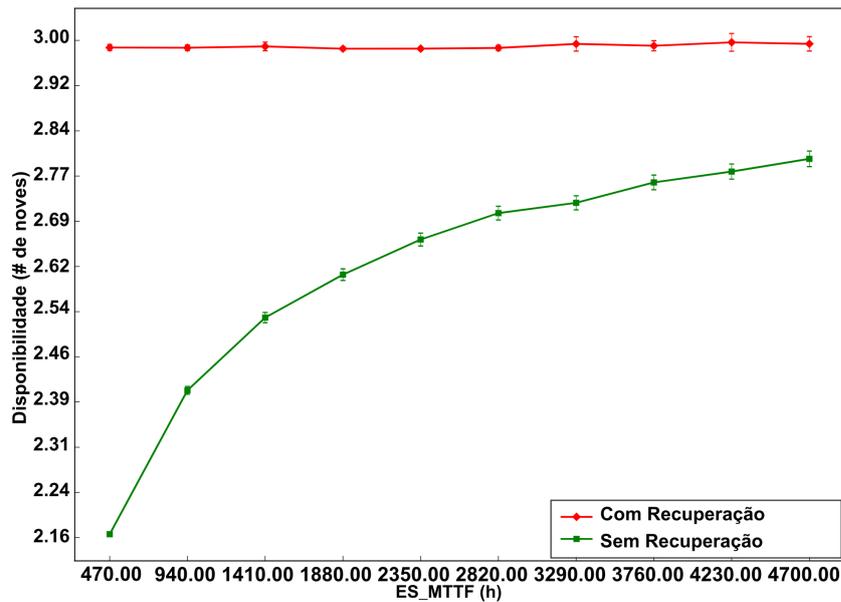
O sistema com a inclusão de medidas de recuperação de desastres apresenta um comportamento completamente diferente. Isso se deve à menor importância do servidor de borda como componente isolado. O sistema sempre apresenta maior disponibilidade quando comparado ao sistema sem medidas de recuperação de desastres, mantendo-se estável independentemente do tempo até a falha do servidor de borda. A Figura 12b mostra as diferenças no tempo de inatividade entre os dois sistemas, definido como os períodos em que as atividades são interrompidas ou os recursos ficam inacessíveis devido a falhas, manutenções ou interrupções.

A falha do servidor de borda pode causar um tempo de inatividade considerável no sistema sem medidas de recuperação de desastres, resultando em aproximadamente 35 horas. Essa interrupção significativa pode trazer consequências graves para o funcionamento adequado do serviço hospitalar. Quando as medidas de recuperação de desastres são implementadas, o tempo de inatividade é significativamente reduzido em comparação com o sistema sem recuperação. O tempo de inatividade mostrado com as medidas de recuperação para o servidor de borda é de aproximadamente 9 horas.

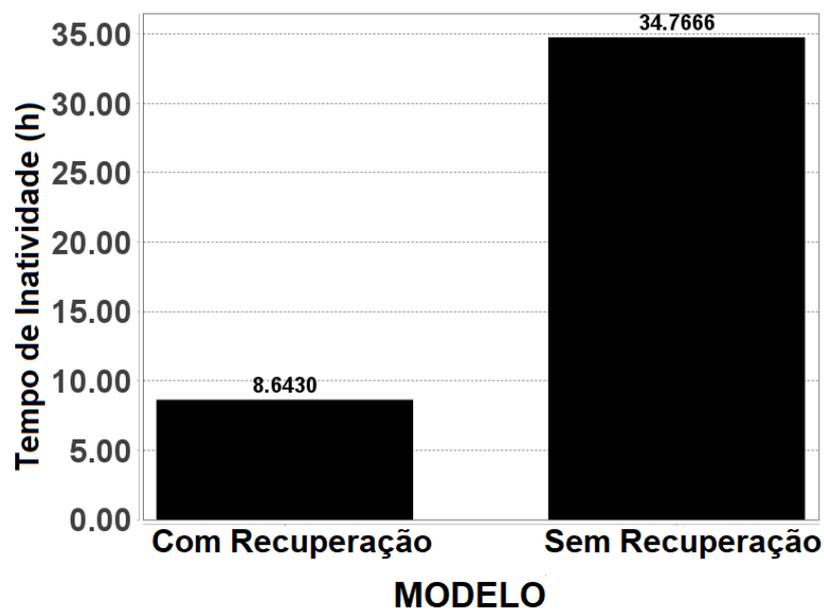
7.3 Confiabilidade

Este estudo analisa a confiabilidade do sistema para entender como estratégias como a recuperação de desastres afetam o desempenho consistente e livre de falhas do sistema. A Figura 13 apresenta os gráficos de confiabilidade dos modelos, nos quais podemos notar o impacto que os valores de tempo até a falha do servidor de borda exercem sobre a confiabilidade do sistema, resultando em cenários significativamente distintos e evidenciando a diferença entre o sistema sem e com medidas de recuperação de desastres no servidor de borda.

Com base na Figura 13a, observa-se que, na ausência de recuperação de desastres, a



(a) Comparação da disponibilidade nos estudos de caso



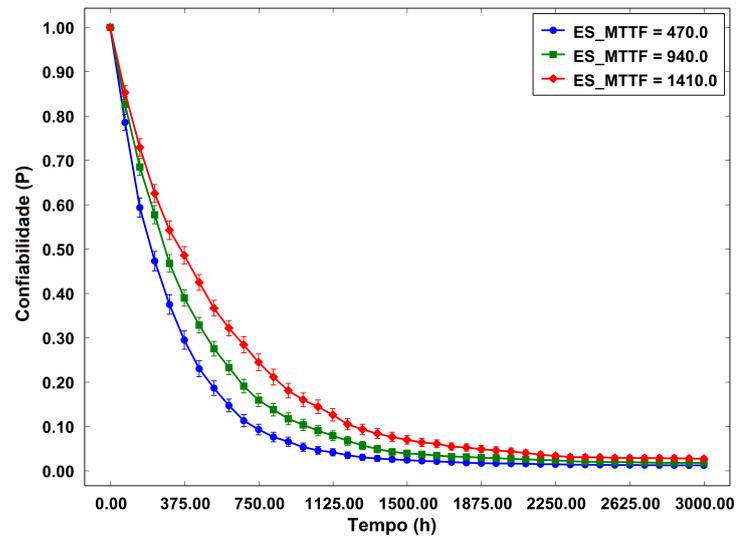
(b) Comparação do tempo de inatividade nos estudos de caso

Figura 12 – Resultados de disponibilidade dos dois estudos de caso

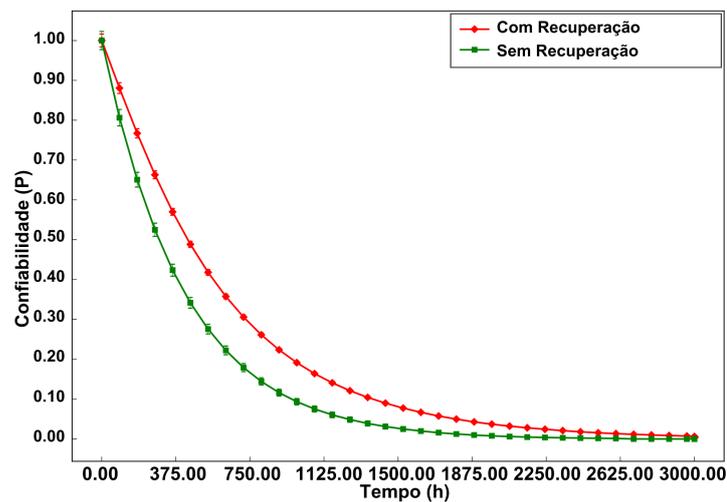
confiabilidade do sistema é consideravelmente afetada pela variação no tempo até a falha do servidor de borda. A tendência evidente é que, quanto maior o tempo até a falha do servidor de borda, maior a confiabilidade geral do sistema. Essa relação entre o tempo de vida útil do servidor de borda e a confiabilidade é visível nas simulações, refletindo a importância estratégica de garantir a resiliência e a confiabilidade desse componente crítico do sistema.

A Figura 13b mostra a confiabilidade dos dois sistemas. O sistema sem a presença de medidas de recuperação de desastres apresenta menor confiabilidade quando comparado ao sistema com tais medidas. Devido às ações de recuperação, o sistema torna-se mais

confiável, demorando mais para apresentar falhas constantes e redução na confiabilidade.



(a) Confiabilidade Sem Recuperação de Desastres



(b) Comparação de Confiabilidade

Figura 13 – Resultados da Confiabilidade do Sistema Com e Sem Medidas de Recuperação de Desastres

7.3.1 Discussão de Resultados

Os resultados obtidos ao longo deste estudo oferecem subsídios relevantes para o planejamento, dimensionamento e gestão de sistemas hospitalares inteligentes. Por meio da modelagem com Redes de Petri Estocásticas (SPN), foi possível avaliar a confiabilidade da arquitetura proposta, com especial ênfase no comportamento do servidor de borda, elemento central na operação contínua do sistema. A análise indicou que o tempo médio até a falha desse componente se configura como um dos fatores mais críticos, influenciando de forma decisiva a eficiência e a disponibilidade global do sistema.

Do ponto de vista prático, esses achados reforçam a importância de políticas rigorosas de manutenção e monitoramento dos servidores de borda, visando prolongar sua vida útil

e evitar interrupções nos serviços hospitalares. Além disso, a implementação de um servidor de reserva — parcialmente ligado e pronto para assumir em caso de falha do servidor principal — mostrou-se uma estratégia altamente eficaz, capaz de aumentar significativamente a disponibilidade do sistema e, conseqüentemente, a resiliência da infraestrutura hospitalar inteligente.

Entretanto, é necessário reconhecer algumas limitações do estudo. Primeiramente, para mitigar o problema da explosão do espaço de estados característico de modelos com alta complexidade estrutural, optou-se por simplificações em alguns componentes. Por exemplo, elementos como a rede elétrica e os servidores em nuvem foram representados de forma encapsulada, utilizando apenas seus respectivos parâmetros de tempo médio para falha (MTTF) e tempo médio para reparo (MTTR). Em segundo lugar, fatores externos que também podem influenciar a disponibilidade — como interação de usuários, riscos de segurança e eventos ambientais — não foram considerados nesta análise. O escopo do estudo foi intencionalmente delimitado ao processo de falha dos servidores locais de borda, visando manter o foco e a viabilidade computacional da modelagem.

8 Conclusão

Este estudo apresentou modelos baseados em Redes de Petri Estocásticas (SPN) com o propósito de avaliar a dependabilidade de uma arquitetura computacional voltada para hospitais inteligentes. A proposta visa fornecer suporte aos administradores de sistemas no planejamento de infraestruturas resilientes, considerando fatores que impactam diretamente a disponibilidade, confiabilidade e continuidade dos serviços críticos de saúde. Entre os diversos componentes analisados, o servidor de borda destacou-se como elemento central para a operação ininterrupta do sistema. Os resultados indicam que a introdução de um servidor de backup — operando em modo de espera — contribui significativamente para a melhoria da disponibilidade, ao mitigar os efeitos das falhas do servidor principal. Os modelos desenvolvidos permitiram estimar com precisão as métricas de disponibilidade, tempo de inatividade e confiabilidade, demonstrando comportamentos distintos em cenários com e sem estratégias de recuperação de desastres. Por meio da análise de sensibilidade, foi possível compreender como a variação dos parâmetros afeta o desempenho global da arquitetura. Observou-se que a presença de redundância no servidor de borda representa um diferencial expressivo, refletindo diretamente na robustez da solução proposta. Assim, os estudos de caso desenvolvidos nesta monografia constituem um guia prático para avaliação e comparação de diferentes configurações, servindo como referência para o planejamento de ambientes hospitalares inteligentes, consistentes e sustentáveis. Como direções para trabalhos futuros, propõe-se a realização de análises de desempenho, com foco no impacto que a disponibilidade dos componentes pode ter no tempo de resposta e no desempenho operacional do sistema. Ademais, recomenda-se a ampliação do modelo para incluir fatores externos adicionais, como falhas em outros componentes da infraestrutura, ameaças cibernéticas e eventos ambientais, com o intuito de elevar ainda mais o grau de realismo e aplicabilidade dos modelos propostos.

9 Publicações

Barbosa, V., Sabino, A., **Lima, L. N.**, Brito, C., Feitosa, L., Pereira, P., Maciel, P., Nguyen, T. A. e Silva, F. A. *Performance Evaluation of IoT-Based Industrial Automation Using Edge, Fog, and Cloud Architectures*. Journal of Network and Systems Management, v. 33, p. 3, 2025.

Araújo, I., Barbosa, V., **Lima, L. N.**, Silva, L. G., Brito, C., Fé, I., Lopes, L., Andrade, E., Leão, E. e Silva, F. A. *Assessing the performance of a fault tolerant LoRaWAN architecture with a focus on the sensor layer and data retransmission strategy*. Cluster Computing, v. 28, p. 3, 2025.

Lopes, L., Araújo, J. M., **Lima, L. N.**, Barbosa, V., Sabino, A., Silva, L. G., Feitosa, L., Rocha, G. e Silva, F. A. *Performance Evaluation of a Camera Surveillance System in Smart Buildings Using Queuing Models*. Journal of Internet Services and Applications, v. 17, p. 1, 2025.

Rocha, J. W., Gomes, E., Barbosa, V., Sabino, A., **Lima, L. N.**, Callou, G., Silva, F. A., Choi, E., Nguyen, T. A., Min, D. e Lee, J. W. *Enhancing data harvesting systems: Performance quantification of Cloud-Edge-sensor networks using queueing theory*. ICT Express, v. 11, p. 1, 2025.

Feitosa, L., Barbosa, V., Sabino, A., **Lima, L. N.**, Fé, I., Silva, L. G., Callou, G., Carvalho, J., Leão, E., Nguyen, T. A., Rego, P. e Silva, F. A. *A comprehensive performance evaluation of container migration strategies*. Computing, v. 107, p. 1–39, 2025.

Alves, M. O., **Lima, L. N.**, Sabino, A., Barbosa, V., Silva, L. G., Feitosa, L., Righi, R. e Silva, F. A. *Análise de Desempenho e Planejamento de Capacidade em Arquiteturas MQTT para Aplicações IoT*. In: Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação, 2025.

Sabino, A., **Lima, L. N.**, Barbosa, V., Freitas, L., Feitosa, L., Caetano, M. F., Barreto, P. S. e Silva, F. A. *Arquitetura Distribuída para Monitoramento de Incêndios: Uma Abordagem com Redes de Petri Estocásticas*. In: XVI Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA), 2025.

Lopes, L., Araújo, J. M., **Lima, L. N.**, Barbosa, V., Sabino, A., Silva, L. G., Feitosa, L., Rocha, G. e Silva, F. A. *Avaliação de Dependabilidade e Análise de Sensibilidade de um Sistema de Cuidado Inteligente para Idosos*. In: LII Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH), 2025.

Araújo, J. M., Lopes, L. S., **Lima, L. N.**, Barbosa, V., Sabino, A., Feitosa, L., Delicato, F. C., Nguyen, T. A. e Silva, F. A. *Optimizing Intelligent Camera Surveillance in Smart Buildings: An SPN-based Edge-Fog Analysis*. In: XLIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2025), 2025. p. 15.

Macedo, J. R. L., Barbosa, V., Feitosa, L., Rocha Filho, G. P., Meneguette, R. I.,

Lima, L. N. e Silva, F. A. *Avaliação de Desempenho de Redes Veiculares Ad Hoc com RSUs e Filas de Prioridade*. In: IX Workshop de Computação Urbana (CoUrb 2025), 2025.

Araújo, G., Barbosa, V., **Lima, L. N.**, Sabino, A., Brito, C., Fé, I., Rego, P., Choi, E., Min, D., Nguyen, T. A. e Silva, F. A. *Energy Consumption in Microservices Architectures: A Systematic Literature Review*. IEEE Access, v. 1, p. 1–1, 2024.

Lima, L. N., Sabino, A., Barbosa, V., Feitosa, L., Brito, C., Araujo, J. e Silva, F. A. *Dependability analysis and disaster recovery measures in smart hospital systems*. Journal of Reliable Intelligent Environments, p. 4, 2024.

Sabino, A., **Lima, L. N.**, Brito, C., Feitosa, L., Caetano, M. F., Barreto, P. S. e Silva, F. A. *Forest fire monitoring system supported by unmanned aerial vehicles and edge computing: a performance evaluation using petri nets*. Cluster Computing – The Journal of Networks, Software Tools and Applications, v. 1, p. 4, 2024.

Barbosa, V., Sabino, A., **Lima, L. N.**, Brito, C., Feitosa, L., Andrade, E., Pereira, P. e Silva, F. A. *Dependability Evaluation of a Smart Poultry Monitoring System with Disaster Recovery Mechanism*. Journal of the Brazilian Computer Society (Impresso), v. 1, p. 4, 2024.

Brito, C., Barbosa, V., **Lima, L. N.**, Rocha, J. W., Araújo, J. M., Lopes, L., Rego, P. A. L., Sales, M., Callou, G., Fé, I. e Silva, F. A. *Performance evaluation of a video surveillance system using stochastic petri nets for license plate detection on highways*. Journal of Reliable Intelligent Environments, v. 1, p. 2, 2024.

Silva, F. A., Barbosa, V., **Lima, L. N.**, Sabino, A., Rego, P., Bittencourt, L. F., Lee, J. W., Min, D. e Nguyen, T. A. *Efficient Strategies for Unmanned Aerial Vehicle Flights: Analyzing Battery Life and Operational Performance in Delivery Services using Stochastic Models*. IEEE Access, v. 1, p. 1–1, 2024.

Feitosa, L., Barbosa, V., Sabino, A., **Lima, L. N.**, Fé, I., Silva, B. e Silva, F. A. *Uma Comparação de Múltiplas Políticas de Migração de Contêineres Suportadas pela Ferramenta CRIU*. In: XLII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2024), Niterói – RJ, 2024.

Silva, F. A., Barbosa, V., Sabino, A., **Lima, L. N.**, Fé, I., Rego, P. e Bittencourt, L. F. *Entregas Aéreas por Drones Cooperativos: Uma Avaliação de Desempenho Considerando Pontos de Recarga de Bateria*. In: LI Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH 2024), Brasil, 2024. p. 205.

Silva, L. G., Brito, C., Araujo, I., Sabino, A., **Lima, L. N.**, Gonçalves, G. D., Rocha, G., Fé, I. e Silva, F. A. *Desvendando a Elasticidade de Máquinas Virtuais em VANETs: Uma Estratégia para Aperfeiçoar o Planejamento de Capacidade em RSUs*. In: XLII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2024), Niterói – RJ, 2024.

Referências

- ABDULKAREEM, K. H. et al. Realizing an effective covid-19 diagnosis system based on machine learning and iot in smart hospital environment. *IEEE Internet of things journal*, IEEE, v. 8, n. 21, p. 15919–15928, 2021. Citado na página 12.
- ALSHEHRI, F.; MUHAMMAD, G. A comprehensive survey of the internet of things (iot) and ai-based smart healthcare. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 3660–3678, 2020. Citado na página 12.
- AMMAR, M. B. et al. Requirements for energy-harvesting-driven edge devices using task-offloading approaches. *Electronics*, MDPI, v. 11, n. 3, p. 383, 2022. Citado na página 12.
- ANDRADE, E.; NOGUEIRA, B. Dependability evaluation of a disaster recovery solution for iot infrastructures. *The Journal of Supercomputing*, Springer, v. 76, n. 3, p. 1828–1849, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 17, 21 e 22.
- ARAÚJO, E. et al. Dependability impact in the smart solar power systems: An analysis of smart buildings. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 1, p. 124, 2020. Citado na página 32.
- ARAÚJO, G. et al. Vehicular cloud computing networks: Availability modelling and sensitivity analysis. *International Journal of Sensor Networks*, Inderscience Publishers (IEL), v. 36, n. 3, p. 125–138, 2021. Citado na página 18.
- BRADLEY, D. et al. The internet of things—the future or the end of mechatronics. *Mechatronics*, Elsevier, v. 27, p. 57–74, 2015. Citado na página 12.
- BURIAN, R.; GONTIJO, M.; ALVAREZ, H. Robustness and reliability in smart grid solutions. In: IEEE. *2019 IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. [S.l.], 2019. p. 59–62. Citado na página 12.
- COSTA, I. et al. Availability evaluation and sensitivity analysis of a mobile backend-as-a-service platform. *Quality and Reliability Engineering International*, Wiley Online Library, v. 32, n. 7, p. 2191–2205, 2016. Citado na página 18.
- EXEMPLAR, N. A.; AUTOR, E. O. Modeling-based approach for performance and availability evaluation of smart hospital iomt systems. *Journal of Medical Systems*, Springer, v. 47, n. 4, p. e1042, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- FEITOSA, L. et al. Performance evaluation of message routing strategies in the internet of robotic things using the d/m/c/k/fcfs queuing network. *Electronics*, MDPI, v. 10, n. 21, p. 2626, 2021. Citado na página 18.
- HEALTH, F.; EXPERTS, G. Forecasting the future of smart hospitals: A delphi study. *Health Informatics Journal*, SAGE, v. 30, n. 1, p. 1–19, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- ISLAM, J. et al. Resource-aware dynamic service deployment for local iot edge computing: Healthcare use case. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 115868–115884, 2021. Citado na página 13.

- KLEIJNEN, J. P. Sensitivity analysis and optimization in simulation: design of experiments and case studies. In: *Proceedings of the 27th conference on Winter simulation*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 133–140. Citado na página 18.
- LAPRIE, J.; AVIZIENIS, A.; KOPETZ, H. Dependability: Basic concepts and terminology. 530 springer-verlag new york. *Inc., Secaucus, NJ, USA*, v. 531, 1992. Citado na página 17.
- LISBOA, M. F. F. da S. et al. Modeling the availability of an e-health system integrated with edge, fog and cloud infrastructures. In: IEEE. *2018 IEEE symposium on computers and communications (ISCC)*. [S.l.], 2018. p. 00416–00421. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- LORIA, G.; NAYAK, Y.; NISHIT, N. A comprehensive analysis of smart hospital technologies and applications – our experience and narrative review of literature. *Apollo Medicine*, 2024. Citado na página 14.
- MACIEL, P. et al. Mercury: Performance and dependability evaluation of systems with exponential, expolynomial, and general distributions. In: IEEE. *2017 IEEE 22nd Pacific Rim international symposium on dependable computing (PRDC)*. [S.l.], 2017. p. 50–57. Citado na página 26.
- MACIEL, P. R. et al. Dependability modeling. In: *Performance and dependability in service computing: concepts, techniques and research directions*. [S.l.]: IGI Global, 2012. p. 53–97. Citado na página 16.
- MARQUSEE, J.; ERICSON, S.; JENKET, D. *Emergency diesel generator reliability and installation energy security*. [S.l.], 2020. Citado na página 32.
- MARSAN, M. A. Stochastic petri nets: an elementary introduction. In: SPRINGER. *Advances in Petri Nets 1989 9*. [S.l.], 1990. p. 1–29. Citado na página 16.
- MARTIN, G. et al. The effects and preventability of 2627 patient safety incidents related to health information technology failures: a retrospective analysis of 10 years of incident reporting in england and wales. Elsevier, v. 1, n. 3, 2019. Citado na página 14.
- MoDCS Research Group. *Mercury Tool Manual*. Recife, Brazil, 2020. [Online] <http://www.modcs.org>. Citado na página 27.
- MOHANTY, A.; MOHAPATRA, A. G.; MOHANTY, S. Bridging gaps in patient care with ai-driven iomt. In: . [S.l.]: Advances in healthcare information systems and administration book series, 2024. p. 213–228. Citado na página 14.
- NGUYEN, T. A. et al. Performability evaluation of load balancing and fail-over strategies for medical information systems with edge/fog computing using stochastic reward nets. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 18, p. 6253, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- NGUYEN, T. A. et al. Dependability and security quantification of an internet of medical things infrastructure based on cloud-fog-edge continuum for healthcare monitoring using hierarchical models. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 8, n. 21, p. 15704–15748, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

- PERDUE, M.; GOTTSCHALG, R. Energy yields of small grid connected photovoltaic system: effects of component reliability and maintenance. *IET Renewable Power Generation*, Wiley Online Library, v. 9, n. 5, p. 432–437, 2015. Citado na página 32.
- PETERSON, J. L. *Petri net theory and the modeling of systems*. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 1981. Citado na página 16.
- PETRI, C. A. Kommunikation mit automaten. 1962. Disponível em: <<http://edoc.sub.uni-hamburg.de/informatik/volltexte/2011/160/>><http://edoc.sub.uni-hamburg.de/informatik/volltexte/2011/160/>. Citado na página 16.
- PFENNINGER, E.; KÖNIGSDORFER, M. [it failures in hospitals - structures and processes in hospitals for coping cyber attacks]. *Anesthesiologie Intensivmedizin Notfallmedizin Schmerztherapie*, v. 59 5, p. 311–323, 2024. Citado na página 14.
- PINHEIRO, T. et al. The mercury environment: a modeling tool for performance and dependability evaluation. *Intelligent Environments 2021*, 2021. Citado na página 26.
- RAHMANI, A. M.; MIRMAHALEH, S. Y. H. Flexible-clustering based on application priority to improve iomt efficiency and dependability. *Sustainability*, MDPI, v. 14, n. 17, p. 10666, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- RAMPINELLI, G. A. Study of electrical and thermal characteristics of inverters for grid-connected photovoltaic systems; estudo de características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados a rede. 2010. Citado na página 24.
- REISIG, W. *Petri Nets, volume 4 of EATCS Monographs in Computer Science*. [S.l.]: Springer Verlag, 1985. Citado na página 16.
- RODRIGUES, L. et al. Modelo estocástico para avaliação de disponibilidade de hospitais inteligentes. In: SBC. *Anais do XIX Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*. [S.l.], 2020. p. 145–156. Citado na página 16.
- RODRIGUES, L. et al. Performance and availability evaluation of an smart hospital architecture. *Computing*, Springer, v. 103, p. 2401–2435, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 12, 15, 21, 22 e 32.
- SANTOS, G. L. et al. The internet of things for healthcare: Optimising e-health system availability in the fog and cloud. *International Journal of Computational Science and Engineering*, Inderscience Publishers (IEL), v. 21, n. 4, p. 615–628, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- SANTOS, G. L. et al. Maximising the availability of an internet of medical things system using surrogate models and nature-inspired approaches. *International Journal of Grid and Utility Computing*, Inderscience Publishers (IEL), v. 13, n. 2-3, p. 291–308, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- SANTOS, L. et al. Data processing on edge and cloud: a performability evaluation and sensitivity analysis. *Journal of Network and Systems Management*, Springer, v. 29, n. 3, p. 27, 2021. Citado na página 18.

- SILVA, F. A. et al. Model-driven impact quantification of energy resource redundancy and server rejuvenation on the dependability of medical sensor networks in smart hospitals. *Sensors*, MDPI, v. 22, n. 4, p. 1595, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 12, 30 e 32.
- SILVA, L. G. et al. Urban advanced mobility dependability: A model-based quantification on vehicular ad hoc networks with virtual machine migration. *Sensors*, MDPI, v. 23, n. 23, p. 9485, 2023. Citado na página 32.
- SOOKHAK, M. et al. Remote data auditing in cloud computing environments: A survey, taxonomy, and open issues. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ACM New York, NY, USA, v. 47, n. 4, p. 1–34, 2015. Citado na página 13.
- SRIVASTAVA, J. et al. Internet of medical things (iomt)-based smart healthcare system: Trends and progress. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Hindawi, v. 2022, 2022. Citado na página 12.
- STRIELKINA, A.; KHARCHENKO, V.; UZUN, D. Availability models for healthcare iot systems: Classification and research considering attacks on vulnerabilities. In: IEEE. *2018 IEEE 9th international conference on dependable systems, services and technologies (DESSERT)*. [S.l.], 2018. p. 58–62. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- VALENTIM, T. et al. Availability assessment of internet of medical things architecture using private cloud. In: SBC. *Anais do L Seminário Integrado de Software e Hardware*. [S.l.], 2023. p. 13–23. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- VOLOVOI, V. Stochastic petri nets modeling using spn@. In: IEEE. *RAMS'06. Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2006*. [S.l.], 2006. p. 75–81. Citado na página 16.



**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DIGITAL NA BIBLIOTECA
“JOSÉ ALBANO DE MACEDO”**

Identificação do Tipo de Documento

- Tese
- Dissertação
- Monografia
- Artigo

Eu, Luiz Nelson dos Santos Lima, autorizo com base na Lei Federal nº 9.610 de 19 de Fevereiro de 1998 e na Lei nº 10.973 de 02 de dezembro de 2004, a biblioteca da Universidade Federal do Piauí a divulgar, gratuitamente, sem ressarcimento de direitos autorais, o texto integral da publicação Análise de Dependabilidade e Medidas de Recuperação de Desastres em Sistemas Hospitalares Inteligentes de minha autoria, em formato PDF, para fins de leitura e/ou impressão, pela internet a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade.

Picos-PI, 28 de junho de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIZ NELSON DOS SANTOS LIMA
Data: 02/07/2025 21:21:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura