

Modeling and Analysis of a Telesurgery Environment Considering a 5G Network

Modelagem e Análise de um Ambiente de Telecirurgia Considerando uma Rede 5G

Vamberto Rocha Jr^{1*}, Jean Araujo², Bruno Nogueira³, Ermeson Andrade¹

Abstract: Over the past few years, surgeries performed by robots have increased considerably. For telesurgery (or remote surgery) to be performed satisfactorily, synchrony between the robot and the communication link is essential. However, no studies analytically evaluate these remote surgery environments when such surgeries are performed between two hospitals. The main objective of this work is to model a telesurgery environment, allowing metrics such as availability and reliability to be obtained. The results presented in this paper can help the maintenance team (or medical team) to better plan the infrastructure used in telesurgery and, consequently, avoid failures that could endanger the lives of patients. The results revealed that the shortest downtime occurs when performing surgery in the same hospital, with a system inoperable for 10,6 hours annually. For telesurgery between two hospitals connected by 5G, the reliability index was 98.8891%, with a 99,99% probability of message delivery in just 0,8 seconds.

Keywords: Telesurgery — Petri Net — Modeling — Availability — Reliability

Resumo: Nos últimos anos, as cirurgias realizadas por robôs aumentaram consideravelmente. Para que a telecirurgia (ou cirurgia remota) seja realizada satisfatoriamente, é essencial a sincronia entre o robô e a conexão de comunicação. No entanto, nenhum estudo avalia analiticamente esses ambientes de cirurgia remota quando tais procedimentos são realizados entre dois hospitais. O principal objetivo deste trabalho é modelar um ambiente de telecirurgia, permitindo a obtenção de métricas como disponibilidade e confiabilidade. Os resultados apresentados neste artigo podem ajudar a equipe de manutenção (ou equipe médica) a planejar melhor a infraestrutura utilizada na telecirurgia e, conseqüentemente, evitar falhas que possam colocar em risco a vida dos pacientes. Os resultados revelaram que o menor tempo de inoperância ocorre ao realizar a cirurgia no mesmo hospital, com o sistema inoperante por 10,6 horas anualmente. Para a telecirurgia entre dois hospitais conectados por 5G, o índice de probabilidade de falha foi de 98,889%, com uma probabilidade de entrega da mensagem de 100% em apenas 0,8 segundos.

Palavras-Chave: Telecirurgia — Redes de Petri — Modelagem — Disponibilidade — Confiabilidade

¹ Departamento de Computação, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

² Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns, Brasil

³ Instituto de Computação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil

*Corresponding author: vamberto@ufape.edu.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.22456/2175-2745.137324> • Received: 03/11/2023 • Accepted: 07/02/2024

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

1. Introdução

Nos dias atuais, a grande maioria das cirurgias realizadas por robôs ocorrem a uma distância de poucos metros entre o equipamento onde se encontra o paciente e o equipamento que é utilizado pelo cirurgião. Com o surgimento da tecnologia 5G, que apresenta características como ultra velocidade, latência reduzida, maior densidade de conexões e suporte a novas aplicações [1], torna-se possível que tais cirurgias possam ser realizadas a uma maior distância entre o robô e o paciente. No entanto, é importante destacar que o link de Internet que irá

interconectar o equipamento onde se encontra o paciente e o equipamento utilizado pelo cirurgião deve ser muito confiável. Quedas do link ou até mesmo atrasos, podem comprometer a cirurgia e, por consequência, colocar a vida do paciente em risco.

Outro ponto crítico em um ambiente de telecirurgia está relacionado à confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. É imprescindível analisar a disponibilidade, o tempo de inatividade e a confiabilidade dessas infraestruturas, pois isso pode auxiliar a equipe de manutenção a estimar a probabilidade de ocorrência de falhas e, assim, realizar manutenções

preventivas ou adotar estratégias de redundância para garantir que o equipamento não sofra interrupções no funcionamento [2]. Essa compreensão dos padrões da confiabilidade e disponibilidade permite um planejamento mais eficiente e uma alocação de recursos mais adequada, contribuindo para a eficácia geral das operações de telecirurgia.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas para avaliar a qualidade do link e da latência em telecirurgias. Em [3], os autores exploram as características e limitações de um ambiente de telecirurgia, juntamente com os requisitos de *quality of service* (QoS) do link. Já [4], realizam um estudo sobre os efeitos do atraso temporal em telecirurgias. Em [1], é feita uma análise da utilização do 4G e 5G no ambiente de telecirurgia e propõem uma arquitetura de telecirurgia robótica com *feedback* tátil. No entanto, nenhum dos trabalhos disponíveis na literatura propõem modelos analíticos para análise do tempo de inatividade e confiabilidade de ambientes de telecirurgia. O principal objetivo deste artigo é modelar um ambiente de telecirurgia, utilizando redes de Petri estocásticas para calcular a disponibilidade, o tempo de inatividade e a confiabilidade de um ambiente de telecirurgia. Além disso, calculamos a probabilidade de uma mensagem ser entregue do console cirurgião para o carrinho do paciente em um dado período de tempo. Os resultados apresentados neste trabalho podem ajudar a equipe de manutenção (ou equipe médica) a fazer um melhor planejamento da infraestrutura usada em uma telecirurgia, e consequentemente, evitar que falhas possam colocar em risco a vida de pacientes.

O restante do artigo está dividido da seguinte forma: a Seção 2 apresenta conceitos básicos sobre telecirurgia e redes de Petri. Na Seção 3, apresentamos os trabalhos relacionados. A Seção 4 aborda a metodologia e a infraestrutura adotada. A Seção 5 apresenta os modelos propostos para um ambiente de telecirurgia. Já a Seção 6, apresenta os resultados alcançados. Por fim, a Seção 7 aborda algumas conclusões, bem como os possíveis trabalhos futuros.

2. Fundamentação

2.1 Telecirurgia

A cirurgia robótica tem sido reconhecida como uma abordagem minimamente invasiva [5]. Nessa técnica, o robô não executa a cirurgia de forma autônoma, mas sim sob o controle do cirurgião, que comanda todos os movimentos. A primeira cirurgia robótica ocorreu na Alemanha em 1998 [6], utilizando o sistema robótico da Vinci, que era o principal dispositivo cirúrgico disponível na época. Essa primeira intervenção foi um *bypass* coronário [5]. Em 2000, o robô da Vinci recebeu aprovação do FDA (Food and Drug Administration) dos Estados Unidos, para ser utilizado em cirurgias laparoscópicas. No mesmo ano, em Paris, foi realizada a primeira prostatectomia radical com auxílio do robô, marcando o início de um crescimento exponencial no número de cirurgias robóticas em todo o mundo. Atualmente, uma das principais empresas atu-

antes na fabricação e comercialização de robôs cirúrgicos é a Intuitive Surgical. De acordo com a própria Intuitive Surgical [6], seu modelo mais recente é o da Vinci XI. Esse sistema é composto por três elementos centrais: o console cirúrgico, que permite ao cirurgião controlar o robô por meio de joysticks; o carrinho de visão, responsável pelo processamento das imagens tridimensionais; e o carrinho do paciente, equipado com uma mesa e quatro braços robóticos destinados à manipulação dos instrumentos cirúrgicos.

Dentre as principais vantagens da cirurgia robótica, podemos citar: (i) menor tempo de internação hospitalar para o paciente; (ii) menor perda de sangue em comparação com a cirurgia convencional; e (iii) maior precisão na realização das incisões [5]. Além disso, a cirurgia robótica possibilita que um especialista opere um paciente que esteja geograficamente distante. No entanto, é importante mencionar algumas desvantagens associadas ao uso dessa abordagem. Entre elas, destacam-se: (i) os altos custos envolvidos, uma vez que o sistema da Vinci mais recente tem um preço de aproximadamente 1,5 milhão de euros, com custos anuais adicionais de manutenção de 150 mil euros; e (ii) a necessidade de uma equipe especializada para operar o robô [5].

2.2 Redes de Petri

As redes de Petri são uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática que encontra aplicação em diversos tipos de sistemas, permitindo a representação de sistemas paralelos, concorrentes, assíncronos e não determinísticos [7]. Essa abordagem foi introduzida em 1962 por Carl Adams Petri [8], na Universidade Técnica de Darmstadt, Alemanha, inicialmente como um método para modelar e analisar sistemas de comunicação. A utilização das redes de Petri como uma ferramenta para estudo e modelagem de sistemas é de grande importância, pois possibilita a representação matemática e análise dos modelos, fornecendo informações valiosas sobre a estrutura e o comportamento dinâmico dos sistemas modelados [9].

De acordo com [9], a representação formal de um modelo de rede de Petri é dado pela 5-tupla $PN = \{P, T, F, W, \mu_o\}$, onde:

- P é o conjunto finito de lugares;
- T é o conjunto finito de transições, $P \cap T = \emptyset$;
- $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é o conjunto de arcos;
- $W : F \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ é a função de atribuição de peso aos arcos;
- $\mu_o : P \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de marcação inicial, onde $P \cap T = \emptyset$ e $PcupT \neq \emptyset$.

A Figura 1 apresenta os principais elementos de uma rede de Petri, sendo eles: lugares, representados por círculos que indicam os estados possíveis do sistema; *tokens*, representados

por círculos pequenos preenchidos ou números, localizados nos lugares e usados para especificar o estado da rede de Petri; transições, representadas por barras, que simbolizam as ações executadas pelo sistema; arcos, representados por setas, que indicam o fluxo de *tokens* pela rede; e arcos inibidores, que impedem a ativação da transição quando o lugar de entrada possui *tokens*. É importante destacar também as expressões de guarda, que são utilizadas para habilitar ou desabilitar o disparo de uma transição.

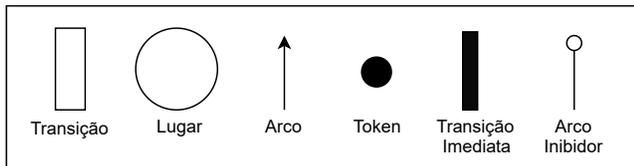


Figure 1. Elementos de uma Rede de Petri.

As redes de Petri estocásticas (SPNs) são uma extensão das redes de Petri tradicionais [10], que são amplamente utilizadas na modelagem de desempenho e probabilidade de falha de sistemas. Nas SPNs, o conceito de tempo e transições imediatas (com tempo de disparo igual a zero) foi incorporado ao formalismo das redes de Petri [11]. Os modelos SPN permitem calcular diversas métricas, como a probabilidade de falha e o tempo de inatividade [12]. Neste estudo, empregamos SPNs para a modelagem de um ambiente de telecirurgia e o cálculo de diversas métricas, devido à sua capacidade para desempenhar essas funções.

3. Trabalhos Relacionados

Nesta seção, examinamos pesquisas que contribuem para a evolução do campo da telecirurgia, concentrando-se em aspectos como desempenho de rede, latência e probabilidade de falha. Além disso, destacamos a contribuição deste artigo.

Em [3], são apresentadas as características de um sistema telecirúrgico robótico e os fatores limitantes desses sistemas, além dos requisitos de (QoS) de desempenho da rede em termos de latência, *jitter* (a variação do atraso na entrega de pacotes de rede) e perda de pacotes. O trabalho informa que a principal razão pela qual a telecirurgia não é amplamente utilizada é o alto custo de comunicação, a alta latência e a não garantia do link de Internet pública. Com relação aos desafios para que a telecirurgia seja mais utilizada, os autores destacam a necessidade de envio dos dados sensoriais (visual, auditiva e tátil) entre o console cirurgião e o carrinho paciente, a necessidade de um link com baixa latência e alta probabilidade de falha, e a segurança e privacidade dos dados trafegados. Por fim, eles defendem que a conexão 5G irá sanar boa parte dos problemas relacionados ao link.

Em [4], é apresentado um estudo sobre o efeito do tempo de atraso no desempenho de competências cirúrgicas utilizando uma cirurgia robô em modo de teleoperação. A conclusão do trabalho é que a latência relacionada à compressão/descompressão do áudio/vídeo (a/v) é significativamente maior que a latência relacionada à transmissão de co-

mandos de posição entre o console cirurgião e o carrinho do paciente. Além disso, os resultados dos experimentos indicaram degradação do desempenho da telecirurgia em razão do atraso de tempo crescente. Em [1], é realizado uma análise da utilização do 4G e 5G no ambiente de telecirurgia e projetam uma arquitetura de telecirurgia robótica com *feedback* tátil.

Como é possível observar, os trabalhos citados dão enfoque no desempenho da comunicação de rede dos equipamentos utilizados na telecirurgia. Neste artigo, nós fazemos uma análise da disponibilidade e confiabilidade de um ambiente de telecirurgia utilizando as redes de Petri, que é um formalismo bastante utilizado para modelagem e análise dos mais diversos sistemas complexos. Com essa análise, nós podemos obter, por exemplo, o tempo de inatividade do ambiente de telecirurgia. Além disso, é possível analisar a probabilidade de entrega de mensagens quando hospitais distintos são considerados na cirurgia remota.

4. Metodologia e Infraestrutura Adotada

A avaliação de um ambiente de telecirurgia é uma tarefa complexa que requer uma abordagem metodológica bem definida, que oferece detalhes que podem ser replicados por outros pesquisadores interessados no mesmo domínio, promovendo assim a transparência e a consistência metodológica no âmbito científico. Neste trabalho, adotamos uma metodologia composta por cinco etapas principais: entendimento do sistema, definição de métricas, construção dos modelos, e avaliação de resultados. Essa sequência de etapas proporciona uma estrutura lógica para a análise dessas infraestruturas e permite identificar possíveis ajustes e melhorias ao longo do processo. A Figura 2 apresenta as etapas realizadas na avaliação do ambiente de telecirurgia. Por simplicidade, a figura retrocede para etapa inicial em caso da avaliação dos resultados não ser satisfatória, mas o retrocesso poderia ser para uma outra etapa.

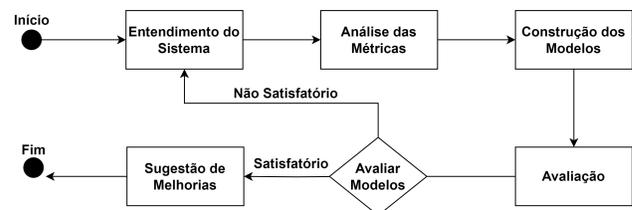


Figure 2. Metodologia utilizada.

A primeira etapa da metodologia consiste no entendimento do sistema de telecirurgia. Nessa fase, é realizada uma análise detalhada dos componentes do sistema, incluindo os robôs cirúrgicos, os dispositivos de comunicação, etc. Compreender a interação entre esses elementos é fundamental para uma avaliação precisa e confiável. Em seguida, na etapa de definição de métricas, são estabelecidos os indicadores que serão coletados no ambiente de telecirurgia. Neste trabalho, as métricas coletadas são disponibilidade, probabilidade de

entrega de mensagem e confiabilidade.

A terceira etapa envolve a construção dos modelos. Nessa fase, são desenvolvidos modelos de redes de Petri estocásticas para representar o sistema de telecirurgia. Esses modelos permitem a simulação do comportamento dinâmico do ambiente e a análise das métricas definidas na etapa anterior. É importante ressaltar que os modelos podem ser refinados e ajustados ao longo do processo, conforme novos dados são coletados. Após a construção dos modelos, é realizada a etapa de avaliação. Nessa fase, os modelos de SPNs são simulados e as métricas são analisadas. Caso os resultados não sejam satisfatórios, é necessário retroceder para uma ou mais etapas anteriores a fim de realizar ajustes e refinamentos nos modelos ou nas métricas utilizadas.

4.1 Infraestrutura de Telecirurgia Adotada

A interligação entre o console cirúrgico e o carrinho de paciente é realizada por meio da tecnologia 5G, proporcionando uma comunicação ágil e de alta eficiência. Essa conexão de última geração assegura uma transmissão de dados precisa e em tempo real, viabilizando a coordenação precisa das ações cirúrgicas e o monitoramento contínuo do estado do paciente durante todo o procedimento.

As redes 5G podem ser classificadas em públicas e privadas. As redes públicas são operadas por provedores de serviços de telecomunicações, estando, portanto, disponíveis para o público em geral e para empresas. Já as redes privadas são dedicadas ao uso exclusivo de uma determinada entidade [13]. Cada tipo apresenta vantagens e desvantagens quando comparado ao outro. Enquanto as redes 5G privadas, que são mais caras, são otimizadas para atender a exigências específicas de desempenho, segurança e confiabilidade, as redes 5G públicas são mais acessíveis e oferecem seu acesso a um amplo número de usuários e serviços [14]. Por uma questão de compatibilidade, tanto as redes públicas como as privadas são implementadas seguindo padrões definidos por entidades como o 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Mesmo seguindo os padrões do 3GPP, pode existir uma incompatibilidade entre as redes devido a características adicionais e utilização de diferentes modelos de equipamentos [14]. Especificamente, neste trabalho consideramos a adoção de uma rede 5G privada.

A Figura 3 ilustra a arquitetura proposta para um ambiente de telecirurgia, abrangendo múltiplos hospitais. Nesta arquitetura, estão inclusos o Hospital A, que compreende o Console Cirurgião, a Estação Base 5G e o Núcleo da Rede 5G (também conhecido como 5G Core Network), bem como a infraestrutura de nuvem computacional. Além disso, integra-se o Hospital B, contendo a 5G Core Network, a Estação Base 5G, o carrinho de visão e o carrinho do paciente. Conforme mencionado em [15], o Núcleo da Rede 5G desempenha uma função vital na administração e encaminhamento de dados, voz e outras informações entre os dispositivos interligados na infraestrutura 5G. Esta núcleo é composto por diversos componentes virtuais e se destaca por sua alta flexibilidade,

permitindo a configuração e criação dinâmica de serviços adaptados às demandas tanto da rede quanto dos usuários.

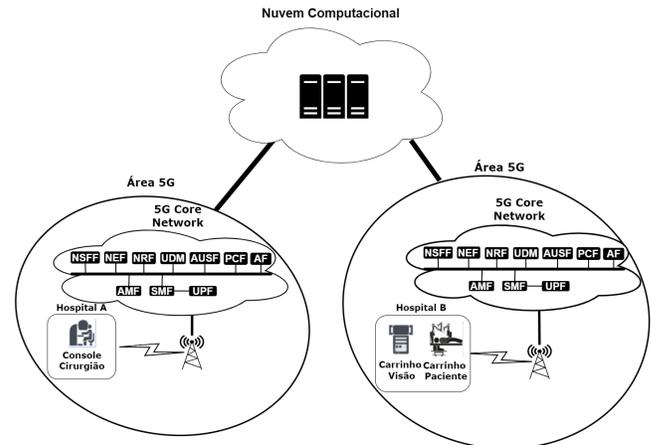


Figure 3. Arquitetura de telecirurgia adotada.

Vale destacar que para este trabalho foi considerado um cenário em que uma telecirurgia é realizada em diferentes hospitais, ou seja, o médico está operando utilizando o console cirurgião em um Hospital “A”, enquanto o paciente se encontra no carrinho paciente e com o carrinho visão no Hospital “B”.

5. Modelos Propostos

Nesta seção, são apresentados os modelos SPN para calcular as métricas adotadas. Nesta seção, serão apresentados os modelos SPN utilizados como base para o cálculo das métricas adotadas neste estudo. Serão discutidos os princípios fundamentais que regem a operação desses modelos, bem como as considerações específicas levadas em conta na sua implementação para a avaliação das métricas em questão.

A Figura 4 apresenta o modelo SPN proposto para representar o ambiente de telecirurgia descrito na Figura 3. Ele é dividido em 3 partes: *Nuvem Computacional*, *Hospital A* e *Hospital B*. Como pode ser observado na (Figura 4A), a nuvem está funcionando quando um *token* estiver no local *CL_on*. As transições *F_CL* e *R_CL* representam, respectivamente, o tempo médio de falha (MTTF), ou seja, o tempo que o componente nuvem possui até uma falha ocorrer e o tempo médio de reparo (MTTR), ou seja, o tempo que o componente nuvem possui até que ele seja reparado.

No *Hospital A*, temos os modelos que representam o console cirurgião (Figura 4B), o núcleo da rede 5G (Figura 4C) e o link 5G (Figura 4D). O console cirurgião está ativo quando um *token* estiver no lugar *CC_on*. A transição *F_CC* representa o MTTF do componente e o disparo dela muda o estado do componente de ativo para inativo. A transição *R_CC*, por outro lado, representa o MTTR e o disparo dela muda o estado do componente de inativo para ativo. Além disso, os componentes restantes do *Hospital A*, ou seja, o núcleo da rede 5G e o link 5G, possuem um comportamento análogo ao

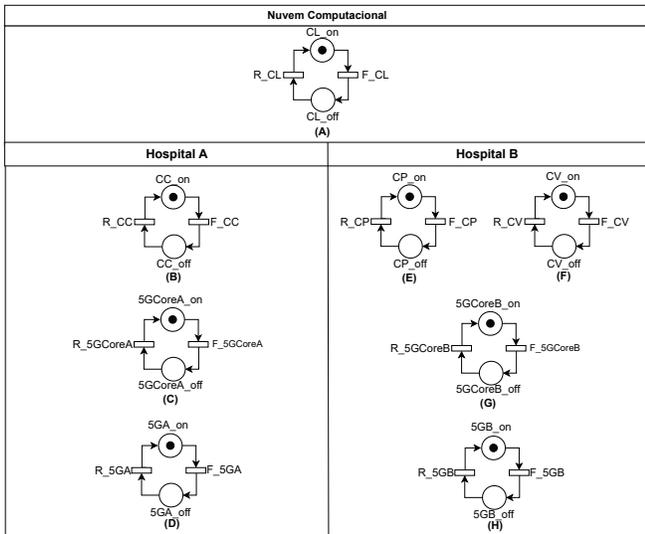


Figure 4. Modelagem de Rede de Petri de um ambiente de Telecirurgia

do console cirurgião. Já no *Hospital B*, temos os modelos que representam o carrinho do paciente (Figura 4E), o carrinho de visão (Figura 4F), o link 5G (Figura 4H) e o núcleo da rede 5G (Figura 4G). O comportamento desses modelos é semelhante ao apresentado anteriormente para o *Hospital A*.

A eficiente comunicação em telecirurgia é um fator crítico para o sucesso e a segurança dos procedimentos realizados. O tempo de entrega das mensagens desempenha um papel fundamental nesse contexto, sendo imprescindível a pronta informação aos cirurgiões sobre quaisquer atrasos. A análise contínua dessa métrica possibilita a identificação de áreas de melhoria e a implementação de medidas corretivas para garantir uma comunicação eficaz e confiável durante os procedimentos de telecirurgia. Os cirurgiões devem ser imediatamente informados sobre qualquer atraso no tempo de comunicação entre o console cirurgião e o carrinho paciente. A Figura 5 apresenta o modelo SPN proposto para representar o envio da mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente.

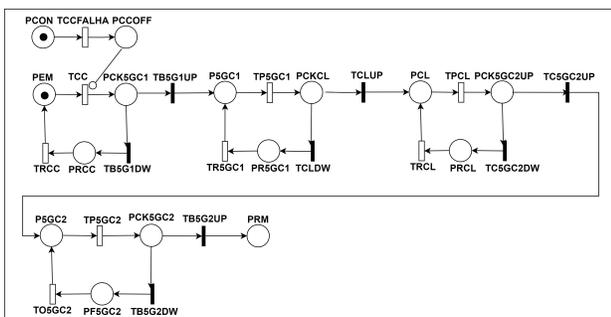


Figure 5. Modelagem de Rede de Petri para o envio de uma mensagem de um ambiente de Telecirurgia

A seguir, apresentamos uma visão mais abrangente sobre o processo de envio da mensagem.

No Hospital A, o console cirurgião gera a mensagem destinada ao carrinho paciente no Hospital B. O Console Cirurgião estabelece uma conexão com o dispositivo 5G, seja um modem 5G interno ou um adaptador 5G externo. Essa conexão estabelece a interface entre o Console Cirurgião e a rede 5G. Em seguida, o dispositivo 5G estabelece conexão com a Estação Base 5G, responsável por receber os sinais de rádio provenientes do console cirurgião e encaminhá-los para a rede 5G. A estação base direciona a mensagem para a *5G Core Network*, que representa o núcleo da infraestrutura da rede 5G. Esse núcleo assume o gerenciamento e controle do tráfego de dados. A *Core Network* analisa o cabeçalho da mensagem para identificar o destino, isto é, a nuvem computacional para processamento. A mensagem é, então, encaminhada para a nuvem, onde passa por etapas de armazenamento, verificação e processamento de dados. Concluídas essas etapas, a mensagem é direcionada ao destino apropriado, ou seja, o carrinho do paciente no Hospital B. Após o processamento na nuvem, a mensagem é enviada para outra *Core Network*, que denominamos como *Core Network* de destino. Posteriormente, a mensagem é direcionada ao carrinho do paciente através de uma estação base. O carrinho do paciente recebe a mensagem do dispositivo 5G e a processa conforme necessário.

6. Estudos de Caso

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir das análises do ambiente de telecirurgia e do envio de uma mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente. No entanto, primeiramente, iremos apresentar os parâmetros de entrada utilizados no cálculo das métricas. As Tabelas 1 e 2 contêm as expressões usadas para avaliar as métricas selecionadas. Os resultados foram obtidos por meio de análises utilizando a ferramenta de modelagem Mercury, versão 5.0.2 [16]. Além disso, é importante notar que a confiabilidade é calculada através da probabilidade de falha de um componente, avaliada em um ponto específico no tempo. Para isso, os modelos SPN na Figura 4 foram ajustados para não incluir processos de reparo.

Table 1. Métricas e funções utilizadas para calcular a disponibilidade e o tempo de inatividade em hospitais diferentes e em um mesmo hospital.

Métrica	Local	Função
Disp	Mesmo Hospital	$P\{((\#5G_{on}=1) \wedge (\#CL_{on}=1) \wedge (\#CC_{on}=1) \wedge (\#CP_{on}=1) \wedge (\#CV_{on}=1) \wedge (\#5GCore_{on}=1))\}$
	Hospitais Diferentes	$P\{((\#5GA_{on}=1) \wedge (\#5GB_{on}=1) \wedge (\#CL_{on}=1) \wedge (\#CC_{on}=1) \wedge (\#CP_{on}=1) \wedge (\#CV_{on}=1) \wedge (\#5GCoreA_{on}=1) \wedge (\#5GCoreB_{on}=1))\}$
Inatividade	Mesmo Hospital	$(1 - P\{((\#5G_{on}=1) \wedge (\#CL_{on}=1) \wedge (\#CC_{on}=1) \wedge (\#CP_{on}=1) \wedge (\#CV_{on}=1) \wedge (\#5GCore_{on}=1))\}) * 8766$
	Hospitais Diferentes	$(1 - P\{((\#5GA_{on}=1) \wedge (\#5GB_{on}=1) \wedge (\#CL_{on}=1) \wedge (\#CC_{on}=1) \wedge (\#CP_{on}=1) \wedge (\#CV_{on}=1) \wedge (\#5GCoreA_{on}=1) \wedge (\#5GCoreB_{on}=1))\}) * 8766$

Table 2. Métricas e funções utilizadas para calcular a probabilidade de falha.

Métrica	Função
Conf 5G	$P\{((\#CC_off=1)OR(\#CP_off=1)OR(\#CV_off=1)OR(\#CL_off=1)OR(\#5GA_off=1)OR(\#5GB_off=1)OR(\#5GCoreA_off=1)OR(\#5GCoreB_off=1))\}$

6.1 Parâmetros de entrada

A avaliação da disponibilidade, tempo de inatividade e confiabilidade do ambiente de telecirurgia é um processo complexo que requer a consideração cuidadosa de vários parâmetros de entrada. Um desses parâmetros cruciais são os tempos de falha e reparo dos componentes envolvidos no sistema Na Tabela 3 são apresentados as descrições, as transições e os valores adotados. Estamos utilizando "s" para representar o tempo em segundos, "h" em horas e "prob" para probabilidade.

Os valores da nuvem computacional e da Core Network 5G foram baseados em [2], enquanto os valores da estação base 5G foram derivados de uma estação base 4G devido à indisponibilidade das informações correspondentes, conforme descrito em [17]. Os valores de falha (*F_{CC}*, *F_{CP}*, *F_{CV}*) e reparo (*R_{CC}*, *R_{CP}*, *R_{CV}*) para Carrinho Paciente, Carrinho Visão e Console Cirurgião foram definidos com base em equipamentos disponíveis no mercado como [17]. O valor da transição TCCFALHA é o mesmo apresentado anteriormente para a falha do console do cirurgião, enquanto as transições *TCC*, *TRCC*, *TR5GC1*, *TRCL*, *TO5GC2* foram obtidos em [18] e [19]. Os valores das transições *TCLUP*, *TB5G1UP*, *TC5GC2UP* e *TB5G2UP* representam respectivamente a probabilidade da nuvem, 5GCoreNetwork1 e 5GCoreNetwork2 estarem ativos e foram obtidos a partir da multiplicação do (componente x disponibilidade do 5G). Os valores das transições *TC5GC2DW*, *TCLDW*, *TB5G1DW* e *TB5G2DW* representam a probabilidade dos componentes estarem inativos e foram obtidos através da subtração de (1-probabilidade do componente estar ativo).

Nas transições *TP5GC1*, *TPCL* e *TP5GC2*, empregamos os dados referentes ao processamento em redes 4G, levando em consideração de que o 5G é potencialmente até 10 vezes mais rápido que o 4G [20].

6.2 Análise dos Resultados

A Tabela 4 exhibe os resultados da disponibilidade e do tempo de inatividade (calculado como 1 - disponibilidade) em horas durante o período de um ano em um ambiente de telecirurgia. Os cenários contemplam cirurgias conduzidas tanto no mesmo hospital quanto em hospitais distintos. É possível observar que o melhor resultado é obtido quando a cirurgia é realizada no mesmo hospital. A análise desses resultados no contexto da telecirurgia traz informações cruciais para aprimorar sua eficiência e probabilidade de falha. Os resultados demonstram que, durante um ano, cirurgias realizadas no mesmo hospital têm um tempo de inatividade de 10,6 horas, enquanto cirurgias em hospitais diferentes têm um tempo de inativi-

Table 3. Componentes, transições e valores utilizados nos experimentos desse trabalho.

Componente	Transição	Valor
MTTR Estação Base 5G	R_5GA / R_5GB	12 h
MTTF Estação Base 5G	F_5GA / F_5GB	83220 h
MTTF 5G Core Network	F_5GCoreA / F_5GCoreB	8766 h
MTTR 5G Core Network	R_5GCoreA / R_5GCoreB	1 h
MTTR da Nuvem Comp.	R_CL	1 h
MTTF da Nuvem Comp.	F_CL	8766 h
MTTR do Car. Paciente	R_CP	6 h
MTTF do Car. Paciente	F_CP	17520 h
MTTR do Carrinho Visão	R_CV	6 h
MTTF do Carrinho Visão	F_CV	17520 h
MTTR do Cons. Cirurgião	R_CC	6 h
MTTF do Cons. Cirurgião	F_CC	17520 h
Console Cirurgião	TCCfalha	3,1558e+7 s
Envio Mensagem	TCC	0,0297 s
Timeout	TRCC, TR5GC1, TRCL, TO5GC1	0,00833 s
Tempo de Proc. Cloud e Core 5G Net	TP5GC1, TPCL, TP5GC2	0,03024 s
Disp. Nuvem	TCLUP	0,99988 prob
Disp. Core 5G Net e Nuvem	TB5G1UP, TCLUP, TC5GC2UP	0,99983 prob
Disp. Core 5G Net e Car. Paciente	TB5G2UP	0,99951 prob
Down. Core 5G Net e Nuvem	TC5GC2DW, TCLDW, TB5G1DW	0,00017 prob
Down. Core 5G Net e Car. Paciente	TB5G2DW	0,00049 prob

dade de 12 horas. Essas conclusões ressaltam a importância de considerar as variáveis relacionadas à localização hospitalar ao projetar e gerenciar ambientes de telecirurgia, com o objetivo de otimizar o tempo de inatividade e maximizar a disponibilidade.

Table 4. Disponibilidade e tempo de inatividade de um ambiente de telecirurgia realizada em um mesmo hospital e em hospitais diferentes.

Local	Disponibilidade(%)	Inatividade(h/a)
Mesmo Hospital	99,8790%	10,60 h/a
Hospitais Diferentes	99,8627%	12,03 h/a

A Figura 6 retrata a confiabilidade ou a probabilidade de falha de um ambiente de telecirurgia ao realizar uma cirurgia em hospitais diferentes. Em outras palavras, ela apresenta a probabilidade de falha no sistema de telecirurgia. Observa-se que a probabilidade de falha tende a se aproximar de 100% ao longo de um período de 1 ano. No entanto, essa probabilidade é reduzida quando consideramos intervalos de tempo mais curtos. Por exemplo, ao longo de 6 meses, a probabilidade de falha é de cerca de 90%. Em um período ainda mais curto, como três meses, a probabilidade de falha diminui para aproximadamente 70%.

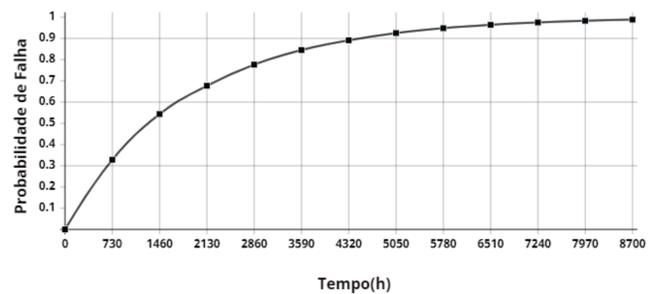


Figure 6. probabilidade de falha de um ambiente de Telecirurgia.

A Figura 7 ilustra o gráfico do processo de envio de uma mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente. Para calcular a probabilidade de entrega bem-sucedida da

mensagem, conduzimos uma avaliação transiente da métrica $P\{\#PRM = 1\}$ em um momento específico. Observamos que, ao considerarmos uma cirurgia realizada em hospitais distintos, a probabilidade de entrega da mensagem é de 99,9994% em um intervalo de 0,5 segundos, alcançando 100% em 0,8 segundos. Garantir a entrega eficiente de mensagens em telecirurgia é crucial. O sucesso das operações remotas depende da comunicação precisa e em tempo real entre o cirurgião e os dispositivos no local da cirurgia. Mensagens não entregues ou atrasadas podem causar problemas graves, interrompendo ou comprometendo a cirurgia.

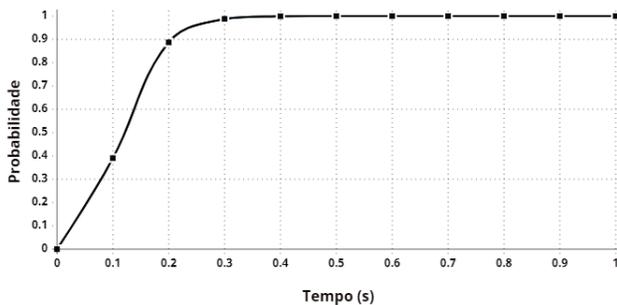


Figure 7. Tempo de envio de uma mensagem de um ambiente de Telecirurgia

7. Considerações Finais

Neste trabalho, apresentamos uma abordagem fundamentada em modelos estocásticos para a modelagem e análise do ambiente de telecirurgia, utilizando as SPNs. Realizamos análises para avaliar o tempo de inatividade em cirurgias realizadas tanto dentro do mesmo hospital quanto em hospitais diferentes. Além disso, examinamos a probabilidade de falha do ambiente de telecirurgia em contextos hospitalares distintos e investigamos a probabilidade de entrega bem-sucedida de mensagens. Os resultados obtidos nesta pesquisa proporcionam informações valiosas que podem ser estrategicamente utilizadas pela equipe de manutenção, ou equivalente na área médica, para aprimorar o planejamento dos períodos de manutenção e otimizar a infraestrutura empregada na telecirurgia. Essa informação é crucial para a prevenção de falhas potenciais que poderiam representar riscos significativos para a vida dos pacientes.

No que diz respeito ao tempo de inatividade, os resultados mais favoráveis ocorrem quando a cirurgia é conduzida no mesmo hospital. Isto é, constatamos que o sistema fica inoperante por cerca de 10,6 horas ao longo de um ano em casos de cirurgias no mesmo hospital, enquanto para cirurgias realizadas em hospitais diferentes, o tempo de inoperância é de aproximadamente 12 horas no mesmo período. No que tange a confiabilidade, obtivemos uma probabilidade de falha próxima a 100% no período de um ano. Em relação à entrega de mensagens em cirurgias realizadas em hospitais distintos, constatamos uma notável probabilidade de 100% de entrega

da mensagem em um tempo mínimo de 0,8 segundos. Vale destacar que através dos modelos SPNs, pudemos explorar cenários e calcular métricas que fornecem insights valiosos para a tomada de decisões e aprimoramento da eficiência e probabilidade de falha das operações cirúrgicas remotas.

Como direção em futuras pesquisas, pretendemos explorar mais profundamente as implicações da latência de rede na telecirurgia, considerando diferentes níveis de atraso e seus efeitos nas operações remotas. Dado que um ambiente de telecirurgia é de extrema importância, pois lida diretamente com vidas humanas, uma proposta para realização de estudos futuros seria examinar o potencial impacto da introdução de novos elementos de controle. Essa investigação poderia incluir a implementação de um sistema de robô de contingência ou a integração de links de comunicação provenientes de diferentes operadoras. O objetivo seria avaliar como tais adições poderiam influenciar a disponibilidade e a confiabilidade globais do ambiente de telecirurgia.

References

- [1] MESHARAM, D. A.; PATIL, D. D. 5g enabled tactile internet for tele-robotic surgery. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 171, p. 2618–2625, 2020.
- [2] 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.
- [3] ZHANG, Q.; LIU, J.; ZHAO, G. Towards 5g enabled tactile robotic telesurgery. *arXiv preprint arXiv:1803.03586*, 2018.
- [4] LUM, M. J. et al. Teleoperation in surgical robotics—network latency effects on surgical performance. In: *IEEE. 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. [S.l.], 2009. p. 6860–6863.
- [5] MATOS, H. A. A. d. *Cirurgia robótica em ORL: uma abordagem ao sistema Da Vinci*. Tese (Doutorado) — Escola de Medicina de Lisboa, 2017.
- [6] INTUITIVE. *Da Vinci Surgical Systems*. <<https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/systems>>. Acessado: 05-04-2022.
- [7] MACIEL, P. R.; LINS, R. D.; CUNHA, P. R. *Introdução às redes de Petri e aplicações*. [S.l.]: UNICAMP-Instituto de Computacao, 1996.
- [8] PETRI, C. A. *Kommunikation mit automaten*. Tese (Doutorado) — Technische Universität Darmstadt, 1962.
- [9] MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989.
- [10] MARRANGHELLO, N. *Redes de petri: Conceitos e aplicações*. São Paulo: DCCE/IBLCE/UNESP, 2005.

- [11] CUNHA, A. et al. Modelagem hierárquica e heterogênea para avaliação de disponibilidade de aplicações big data na nuvem privada. In: SBC. *Anais do XX Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*. [S.l.], 2021. p. 49–60.
- [12] TRIVEDI, K. S. et al. *Reliability analysis techniques explored through a communication network example*. [S.l.], 1996.
- [13] WEN, M. et al. Private 5g networks: Concepts, architectures, and research landscape. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, IEEE, v. 16, n. 1, p. 7–25, 2021.
- [14] BOAVA, A.; MAILER, C.; KRAUS, D. Arquitetura de serviços e computação de borda nas redes 5g para o desenvolvimento de redes virtuais privadas sobre o core 5g. *Sociedade Brasileira de Computação*, 2021.
- [15] OLIVEIRA, L. A.; ALENCAR, M. S.; LOPES, W. T. A. Evolução da arquitetura de redes móveis rumo ao 5g. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 8, n. 2, p. 43–50, 2018.
- [16] MACIEL, P. et al. The mercury environment: A modeling tool for performance and dependability evaluation. In: *10th International Workshop on the Reliability of Intelligent Environments (WoRIE 2021)*. Dubai, United Arab Emirates: [s.n.], 2021.
- [17] INTUITIVE. *Intuitive Surgical Manuals*. <<https://manuals.intuitivesurgical.com>>. Acessado: 05-04-2022.
- [18] ANDRADE, E. et al. Performance and availability trade-offs in fog–cloud iot environments. *Journal of Network and Systems Management*, Springer, v. 29, n. 1, p. 1–27, 2021.
- [19] ARAUJO, J. et al. Dependability evaluation of a mhealth system using a mobile cloud infrastructure. In: IEEE. *2014 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (SMC)*. [S.l.], 2014. p. 1348–1353.
- [20] SERIES, M. Imt vision–framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond. *Recommendation ITU*, Electronic Publication Geneva, Switzerland, v. 2083, n. 0, 2015.