

Avaliação de Dependabilidade e Análise de Sensibilidade de um Sistema de Cuidado Inteligente para Idosos

**Lucas Silva Lopes¹, José Miqueias Araújo¹, Luiz Nelson Lima¹,
Vandirleya Barbosa¹, Arthur Sabino¹, Luis Guilherme Silva¹
Leonel Feitosa¹, Geraldo P. Rocha Filho² e Francisco Airton Silva¹**

¹Laboratório de Pesquisa Aplicada a Sistemas Distribuídos (PASID),
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Caixa postal 64607-670, Picos, Piauí, Brasil.

²Universidade Estadual do Sudoeste Bahia – UESB
Caixa postal 45083-900, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

{lucaslopes092020, jmiqueias, luizznelson}@ufpi.edu.br

{vandirleya.barbosa, arthursabino, luis.e, leonelfeitosa}@ufpi.edu.br

geraldo.rocha@uesb.edu.br, faps@ufpi.edu.br

Resumo. *O envelhecimento populacional exige tecnologias avançadas para monitoramento remoto de idosos. Este trabalho emprega IoT e dispositivos vestíveis para coleta e análise de dados fisiológicos em tempo real. Redes de Petri Estocásticas (SPN) foram usadas para avaliar a confiabilidade e disponibilidade do sistema, identificando vulnerabilidades antes da implementação. A análise revelou que a conectividade WiFi é o principal fator crítico para a disponibilidade, impactando o tempo de inatividade. Essa abordagem busca auxiliar os projetistas de sistemas na otimização e ajustes no design de sistema.*

Abstract. *The aging population demands advanced technologies for remote monitoring of the elderly. This work uses IoT and wearable devices to collect and analyze physiological data in real time. Stochastic Petri Nets (SPN) were used to assess the reliability and availability of the system, identifying vulnerabilities before implementation. The analysis revealed that WiFi connectivity is the main critical factor for availability, impacting downtime. This approach aims to assist system designers in optimizing and adjusting system designs.*

1. Introdução

O envelhecimento populacional é uma realidade global que impõe desafios significativos aos sistemas de saúde, exigindo soluções tecnológicas capazes de oferecer cuidados mais eficazes e acessíveis. Projeções da Organização Mundial da Saúde (OMS) indicam que, até 2050, o número de pessoas com 60 anos ou mais alcançará 2,1 bilhões, intensificando a necessidade de monitoramento contínuo e intervenções rápidas em situações críticas [World Health Organization]. Neste contexto, a Internet das Coisas (IoT) tem se consolidado como uma alternativa promissora para otimizar o cuidado aos idosos, permitindo o monitoramento remoto de parâmetros fisiológicos por meio de dispositivos

vestíveis. Essas tecnologias oferecem benefícios como resposta ágil a emergências, maior autonomia para os idosos e redução da sobrecarga nos serviços de saúde [Tun et al. 2021].

Apesar do potencial dessas soluções, sua eficácia depende diretamente da confiabilidade e disponibilidade dos sistemas envolvidos. Falhas inesperadas podem comprometer a operação, resultando em atrasos no atendimento e colocando em risco a segurança dos usuários [Majumder et al. 2017]. Além disso, a implementação desses sistemas enfrenta barreiras como a necessidade de infraestrutura robusta, custos elevados e desafios na manutenção da qualidade do serviço em diferentes cenários operacionais [Lima et al. 2024]. Assim, garantir que essas tecnologias operem de forma contínua e eficiente torna-se essencial para seu sucesso e adoção em larga escala.

Diante desses desafios, este trabalho propõe a modelagem e avaliação da confiabilidade e disponibilidade de um sistema inteligente de cuidado para idosos utilizando Redes de Petri Estocásticas (SPN). Essa abordagem permite simular falhas e avaliar o impacto de diferentes variáveis antes da implementação prática, reduzindo riscos e aprimorando o desempenho do sistema. Além disso, aplicamos a metodologia *Design of Experiments* (DoE) para identificar os fatores críticos que afetam a disponibilidade, proporcionando uma base quantitativa para otimizações futuras. Os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento de soluções mais seguras e eficazes, alinhadas às crescentes demandas da saúde digital [Balbo 2000, Alsadoon et al. 2024].

2. Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta estudos recentes que compartilham contextos ou abordagens semelhantes ao problema desta pesquisa. Os estudos selecionados avaliam a disponibilidade e/ou confiabilidade de sistemas de monitoramento de saúde. A escolha dos estudos baseou-se em cinco critérios de comparação: contexto, modelo, disponibilidade, confiabilidade e análise de sensibilidade. A Tabela 1 apresenta os estudos selecionados e os critérios de comparação correspondentes.

A maioria dos trabalhos relacionados concentra-se no monitoramento de saúde, abordando infraestrutura hospitalar [Nguyen et al. 2021b, Santos et al. 2020, Valentim et al. 2023], monitoramento hospitalar [Rodrigues et al. 2021, Nguyen et al. 2021a, Lima et al. 2024, Silva et al. 2022] e redes WBAN para cuidados médicos [Tang and Xie 2021, Sivaparthipan and Karthick 2023]. Apesar da relevância dos estudos existentes, o monitoramento específico para idosos ainda é pouco explorado. O ambiente domiciliar impõe limitações como infraestrutura reduzida e falta de suporte técnico, o que exige soluções distintas das aplicadas em hospitais. Este trabalho busca preencher essa lacuna ao modelar e avaliar a dependabilidade de um sistema de cuidado inteligente para idosos no ambiente domiciliar.

A disponibilidade e a confiabilidade são métricas essenciais na continuidade operacional dos sistemas de monitoramento. Enquanto a disponibilidade é amplamente abordada na literatura [Nguyen et al. 2021b, Rodrigues et al. 2021, Tang and Xie 2021, Santos et al. 2020, Nguyen et al. 2021a, Sivaparthipan and Karthick 2023, Lima et al. 2024, Valentim et al. 2023, Silva et al. 2022], a confiabilidade recebe atenção em um número menor de estudos [Nguyen et al. 2021b, Lima et al. 2024, Silva et al. 2022]. Este trabalho propõe uma abordagem conjunta para otimizar ambas, reduzindo falhas e melhorando a continuidade operacional do sistema.

Tabela 1. Tabela comparativa dos trabalhos relacionados

| Trabalho | Contexto | Tipo de Modelo ◇ | Disponibilidade | Confiabilidade | Análise de Sensibilidade |
|-----------------------------------|--|------------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| [Nguyen et al. 2021b] | Monitoramento de Infraestrutura de Saúde | FT, CTMC | ✓ | ✓ | ✓ |
| [Rodrigues et al. 2021] | Monitoramento Hospitalar de Saúde | SPN | ✓ | ✗ | ✓ |
| [Tang and Xie 2021] | Monitoramento de Saúde WBAN | Cadeia de Markov | ✓ | ✗ | ✗ |
| [Santos et al. 2020] | Monitoramento de Infraestrutura de Saúde | RBD, SPN | ✓ | ✗ | ✗ |
| [Nguyen et al. 2021a] | Monitoramento Hospitalar de Saúde | SRN | ✓ | ✗ | ✗ |
| [Sivaparthipan and Karthick 2023] | Monitoramento de Saúde WBAN | RBD, CTMC | ✓ | ✗ | ✗ |
| [Lima et al. 2024] | Monitoramento de Desastres Hospitalares de Saúde | SPN | ✓ | ✓ | ✓ |
| [Valentim et al. 2023] | Monitoramento de Infraestrutura de Saúde | GSPN | ✓ | ✗ | ✗ |
| [Silva et al. 2022] | Monitoramento Hospitalar de Saúde | SPN | ✓ | ✓ | ✓ |
| Este Trabalho | Monitoramento de Saúde para Idosos | SPN | ✓ | ✓ | ✓ |

Nota ◇: FT - Fault Tree; CTMC - Continuous-Time Markov Chain; SPN - Stochastic Petri Nets; RBD - Reliability Block Diagram; SRN - Stochastic Reward Nets; GSPN - Generalized Stochastic Petri Nets.

Diversos modelos são utilizados na análise da dependabilidade, como SPN [Rodrigues et al. 2021, Santos et al. 2020, Lima et al. 2024], CTMC [Nguyen et al. 2021b, Sivaparthipan and Karthick 2023, Silva et al. 2022], RBD [Santos et al. 2020, Sivaparthipan and Karthick 2023] e SRN [Nguyen et al. 2021a]. Os SPNs destacam-se por sua precisão na modelagem de sistemas críticos, razão pela qual foram adotados neste estudo. Além disso, a análise de sensibilidade por meio da metodologia DoE permitiu identificar fatores críticos, como o Tempo Médio até a Falha (MTTF), contribuindo para o aprimoramento da disponibilidade dos sistemas.

3. Arquitetura

A arquitetura do sistema de cuidado inteligente para idosos foi projetada para monitorar continuamente a saúde dos usuários e detectar problemas de forma proativa. Dispositivos vestíveis (*smartwatches*) coletam dados fisiológicos, que são transmitidos via WiFi para um servidor de borda responsável pelo processamento em tempo real. Algoritmos de detecção, como *Random Forest* [Proniewska et al. 2021], analisam padrões e identificam anomalias, como alterações na frequência cardíaca ou quedas. Caso necessário, alertas automáticos são enviados aos cuidadores por meio de um sistema *publish/subscribe*.

Falhas no sistema podem comprometer a segurança dos idosos, tornando essencial um servidor de borda para minimizar a latência e garantir disponibilidade. Essa estrutura

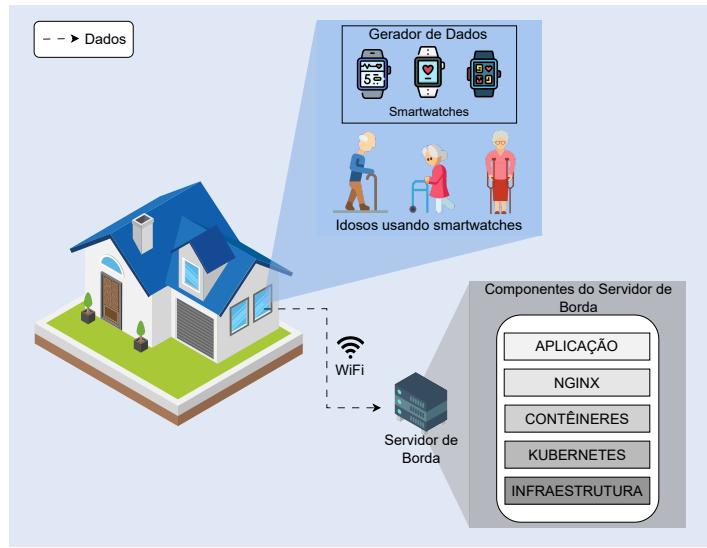


Figura 1. Arquitetura de um sistema de cuidados inteligentes para idosos.

é organizada em cinco camadas: aplicação, Nginx, contêineres, Kubernetes e infraestrutura, onde cada nível depende dos inferiores para funcionar corretamente. O Kubernetes gerencia os contêineres, que fornecem o ambiente necessário para a execução do Nginx e das aplicações responsáveis pelo processamento dos dados e envio de alertas.

Para garantir a confiabilidade do sistema, é fundamental realizar uma avaliação de dependabilidade antes de sua implementação. Essa análise identifica possíveis falhas e observa os tempos de falha e recuperação de cada componente. A modelagem foi realizada utilizando SPN, que permitem a simulação e análise do comportamento do sistema [Balbo 2000]. As simulações foram conduzidas com a ferramenta Mercury [Maciel et al. 2017], possibilitando uma avaliação detalhada dos fatores que impactam o funcionamento e a disponibilidade do sistema.

4. Modelos SPN

Esta seção descreve como as SPNs foram modeladas com base na arquitetura proposta. As SPNs são uma técnica usada para modelar sistemas distribuídos e paralelos, permitindo a representação formal e eventos estocásticos. Essa abordagem foi aplicada para capturar a dinâmica de sistemas como o de cuidado inteligente para idosos, nos quais confiabilidade e disponibilidade são fatores importantes [Balbo 2000]. A modelagem e as simulações foram realizadas com a Ferramenta Mercury, que oferece suporte para a criação, análise e visualização de SPNs [Maciel et al. 2017], permitindo avaliar a arquitetura e identificar fatores que impactam o funcionamento do sistema.

4.1. Modelo de Disponibilidade

A Figura 2 ilustra o modelo de disponibilidade. O modelo inclui diversos componentes, como *smartwatches* usados por idosos para gerar dados, conectividade WiFi, servidores de borda (*Edge Servers*) com componentes como aplicações, contêineres, nginx, kubernetes e a camada de infraestrutura. Esses elementos trabalham em conjunto para monitorar e

gerenciar a saúde dos idosos, garantindo uma comunicação eficiente e um processamento rápido dos dados coletados pelos *smartwatches*.

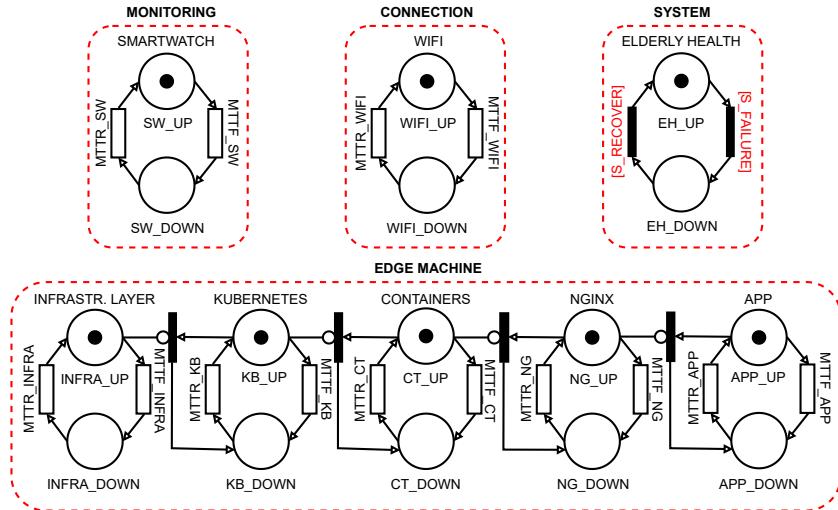


Figura 2. Representação do modelo de disponibilidade do sistema, considerando falhas e recuperações dos componentes.

Cada componente do sistema possui uma transição temporizada que representa o Tempo Médio até a Falha (MTTF) e o Tempo Médio até o Reparo (MTTR). O componente *Smart Elderly Healthcare* reflete a situação do sistema de monitoramento de saúde dos idosos, permanecendo ativo quando todos os componentes estão operacionais. O sistema é considerado operacional quando há um token no lugar *EH_UP* e torna-se inoperante quando há um token em *EH_DOWN*.

A mudança entre os estados ativo e inativo ocorre por meio das transições [S.RECOVER] e [S.FAILURE]. A transição [S.FAILURE] é acionada quando pelo menos um componente entra em estado inativo, podendo ser o *smartwatch*, o WiFi ou todos os elementos do servidor de borda, incluindo infraestrutura, Kubernetes, contêineres, Nginx e aplicação. Já a transição [S.RECOVER] é ativada quando todos os componentes do sistema retornam ao estado ativo, garantindo o restabelecimento da operação.

O funcionamento do sistema depende da integridade de seus componentes. O *smartwatch* está ativo quando há um token em *SW_UP* e inativo quando há um token em *SW_DOWN*, lógica semelhante à do WiFi, que opera com tokens em *WIFI_UP* e *WIFI_DOWN*. O servidor de borda só permanece ativo se houver tokens simultaneamente em *INFRA_UP*, *KB_UP*, *CT_UP*, *NG_UP* e *APP_UP*; caso contrário, ele se torna inoperante. Além disso, a *Edge Machine* é organizada em camadas interdependentes, de modo que a falha de um componente em um nível inferior pode comprometer os níveis superiores, tornando essencial a alta disponibilidade e confiabilidade para garantir um monitoramento contínuo e seguro da saúde dos idosos.

A equação que calcula a disponibilidade (*availability*) do modelo proposto é dada pela Equação 1, ou seja, a probabilidade de que *ELDERLY HEALTH* estar operacional. O P representa a probabilidade, e $\#$ representa o número de tokens em um local específico. O A representa a disponibilidade do sistema, definida como a probabilidade P de que o número de tokens $\#EH_UP$ em um local específico seja maior que zero. Isso indica que

o sistema está operacional e acessível. Portanto, a equação de disponibilidade calcula a porcentagem em que o sistema está disponível, ou seja, indica a capacidade do sistema de permanecer ativo e atender aos usuários conforme esperado.

$$A = P \{ \#EH_UP > 0 \} \quad (1)$$

O tempo de inatividade *downtime*, é uma métrica que quantifica o período em que um sistema está fora de operação. Para o modelo proposto, o tempo de inatividade D é calculado utilizando a Equação 2. Na equação P representa a probabilidade de que o número de tokens no lugar $\#EH_UP$ seja maior que 0. A equação de tempo de inatividade calcula a probabilidade de que o sistema esteja inoperante. Multiplicando essa probabilidade pelo total de horas em um ano ($8766h$), obtemos o tempo de inatividade esperado em horas por ano.

$$D = (1 - P \{ \#EH_UP > 0 \}) \times 8766 \quad (2)$$

4.2. Modelo de Confiabilidade

A Figura 3 ilustra o modelo de confiabilidade do sistema. Este modelo inclui todos os componentes presentes na arquitetura, *smartwatches*, conectividade WiFi, servidores de borda com aplicações, contêineres, nginx, kubernetes e a camada de infraestrutura. Esses elementos trabalham em conjunto, coletam, analisam e disponibilizam dados sobre a saúde dos idosos. Neste modelo foram retiradas as transições de recuperação para uma análise de confiabilidade.

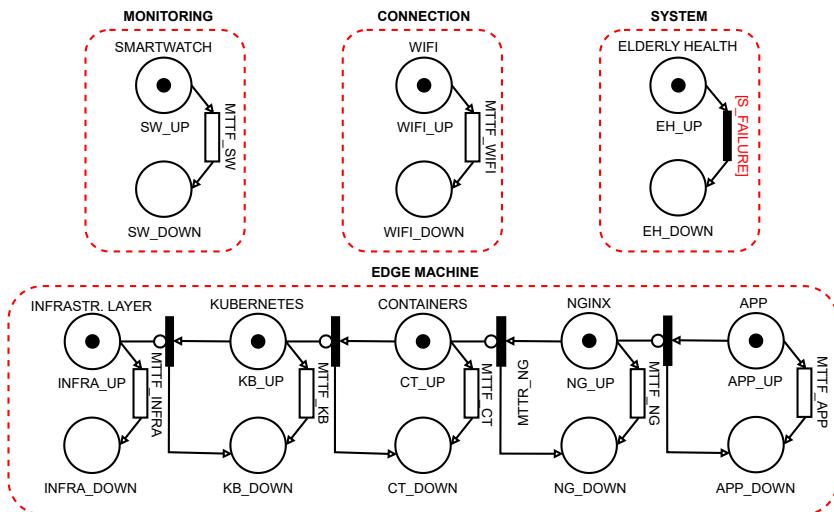


Figura 3. Modelo de confiabilidade do sistema, avaliando o tempo até a falha sem considerar recuperações.

A confiabilidade (*reliability*) é a probabilidade condicional de um sistema permanecer operacional durante um intervalo de tempo $[0, t]$, considerando que estava operacional em $t = 0$ [Silva et al. 2022]. No entanto, neste modelo, os componentes não possuem as transições de MTTR que permitem sua recuperação, assim é possível identificar quanto tempo o sistema pode prover uma operação contínua, a confiabilidade R é calculada utilizando a Equação 3. O R representa a confiabilidade do sistema, definida como 1 menos a

probabilidade P de que o número de tokens no local `#EH_DOWN` seja igual a zero. Isso indica que o sistema não está operacional e acessível. Portanto, a equação de confiabilidade calcula a porcentagem em que o sistema está disponível, ou seja, indica a capacidade do sistema de permanecer ativo e atender aos usuários conforme esperado.

$$R = 1 - P \{ \#EH_DOWN > 0 \} \quad (3)$$

5. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade do modelo SPN de disponibilidade busca identificar os fatores que impactam a operação do sistema, avaliando como variações em seus componentes influenciam a disponibilidade. O planejamento experimental fatorial é utilizado para estruturar essa investigação, permitindo medir o impacto de diferentes parâmetros [Rocha et al. 2019]. Em sistemas de cuidados inteligentes para idosos, a disponibilidade é essencial, pois sua falha pode levar à perda de informações vitais e aumentar o risco de acidentes. Para isso, a análise segue uma abordagem organizada, selecionando os componentes mais relevantes e definindo as variáveis independentes a serem testadas, garantindo uma avaliação precisa dos fatores críticos.

5.1. Desenho da Análise

Este estudo emprega técnicas de DoE para realizar uma análise de sensibilidade, conforme descrito por [Antony 2023], [Santos et al. 2021] e [Montgomery 2017]. O DoE envolve o planejamento e análise de experimentos, manipulando variáveis de entrada para identificar os fatores que impactam a resposta do sistema. Neste contexto, utilizamos gráficos recomendados pela literatura, como o gráfico de efeito dos fatores, que ordena visualmente a influência dos fatores na métrica analisada, e os gráficos de interação, que demonstram como diferentes variáveis se relacionam. Essas ferramentas permitem identificar e priorizar os fatores mais críticos.

O experimento foi realizado considerando a arquitetura proposta. A interação entre os fatores foi verificada com base na métrica de disponibilidade, escolhida devido ao seu impacto direto na percepção do usuário final. Os fatores adotados para este estudo são os MTTFs dos componentes da arquitetura proposta. Cada fator possui dois níveis, denominados configuração baixa e configuração alta. Estes níveis foram calculados considerando os valores base utilizados como parâmetros para o modelo apresentados na Tabela 2 extraídos da literatura, [Araujo et al. 2016, De Simone et al. 2024]. A Tabela 3 apresenta todos os fatores e níveis analisados.

Tabela 2. Parâmetros do utilizados no modelo

| Componente | MTTF (h) | MTTR (h) |
|----------------------|----------|-------------|
| Smartwatch | 9.964950 | 0.081748 |
| WIFI | 5.996402 | 0.078965 |
| Containers | 1258 | 0.00833333 |
| Nginx | 788.4 | 1 |
| APP | 788.4 | 1 |
| Kubernetes | 2516 | 0.000555556 |
| Infrastructure layer | 60000 | 0.0833333 |

Tabela 3. Fatores e níveis da simulação

| Nome do fator | Config. baixa | Config. alta |
|---------------|---------------|--------------|
| MTTF_SW | 4.982475 | 14.947425 |
| MTTF_WIFI | 2.998201 | 8.994603 |
| MTTF_CT | 629.0 | 1887.0 |
| MTTF_NG | 394.2 | 1182.6 |
| MTTF_WAT | 394.2 | 1182.6 |
| MTTF_KB | 1258.0 | 3774.0 |
| MTTF_INFRA | 30000.0 | 90000.0 |

A Tabela 3 descreve os fatores e os respectivos níveis utilizados na simulação. Esses valores são calculados como 50% acima e 50% abaixo dos valores de referência

apresentados na Tabela 2. Cada fator representa uma variável específica do sistema, enquanto os níveis indicam os diferentes valores que essas variáveis podem assumir durante o experimento. Por exemplo, o fator MTTF_SW possui um nível baixo de 4.982475 e um nível alto de 14.947425, o que significa que o parâmetro MTTF_SW pode variar entre esses dois valores durante a simulação, permitindo avaliar seu impacto no sistema em diferentes condições.

5.2. Resultados

A Figura 4 apresenta o gráfico de efeito dos fatores, evidenciando a magnitude e a relevância de cada um em relação à métrica de disponibilidade. Esse gráfico facilita a identificação dos fatores que mais impactam as simulações, demonstrando como mudanças em seus níveis geram variações significativas nos valores de disponibilidade. Assim, é possível destacar os fatores essenciais para o desempenho do sistema, os quais devem ser priorizados nas análises e otimizações.

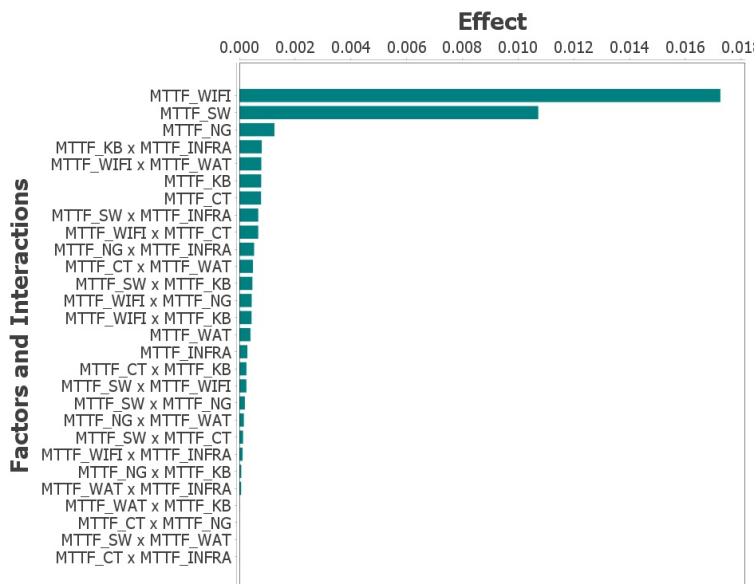
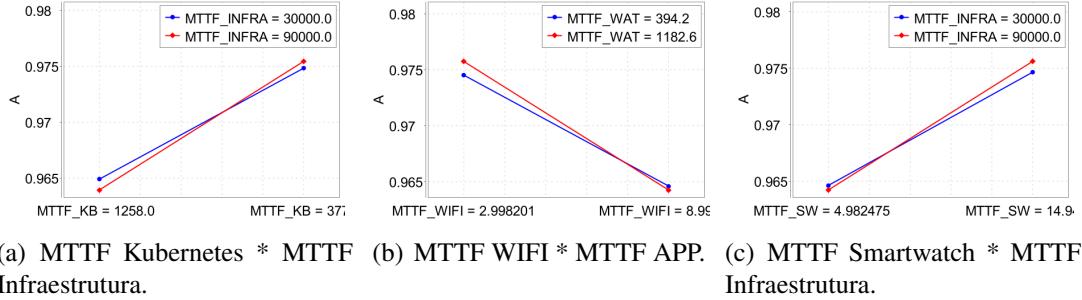


Figura 4. Impacto de diferentes fatores na métrica de disponibilidade.

Entre os fatores analisados, o MTTF_WIFI se destaca como o mais relevante, evidenciando o impacto da conexão WiFi na disponibilidade do sistema, seguido pelo MTTF_SW, que reforça a importância da confiabilidade do smartwatch. O MTTF_NG também se mostra significativo, indicando que a estabilidade do Nginx é crucial para o desempenho geral. Embora MTTF_KB, MTTF_CT e MTTF_INFRA tenham menor influência, ainda contribuem para a operação do sistema. Além disso, interações como MTTF_WIFI x MTTF_WAT (App), MTTF_SW x MTTF_INFRA e MTTF_NG x MTTF_INFRA demonstram que a combinação desses fatores pode afetar significativamente a disponibilidade. O gráfico de efeito dos fatores ajuda a visualizar essas influências, mas não determina se os efeitos aumentam ou reduzem a disponibilidade, tornando a análise detalhada essencial para otimizações e melhorias no sistema.

A Figura 5 exibe os gráficos de interação, ferramentas visuais poderosas que facilitam a compreensão das relações e influências entre variáveis em análises de dados. Esses

gráficos permitem identificar padrões complexos e interdependências entre as variáveis, mostrando como alterações em uma variável podem impactar o resultado final, levando em conta outras variáveis presentes.



(a) MTTF Kubernetes * MTTF Infraestrutura. (b) MTTF WiFi * MTTF APP. (c) MTTF Smartwatch * MTTF Infraestrutura.

Figura 5. Interação entre fatores em relação ao impacto na métrica de disponibilidade.

Os gráficos de interação analisam como diferentes combinações de fatores afetam a disponibilidade do sistema. A Figura 5(a) mostra que o aumento do tempo médio até falha do Kubernetes (MTTF_KB) reduz a frequência de falhas, resultando em maior disponibilidade, independentemente do valor de MTTF_INFRA. Da mesma forma, a Figura 5(c) revela que um MTTF_SW mais alto impacta positivamente a disponibilidade, mas seu efeito é mais significativo quando combinado com um MTTF_INFRA elevado, indicando que a infraestrutura desempenha um papel essencial na estabilidade do sistema.

Já a Figura 5(b) destaca uma relação distinta: o aumento do MTTF_WIFI reduz a disponibilidade, e essa queda é mais acentuada quando o MTTF_WAT é menor. Isso demonstra que a confiabilidade da conexão WiFi e do aplicativo devem ser ajustadas conjuntamente para minimizar impactos negativos. Essas análises reforçam a importância de equilibrar os diferentes fatores, garantindo uma operação mais estável e eficiente do sistema.

6. Estudo de Caso

Nesta seção, são apresentados os resultados da análise quantitativa dos modelos de disponibilidade e confiabilidade propostos. A avaliação foi conduzida considerando métricas de disponibilidade, tempo de inatividade e confiabilidade do sistema, com foco na influência dos valores de MTTF e MTTR do WiFi, identificado como o fator mais crítico após a análise de sensibilidade. A Tabela 2 resume os valores utilizados para cada componente do sistema, os quais foram extraídos de estudos anteriores na literatura [Araujo et al. 2016, De Simone et al. 2024].

A Figura 6 apresenta os resultados da análise numérica considerando a influência do MTTR_WIFI em dois aspectos distintos: a disponibilidade do sistema e o tempo de inatividade. Os resultados são baseados em três valores de MTTF_WIFI: 2.99 horas, 5.99 horas e 8.99 horas, com o MTTR_WIFI variando de 0.04 a 0.12 horas. O menor valor é 50% inferior ao valor base. O valor central corresponde ao valor base apresentado na Tabela 2, e o maior valor é 50% superior ao valor base.

A análise apresentada nas Figuras 6(a) e 6(b) evidencia a influência dos parâmetros MTTF_WIFI e MTTR_WIFI na disponibilidade e no tempo de inatividade

do sistema. Observa-se que a disponibilidade reduz conforme o MTTR_WIFI aumenta, indicando que tempos mais longos de recuperação comprometem a operação contínua do sistema. Por outro lado, sistemas com MTTF_WIFI mais elevados, como 8.99 horas, apresentam maior disponibilidade e menor tempo de inatividade, devido à menor frequência de falhas. Para um MTTR_WIFI de 0.12 horas, por exemplo, o tempo de inatividade varia de aproximadamente 440 horas (MTTF_WIFI de 2.99 horas) para 140 horas (MTTF_WIFI de 8.99 horas), destacando a importância de otimizar o MTTF para garantir uma operação mais estável e eficiente.

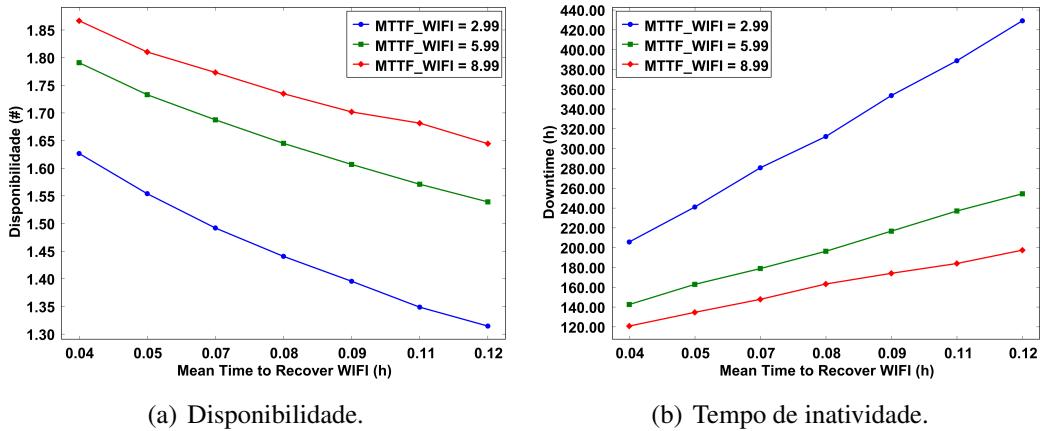


Figura 6. Resultado da análise numérica variando O tempo médio de reparo do WiFi.

A Figura 7 ilustra os resultados da análise de confiabilidade do sistema em função do MTTF do WiFi ao longo do tempo. Foram considerados três valores de MTTF_WIFI (2.0, 4.0 e 8.0 horas). Valores diferentes de MTTF_WIFI mostram como a durabilidade do componente de conectividade afeta a estabilidade do sistema. A análise revela que um MTTF_WIFI maior contribui para uma melhoria significativa na confiabilidade do sistema, com menos interrupções e maior eficiência operacional.

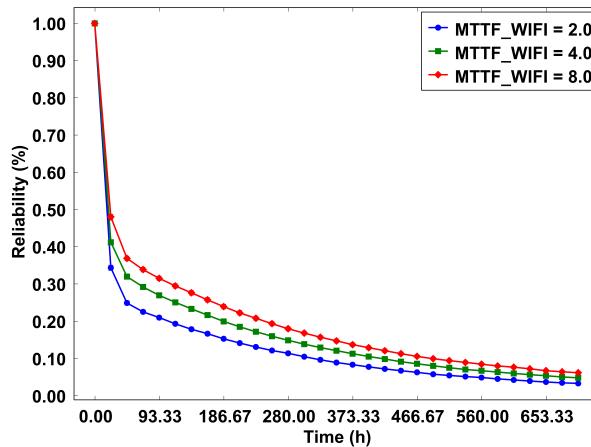


Figura 7. Confiabilidade

A análise visual apresentada na figura mostra que a confiabilidade do sistema diminui ao longo do tempo para todos os valores de MTTF_WIFI considerados. Observa-se

que sistemas com MTTF_WIFI mais elevados (8.0 horas) apresentam uma confiabilidade maior ao longo do tempo em comparação com sistemas com MTTF_WIFI mais baixos (2.0 horas). Por exemplo, após aproximadamente 186.67 horas, a confiabilidade do sistema com MTTF_WIFI de 8.0 horas é cerca de 30%, enquanto a confiabilidade do sistema com MTTF_WIFI de 2.0 horas é cerca de 10%.

7. Conclusão

Este trabalho propôs modelos SPN para a arquitetura de um sistema de cuidados inteligentes para idosos, utilizando recursos de computação de borda. O objetivo é fornecer uma ferramenta para auxiliar os administradores do sistema no planejamento da arquitetura antes da implementação efetiva, considerando diversos fatores que impactam a disponibilidade e a confiabilidade do sistema. A análise de disponibilidade indicou que a conexão WiFi é o componente mais crítico, sendo a disponibilidade do sistema sensível ao aumento do MTTR do WiFi. Observou-se que valores maiores de MTTF do WiFi resultam em menos interrupções e maior eficiência operacional, com o tempo de inatividade variando de aproximadamente 440 horas para um MTTF de 2,99 horas a 140 horas para um MTTF de 8,99 horas. Em termos de confiabilidade, um maior MTTF do WiFi melhora significativamente a confiabilidade do sistema, reduzindo as interrupções e aumentando a eficiência operacional. Esses resultados fornecem uma base para futuras otimizações e ajustes no design do sistema.

Referências

- Alsadoon, A., Al-Naymat, G., and Jerew, O. D. (2024). An architectural framework of elderly healthcare monitoring and tracking through wearable sensor technologies. *Multimedia Tools and Applications*, pages 1–46.
- Antony, J. (2023). *Design of experiments for engineers and scientists*. Elsevier.
- Araujo, C., Silva, F., Costa, I., Vaz, F., Kosta, S., and Maciel, P. (2016). Supporting availability evaluation in mcc-based mhealth planning. *Electronics Letters*, 52(20):1663–1665.
- Balbo, G. (2000). Introduction to stochastic petri nets. In *School organized by the European Educational Forum*, pages 84–155. Springer.
- De Simone, L., Di Mauro, M., Natella, R., and Postiglione, F. (2024). Performance and availability challenges in designing resilient 5g architectures. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 21(5):5291–5303.
- Lima, L. N., Sabino, A., Barbosa, V., Feitosa, L., Brito, C., Araujo, J., and Silva, F. A. (2024). Dependability analysis and disaster recovery measures in smart hospital systems. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, pages 1–17.
- Maciel, P., Matos, R., Silva, B., Figueiredo, J., Oliveira, D., Fé, I., Maciel, R., and Dantas, J. (2017). Mercury: Performance and dependability evaluation of systems with exponential, expolynomial, and general distributions. In *2017 IEEE 22nd Pacific Rim international symposium on dependable computing (PRDC)*, pages 50–57. IEEE.
- Majumder, S., Aghayi, E., Noferesti, M., Memarzadeh-Tehran, H., Mondal, T., Pang, Z., and Deen, M. J. (2017). Smart homes for elderly healthcare—recent advances and research challenges. *Sensors*, 17(11):2496.

- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.
- Nguyen, T. A., Fe, I., Brito, C., Kaliappan, V. K., Choi, E., Min, D., Lee, J. W., and Silva, F. A. (2021a). Performability evaluation of load balancing and fail-over strategies for medical information systems with edge/fog computing using stochastic reward nets. *Sensors*, 21(18):6253.
- Nguyen, T. A., Min, D., Choi, E., and Lee, J.-W. (2021b). 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*, 8(21):15704–15748.
- Proniewska, K., Pregowska, A., and Malinowski, K. (2021). Identification of human vital functions directly relevant to the respiratory system based on the cardiac and acoustic parameters and random forest. *Irbm*, 42(3):174–179.
- Rocha, P., Pinheiro, T., Macedo, R., and Silva, F. A. (2019). 10gbe network card performance evaluation: A strategy based on sensitivity analysis. In *2019 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6. IEEE.
- Rodrigues, L., Gonçalves, I., Fé, I., Endo, P. T., and Silva, F. A. (2021). Performance and availability evaluation of an smart hospital architecture. *Computing*, 103:2401–2435.
- Santos, B., Soares, A., Nguyen, T.-A., Min, D.-K., Lee, J.-W., and Silva, F.-A. (2021). Iot sensor networks in smart buildings: A performance assessment using queuing models. *Sensors*, 21(16):5660.
- Santos, G. L., Gomes, D., Kelner, J., Sadok, D., Silva, F. A., Endo, P. T., and Lynn, T. (2020). The internet of things for healthcare: Optimising e-health system availability in the fog and cloud. *International Journal of Computational Science and Engineering*, 21(4):615–628.
- Silva, F. A., Brito, C., Araújo, G., Fé, I., Tyan, M., Lee, J.-W., Nguyen, T. A., and Maciel, P. R. M. (2022). Model-driven impact quantification of energy resource redundancy and server rejuvenation on the dependability of medical sensor networks in smart hospitals. *Sensors*, 22(4):1595.
- Sivaparthipan, C. and Karthick, M. (2023). Accessibility study of mhealth systems based on the internet of things (iot). *Tamjeed Journal of Healthcare Engineering and Science Technology*, 1(1):14–23.
- Tang, S. and Xie, Y. (2021). Availability modeling and performance improving of a healthcare internet of things (iot) system. *IoT*, 2(2):310–325.
- Tun, S. Y. Y., Madanian, S., and Mirza, F. (2021). Internet of things (iot) applications for elderly care: a reflective review. *Aging clinical and experimental research*, 33:855–867.
- Valentim, T., Callou, G., Vinicius, A., França, C., and Tavares, E. (2023). Availability assessment of internet of medical things architecture using private cloud. In *Anais do L Seminário Integrado de Software e Hardware*, pages 13–23. SBC.
- World Health Organization. Ageing. [Online; accessed 30-June-2024].