

Modeling and Analysis of a Telesurgery Environment Using Stochastic Petri Nets

Vamberto Rocha Jr, Jean Araujo, Bruno Nogueira, and Ermeson Andrade

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 links is essential. However, no studies analytically evaluate these remote surgery environments or calculate the probability of delivering messages 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, as well as the probability of a message being delivered in a given period. The results showed that the best scenario is to use redundant links for robot communication, such as 4G and WiFi, and that redundant links guarantee a greater probability of message delivery during telesurgery. Additionally, the results 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.

Index Terms—Availability, Modeling, Reliability, Telesurgery

I. INTRODUÇÃO

A telecirurgia moderna permite realizar cirurgias por robôs a uma distância relativamente curta entre o paciente e o cirurgião. No entanto, avanços nas tecnologias de comunicação têm potencial para estender essa distância, permitindo cirurgias realizadas a uma maior distância entre o robô e o paciente [1]. Para isso, é essencial garantir um link de internet altamente confiável e com baixa latência, uma vez que quedas de conexão ou atrasos podem comprometer a segurança do paciente durante o procedimento.

Além da conectividade, a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos utilizados na telecirurgia são pontos críticos a serem considerados. Falhas de comunicação entre os componentes do robô cirúrgico podem resultar em indisponibilidade do equipamento ou até mesmo em movimentos incorretos dos braços do carrinho do paciente, colocando a vida do paciente em risco. Portanto, é fundamental analisar a disponibilidade dessas infraestruturas, permitindo que a equipe de manutenção realize manutenções preventivas ou implemente estratégias de redundância para evitar interrupções no funcionamento.

Diversas pesquisas têm sido conduzidas para avaliar a qualidade do link e a latência na telecirurgia. Em [2], são apresentadas as características do ambiente de telecirurgia,

Vamberto Rocha Jr Departamento de Computação, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns, Brasil. (e-mail: vamberto.rocha@ufape.edu.br).

Jean Araujo Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns, Brasil. (e-mail: jean.teixeira@ufape.edu.br).

Bruno Nogueira Instituto de Computação, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil. (e-mail: bruno@ic.ufal.br).

Ermeson Andrade Departamento de Computação, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil. (e-mail: ermeson.andrade@ufrpe.br).

seus fatores limitantes e os requisitos de qualidade de serviço (QoS) do link. Já o estudo em [3] investiga o efeito do atraso temporal em telecirurgias. O artigo [4] discute a importância de um link confiável e propõe um método para prever o conteúdo de mensagens perdidas, visando melhorar o desempenho da comunicação. Em [5], os autores analisam a utilização das tecnologias 4G e 5G na telecirurgia, propondo uma arquitetura de telecirurgia robótica com feedback háptico. Entretanto, até o momento, não foram encontrados modelos analíticos na literatura para análise de disponibilidade e confiabilidade de ambientes de telecirurgia.

Este artigo tem como objetivo principal modelar um ambiente de telecirurgia utilizando Redes de Petri Estocásticas para calcular a disponibilidade, o tempo de inatividade e a confiabilidade. Os cenários avaliados consideraram tanto links de comunicação WiFi quanto 4G, além de contemplar cirurgias realizadas no mesmo hospital ou em hospitais distintos. Adicionalmente, é calculada a probabilidade de entrega de mensagens do console cirúrgico ao carrinho do paciente em determinado período de tempo. Os resultados apresentados neste trabalho podem auxiliar a equipe de manutenção ou a equipe médica no planejamento adequado da infraestrutura para telecirurgias, evitando falhas que possam colocar em risco a vida dos pacientes.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta conceitos básicos sobre telecirurgia e redes de Petri. A Seção III discute os trabalhos relacionados. A Seção IV apresenta a metodologia e a infraestrutura adotada. A Seção V detalha os modelos propostos para um ambiente de telecirurgia. A Seção VI traz os resultados obtidos. Por fim, a Seção VII apresenta as conclusões e possíveis direções para trabalhos futuros.

II. FUNDAMENTAÇÃO

A seguir são apresentados conceitos básicos para um melhor entendimento deste trabalho.

A. Telecirurgia

De acordo com [1], a cirurgia robótica é considerada minimamente invasiva. Nela o robô não funciona de forma autônoma, ou seja, ele não realiza a cirurgia sozinho, pois todos os movimentos são controlados pelo cirurgião. A primeira cirurgia robótica foi realizada na Alemanha em 1998 utilizando o robô da Vinci, que naquela época era o principal robô cirúrgico do mercado, e foi realizado um *bypass* coronário [1]. De acordo com [6], em 2000, o robô da Vinci foi aprovado pelo FDA (*Food and Drug Administration*), uma agência

federal americana que possui, entre outras responsabilidades, a autorização para o uso de novos equipamentos médicos, incluindo sua utilização em cirurgia laparoscópica. Nesse mesmo ano, em Paris, foi realizada a primeira prostatectomia radical por meio do robô, e desde então, o número de cirurgias realizadas por robôs tem aumentado exponencialmente em todo o mundo.

Atualmente, a empresa *Intuitive Surgical* fabrica e comercializa robôs cirúrgicos. De acordo com [7], o modelo mais recente do robô cirurgião é o da Vinci XI. Ele é formado pelo *console cirurgião*, na qual o cirurgião controla o robô cirúrgico com ajuda de *joysticks*; o *carrinho de visão*, que é o local de processamento das imagens tridimensionais; e o *carrinho de paciente*, que é composto por uma mesa com quatro braços robóticos que comportam os instrumentos cirúrgicos.

Entre as principais vantagens da cirurgia robótica é possível citar [1]: (i) proporciona ao paciente um menor tempo de permanência no hospital; (ii) proporciona uma perda menor de sangue se comparada à cirurgia convencional; e (iii) proporciona uma maior precisão na incisão. Destaca-se também a possibilidade de um especialista operar um paciente que se encontra em um local geograficamente distante. Porém, o uso desse tipo de cirurgia também possui desvantagens. Entre as principais desvantagens é possível citar: (i) os custos altos, pois o modelo mais recente do sistema da Vinci custa cerca de 1,5 milhão de euros com uma adição anual de 150 mil euros em manutenção e (ii) a necessidade de uma equipe especializada para operar o robô.

B. Redes de Petri

Segundo [8], podemos definir redes de Petri como uma ferramenta gráfica e matemática que ajuda a representar e entender o funcionamento de diferentes tipos de sistemas. Ela permite a modelagem de sistemas que ocorrem simultaneamente, de forma independente, sem uma sequência definida e com resultados não previsíveis. A Fig. 1 apresenta os principais elementos de uma rede de Petri. De acordo com [9], estes elementos são formados por: *lugares*, que são representados por círculos e que representam os estados possíveis de um sistema; *tokens*, que são representados por círculos pequenos preenchidos ou números que residem em lugares e são utilizados para especificar o estado da rede de Petri; *transições*, que são representadas por barras e representam as ações realizadas pelo sistema; *arcos*, que são representados por setas e simbolizam o fluxo de *tokens* pela rede; e *arco inibidor*, que inibe o disparo da transição quando o lugar de entrada possui *tokens*. Devemos destacar ainda as expressões de guarda, as quais são utilizadas para habilitar ou não o disparo de uma transição.

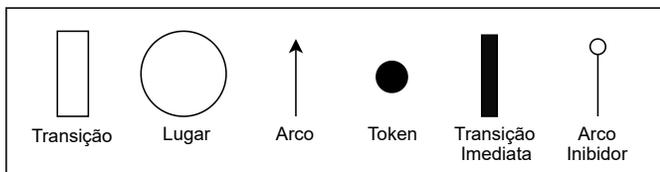


Fig. 1. Elementos de uma Rede de Petri.

As redes de Petri estocásticas (SPNs) são uma extensão das redes de Petri tradicionais, as quais são comumente utilizadas para a modelagem de desempenho e dependabilidade de sistemas [10]. Nas SPNs, foi adicionado tanto o conceito de tempo, quanto as transições imediatas (que disparam com tempo zero) ao formalismo das redes de Petri [11]. De acordo com [12], os modelos em SPN permitem calcular as mais diversas métricas. Nesse trabalho, especificamente, utilizamos as redes de Petri estocásticas para realizar a modelagem de um ambiente de telecirurgia e calcular as mais diversas métricas como, por exemplo, disponibilidade, confiabilidade e probabilidade de entrega de mensagens.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, apresentamos trabalhos que analisam o desempenho e a confiabilidade dos ambientes de telecirurgia.

Em [2], foi abordado um estudo sobre um sistema telecirúrgico robótico, destacando os fatores limitantes desses sistemas e os requisitos de qualidade de serviço (QoS) em termos de latência, jitter e perda de pacotes. O estudo apontou o alto custo de comunicação, a alta latência e a falta de garantia do link de Internet pública como razões pelas quais a telecirurgia não é amplamente adotada. Os autores ressaltaram a necessidade de transmitir dados sensoriais entre o console cirurgião e o carrinho do paciente, a importância de uma conexão com baixa latência e alta confiabilidade, além das preocupações com segurança e privacidade dos dados. Eles também mencionaram que a adoção da tecnologia 5G pode ajudar a resolver esses problemas.

Em [3], foi realizado um estudo sobre o efeito do atraso no desempenho das habilidades cirúrgicas durante a telecirurgia robótica em modo de telecirurgia. A metodologia deste estudo está dividida em duas Seções: Experimentos de campo e experimentos de laboratório realizados com Raven (sistema robótico cirúrgico portátil de arquitetura aberta). Os resultados indicaram que a latência relacionada à compressão/descompressão do áudio/vídeo é significativamente maior do que a latência relacionada à transmissão dos comandos de posição entre o console cirurgião e o carrinho do paciente. O estudo também observou uma degradação do desempenho da telecirurgia à medida que o atraso aumenta.

Em [4], discute-se a importância crítica de ter uma conexão confiável e de baixa latência em um ambiente de telecirurgia. O trabalho propõe um método para prever o conteúdo de mensagens atrasadas ou perdidas utilizando o GPR (Gaussian Process Regression). Os resultados demonstraram que a estrutura proposta supera as abordagens anteriores em termos de desempenho de generalização de dados hápticos. Em [5], os autores projetaram e analisaram uma arquitetura de telecirurgia robótica com feedback háptico, comparando os indicadores de desempenho entre as tecnologias 4G e 5G. O estudo concluiu que o sistema 5G apresenta menor jitter em comparação ao 4G, reduzindo em 92%. Além disso, a taxa de transferência na rede 5G aumentou em aproximadamente 108% em comparação ao 4G. O estudo sugere que a adoção do sistema 5G com feedback háptico pode reduzir o atraso em 62% em relação ao sistema 4G.

Esses trabalhos enfocam principalmente o desempenho da comunicação de rede nos equipamentos utilizados na telecirurgia. Em nosso artigo, realizamos uma análise de disponibilidade e confiabilidade de um ambiente de telecirurgia utilizando redes de Petri, um formalismo amplamente utilizado para modelagem e análise de sistemas complexos. Por meio dessa análise, podemos obter informações como a disponibilidade e o tempo de inatividade do ambiente de telecirurgia. Além disso, é possível analisar a probabilidade de entrega de mensagens quando hospitais diferentes estão envolvidos em cirurgias remotas.

IV. METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA ADOTADA

A metodologia utilizada para avaliar a disponibilidade de um ambiente de telecirurgia compreende cinco etapas, são elas: entendimento do sistema, definição de métricas, construção dos modelos e avaliação. Essa metodologia é apresentada em uma sequência, porém, em alguns casos, se faz necessário retroceder uma ou mais etapas para realizar ajustes como, por exemplo, a alteração de algum modelo. A Fig. 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.

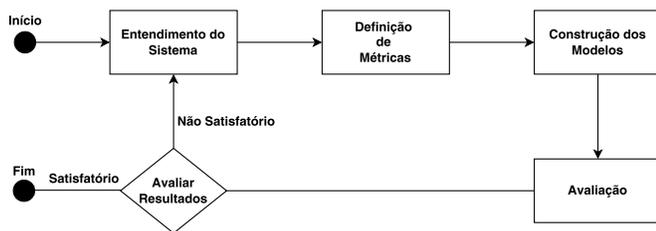


Fig. 2. Metodologia utilizada.

A. Infraestrutura de Telecirurgia Adotada

A Fig. 3 apresenta a arquitetura proposta para um ambiente de telecirurgia, que pode ser realizado em diferentes hospitais. Nesta arquitetura, estão inclusos os robôs responsáveis por executar as cirurgias, a nuvem computacional e os links 4G e WiFi utilizados para comunicação entre os equipamentos e a Internet. Essa arquitetura foi parcialmente baseada em [2]. É importante ressaltar que a comunicação entre os hospitais e a nuvem é realizada por meio de um link direto de Ethernet.

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”. A nuvem computacional é por onde passa o tráfego entre os hospitais A e B e ainda possui o prontuário eletrônico do paciente para que seja consultado em caso de necessidade. Um aspecto importante dessa arquitetura é que, como no procedimento de telecirurgia não pode haver falha de comunicação entre o carrinho do paciente e o console cirurgião, foi considerada a utilização de dois links de acesso a Internet, utilizando tecnologias diferentes, um link 4G e outro WiFi, tanto no hospital A quanto no hospital B.

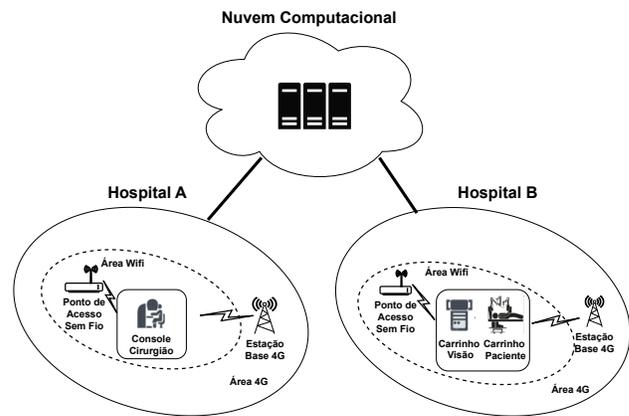


Fig. 3. Arquitetura de telecirurgia adotada.

V. MODELOS PROPOSTOS

Nesta seção, são apresentados os modelos SPN para calcular as métricas adotadas. A Fig. 4 apresenta o modelo SPN proposto para representar o ambiente de telecirurgia descrito na Fig. 3. Ele é dividido em 3 partes: *Nuvem Computacional*, *Hospital A* e *Hospital B*. Na *Nuvem Computacional* é apresentado o modelo que representa a disponibilidade de uma nuvem computacional (Fig. 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 possui até uma falha ocorrer e o tempo médio de reparo (MTTR), ou seja, o tempo que o componente possui até que ele seja reparado.

No *Hospital A*, são apresentados os modelos que representam o console cirurgião (Fig. 4B), a conexão e ativação da rede WiFi (Figs. 4E e F) e a conexão e ativação da rede 4G (Figs. 4G e H). O console cirurgião estará ativado quando um *token* estiver no lugar *CC_on*. A transição F_{CC} representa o MTTF 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.

Os lugares $WiFiA_{Disp}$ e $WiFiA_{At}$ representam, respectivamente, se uma conexão WiFi está disponível (Fig. 4E) e ativa (Fig. 4F). Quando as transições F_{WiFi} e D_{WiFi} são disparadas, a conexão WiFi ficará indisponível (Fig. 4E) e desconectada (Fig. 4F). Já quando as transições R_{WiFi} e C_{WiFi} são disparadas, a conexão WiFi ficará disponível (Fig. 4E) e ativa (Fig. 4F). Note que a ativação e desativação da WiFi depende das funções de guarda definidas na Tabela I. Os modelos das Figs. 4G e H representam o comportamento de ativação e desativação do 4G, que é semelhante ao comportamento da WiFi. Porém, a ativação do 4G depende da desativação do WiFi, a qual é modelada através da função de guarda descrita na Tabela I.

No *Hospital B*, são apresentados os modelos que representam o carrinho do paciente (Fig. 4C), o carrinho visão (Fig. 4D), a conexão e ativação da rede WiFi (Figs. 4I e J) e a conexão e ativação da rede 4G (Figs. 4L e M). O comportamento desses modelos é semelhante ao apresentado

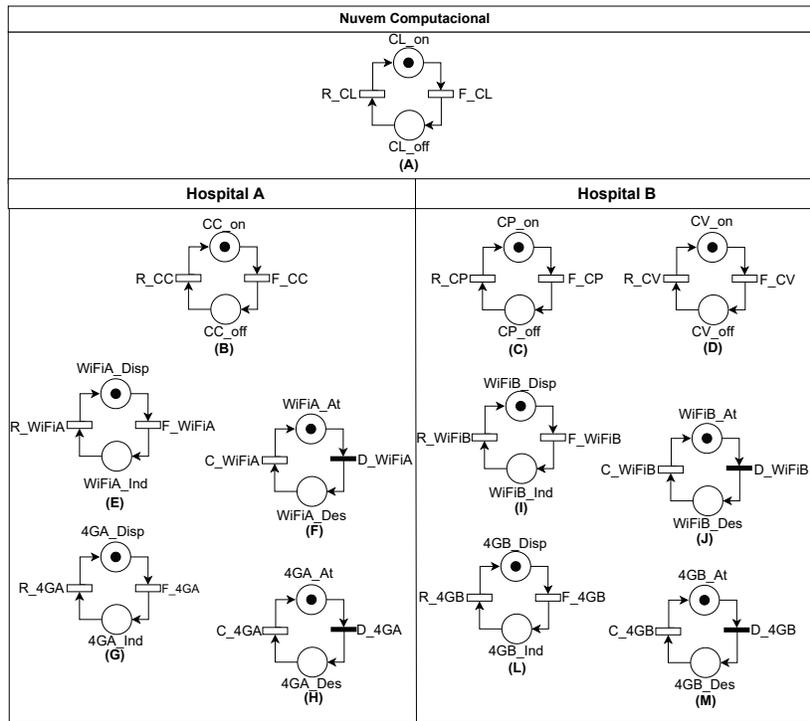


Fig. 4. Modelos de Rede de Petri de um ambiente de Telecirurgia.

TABELA I
TRANSIÇÕES E FUNÇÕES DE GUARDA.

Transição	Função de Guarda
C_4GA	(#WiFiA_Dis=0)AND(#4GA_Dis=1)
D_4GA	(#WiFi_Dis=1)AND(#WiFi_At=1)OR(#4GA_Dis=0)
C_WiFiA	(#WiFiA_Dis=1)
D_WiFiA	(#WiFiA_Ind=0)

anteriormente para o Hospital A. Além disso, a Tabela I apresenta as funções de guarda usadas para a ativação do 4G.

Devido ao nível de criticidade que possui uma telecirurgia, é imprescindível uma eficiente comunicação entre os equipamentos que compõem o robô cirúrgico, o tempo de entrega das mensagens é uma métrica importante a ser analisada. Os cirurgiões devem ser imediatamente informados sobre qualquer atraso no tempo de comunicação entre o console cirurgião e o carrinho paciente.

A Fig. 5 apresenta um modelo SPN que representa o caminho que uma mensagem leva desde o console cirurgião até o carrinho do paciente considerando hospitais distintos. O token no lugar EM representa uma mensagem que precisa ser entregue do console cirurgião até o carrinho do paciente, no lugar RM. Um token no lugar CCon informa que o console cirurgião está operacional. Caso a transição CCfalha seja disparada, o token irá para o lugar CCoft. O arco inibidor que conecta o lugar CCoft à transição ENVcc garante que a transição ENVcc não será disparada caso não haja token no lugar CCon. Quando a transição ENVcc é disparada, o token é enviado para o lugar CKcc, então uma condição será analisada. Se a transição PGSup for disparada, significa que o gateway de saída está operacional e a mensagem será

enviada para a cloud (CL). Por outro lado, se a transição PGSdw for disparada, significa que o envio falhou e, após um período de timeout(TOcc), a mensagem será enviada novamente. Quando a transição Tproc é disparada, que representa o processamento da mensagem na nuvem, um token é gerado no lugar CLout, significando que a mensagem está deixando a nuvem computacional. Com o disparo da transição ENVcl, um token será gerado em CKcl e, posteriormente, uma nova checagem da nuvem computacional é realizada. Se ela estiver operacional (transição PCLup), a mensagem será enviada para o gateway de entrada do carrinho do paciente (GEcp). Em seguida, caso a transição PGEcp seja disparada, que representa que o gateway de entrada está operacional, a mensagem é enviada para o carrinho do paciente (CKcp). Se a transição PGEcpdw for disparada, significa que o gateway de entrada não está operacional, então terá um timeout e, em seguida, haverá a checagem novamente. Com um token em CKcp, será realizado uma última verificação. Se o carrinho do paciente estiver operacional (Pcpup), a mensagem será então entregue (RM). Caso contrário, o token será retornado para o lugar TOgecl e terá um timeout para então tentar enviar a mensagem novamente.

Para entendermos melhor qual o impacto que uma telecirurgia realizada com o carrinho do paciente e console do cirurgião, estando em um mesmo hospital e em hospitais diferentes possui sobre o envio de uma mensagem, realizamos uma análise considerando um modelo de uma telecirurgia realizada com os equipamentos estando em um mesmo hospital. A Fig. 6 apresenta o modelo SPN que representa o envio de mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente, mas considerando que os mesmos estão no mesmo hospital. Esse modelo é semelhante ao apresentado anteriormente quando

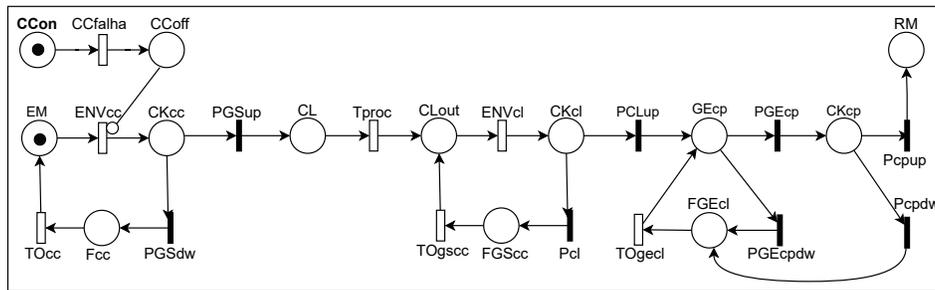


Fig. 5. Modelo SPN de envio mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente em hospitais diferentes.

temos dois hospitais distintos. A diferença é que nesse caso não consideramos o componente da nuvem computacional.

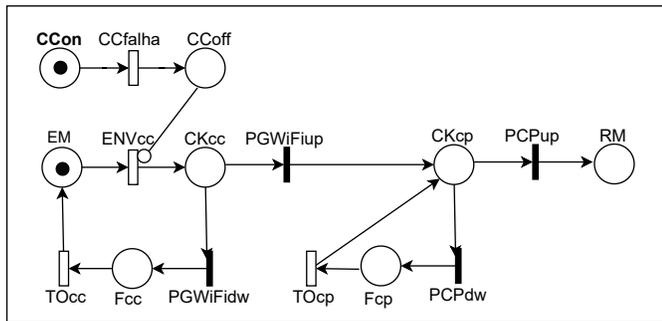


Fig. 6. Modelo SPN de envio de mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente no mesmo hospital.

VI. 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 II, III e IV apresentam as métricas adotadas. Salientamos que os resultados foram obtidos através de análises utilizando o Mercury na versão 5.0.2 [13]. Além disso, é importante ressaltar que a confiabilidade é calculada pela probabilidade de falha de algum componente através de uma avaliação transiente em um determinado momento. Para tanto, os modelos SPN apresentados na Fig. 4 foram modificados de forma a não incluir a consideração de reparos.

A. Parâmetros de entrada

Para avaliar a disponibilidade, o tempo de inatividade e a confiabilidade do ambiente de telecirurgia, são necessários alguns parâmetros de entrada. Nesse caso, são considerados os tempos de falha e reparo dos componentes. Na Tabela V são apresentados as descrições, as transições e os valores adotados. Os valores de MTTF e MTTR da nuvem computacional foram baseados no trabalho de [14]. Os valores para Carrinho Paciente, Carrinho Visão e Console Cirurgião foram definidos com base no manual dos equipamentos do robô da Vinci [15]. Já os valores de ativação e desativação do WiFi e 4G foram baseados em [16]. Na Tabela VI são apresentadas as transições

TABELA II
MÉTRICAS E FUNÇÕES UTILIZADAS PARA CALCULAR A DISPONIBILIDADE E O TEMPO DE INATIVIDADE EM HOSPITAIS DIFERENTES.

Métrica	Função
Disp	$(P\{((\#WiFiA_Disp=1)AND(\#WiFiA_At=1)) OR((\#4GA_Disp=1) AND(\#4GA_At=1))) AND((\#WiFiB_Disp=1)AND(\#WiFiB_ativo=1)) OR((\#4GB_Disp=1)AND(\#4GB_At=1))) AND(\#CL_on=1)AND(\#CC_on=1)AND(\#CP_on=1)AND(\#CV_on=1)\}$
Down	$(1-(P\{((\#WiFiA_Disp=1)AND(\#WiFiA_At=1)) OR((\#4GA_Disp=1) AND(\#4GA_At=1))) AND((\#WiFiB_Disp=1)AND(\#WiFiB_ativo=1)) OR((\#4GB_Disp=1)AND(\#4GB_At=1))) AND(\#CL_on=1)AND(\#CC_on=1)AND(\#CP_on=1)AND(\#CV_on=1)\})) * 8760$

TABELA III
MÉTRICAS E FUNÇÕES UTILIZADAS PARA CALCULAR A DISPONIBILIDADE E O TEMPO DE INATIVIDADE EM UM MESMO HOSPITAL.

Métrica	Função
Disp	$(P\{((\#wifia_disponivel=1)AND(\#wifia_ativo=1)) OR((\#cela_disponivel=1)AND(\#cela_ativo=1))) AND(\#cloud_on=1)AND(\#SurgeonConsole_on=1) AND(\#PatientCart_on=1)AND(\#VisionCart_on=1)\}$
Down	$(1-(P\{((\#wifia_disponivel=1)AND(\#wifia_ativo=1)) OR((\#cela_disponivel=1)AND(\#cela_ativo=1))) AND(\#cloud_on=1)AND(\#SurgeonConsole_on=1) AND(\#PatientCart_on=1)AND(\#VisionCart_on=1)\})) * 8760$

TABELA IV
MÉTRICAS E FUNÇÕES UTILIZADAS PARA CALCULAR A CONFIABILIDADE.

Métrica	Função
Conf Wi-Fi	$P\{((\#SurgeonConsole_off=1)OR(\#PatientCart_off=1)) OR(\#VisionCart_off=1)OR(\#cloud_off=1)) OR(\#wifia_indisponivel=1)OR(\#wifib_indisponivel=1)\}$
Conf Wi-Fi + 4G	$P\{((\#SurgeonConsole_off=1) OR(\#PatientCart_off=1)OR(\#VisionCart_off=1)OR(\#cloud_off=1)OR((\#wifia_indisponivel=1)AND(\#cela_indisponivel=1)) OR((\#wifib_indisponivel=1)AND(\#celb_indisponivel=1)))\}$

e os valores de referência para o envio da mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente. Os valores das transições *CCfalha*, *ENVcc*, *TOcc*, *TOgsc*, *TOgecl*, *Tproc* e *ENVcl* estão em horas e foram baseados em [17] e [18]. Os valores das transições *PGSup*, *PGEcp*, *PCLup* e *Pcpup* são probabilidades e foram obtidos a partir dos modelos do ambiente de telecirurgia.

TABELA V
DESCRIÇÃO, TRANSIÇÕES E VALORES ADOTADOS DO AMBIENTE DE TELECIURURGIA.

Dispositivo	Transição	Valor(h)
WiFi Conectar	R_WiFiA / R_WiFiB	1,6666
WiFi Desconectar	F_WiFiA / F_WiFiB	10000
4G Conectar	R_4GA / R_4GB	12
4G Desconectar	F_4GA / F_4GB	83220
WiFi Ativação	C_WiFiA / C_WiFiB	0,01666
4G Ativação	C_4GA / C_4GB	0,01666
MTTR da Nuvem Computacional	R_CL	1
MTTF da Nuvem Computacional	F_CL	8766
MTTR do Carrinho Paciente	R_CP	6
MTTF do Carrinho Paciente	F_CP	17520
MTTR do Carrinho Visão	R_CV	6
MTTF do Carrinho Visão	F_CV	17520
MTTR do Console Cirurgião	R_CC	6
MTTF do Console Cirurgião	F_CC	17520

TABELA VI
COMPONENTES, TRANSIÇÕES E VALORES PARA O ENVIO DA MENSAGEM ENTRE O CONSOLE CIRURGIÃO E O CARRINHO DO PACIENTE.

Componente	Transição	Valor(h)
Console Cirurgião	CCfalha	0,99965
Envio Mensagem	ENVcc	8,25e-6
Timeout	TOcc, TOgsc, TOgecl	2,31388889e-6
Gateway (link WiFi)	PGSup, PGEcp	0,99585
Gateway (link WiFi + 4G)	PGSup, PGEcp	0,99998
Tempo Processamento	Tproc	4,1666667e-7
Envio Cloud	ENVcl	8,4e-5
Cloud Disponível	PCLup	0,99988
Carrinho do Paciente	Pcpup	0,99965

B. Análise dos Resultados

A Fig. 7 ilustra a disponibilidade do ambiente de telecirurgia, considerando cirurgias realizadas no mesmo hospital e em hospitais diferentes, utilizando apenas Wi-Fi e Wi-Fi + 4G. Podemos observar que a melhor disponibilidade ocorre quando a cirurgia é realizada no mesmo hospital, utilizando os links Wi-Fi e 4G, com uma taxa de disponibilidade de 99,884%. No entanto, a diferença de disponibilidade entre cirurgias realizadas em hospitais diferentes é mínima. Isso se deve à implementação de links de comunicação redundantes. Por outro lado, a cirurgia realizada em hospitais diferentes, utilizando apenas a rede Wi-Fi para comunicação, obteve o pior resultado de disponibilidade, com 99,8523%. Em contraste, a cirurgia no mesmo hospital alcançou uma melhor disponibilidade, atingindo 99,8857%. Isso ressalta a importância do uso de links de comunicação redundantes. Além disso, quando não é possível ter links redundantes, é preferível que a telecirurgia seja realizada no mesmo hospital em que o paciente se encontra.

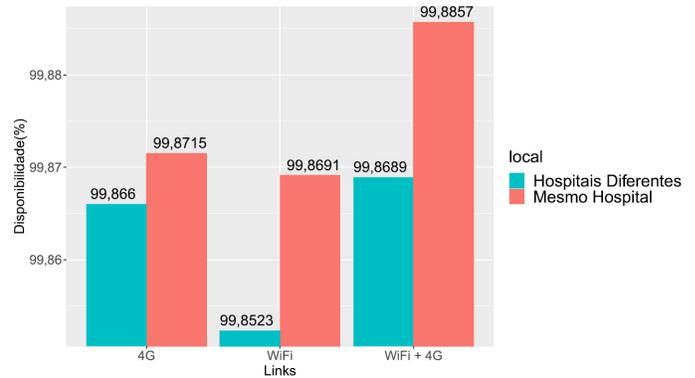


Fig. 7. Disponibilidade geral do ambiente de telecirurgia.

A Fig. 8 apresenta o tempo de inatividade em horas do ambiente de telecirurgia ao longo de um ano. Novamente, consideramos cirurgias realizadas no mesmo hospital e em hospitais diferentes, utilizando Wi-Fi e Wi-Fi + 4G. Podemos observar que o cenário com menor tempo de inatividade ocorre quando a cirurgia é realizada no mesmo hospital, utilizando os links Wi-Fi e 4G, resultando em um tempo de inatividade de 10,0072 horas, o que representa 0,1160% do tempo em um ano. Por outro lado, o pior resultado foi obtido quando a cirurgia é realizada em hospitais diferentes, utilizando apenas a rede Wi-Fi, resultando em um tempo de inatividade de 12,9377 horas por ano. É importante destacar que a diferença nos períodos de inatividade entre cirurgias remotas e locais utilizando apenas Wi-Fi é quase o dobro.

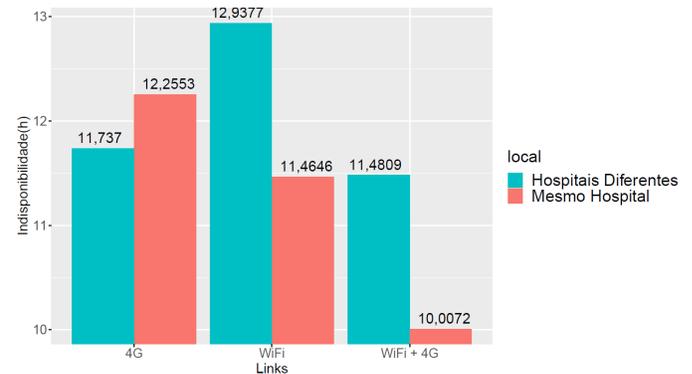


Fig. 8. Tempo de inatividade em horas do ambiente de telecirurgia.

A Fig. 9 apresenta a confiabilidade de um ambiente de telecirurgia considerando cirurgias realizadas em hospitais diferentes. Isso implica a probabilidade de falha no ambiente de telecirurgia ao considerar apenas Wi-Fi ou Wi-Fi + 4G. Observamos que o cenário com menor probabilidade de ocorrência de problemas é quando a cirurgia é realizada utilizando os links Wi-Fi e 4G. Considerando um período de um ano, a probabilidade de erro em uma cirurgia utilizando os links Wi-Fi e 4G é de 91,9674%, enquanto utilizando apenas o Wi-Fi, a probabilidade é de 98,6457%. Para um período de 12000 horas, a diferença diminuiu um pouco, mas a probabilidade de erro ainda é menor utilizando os links Wi-Fi e 4G, com 96,7977%, em comparação com o uso apenas do Wi-Fi, com 99,8017%.

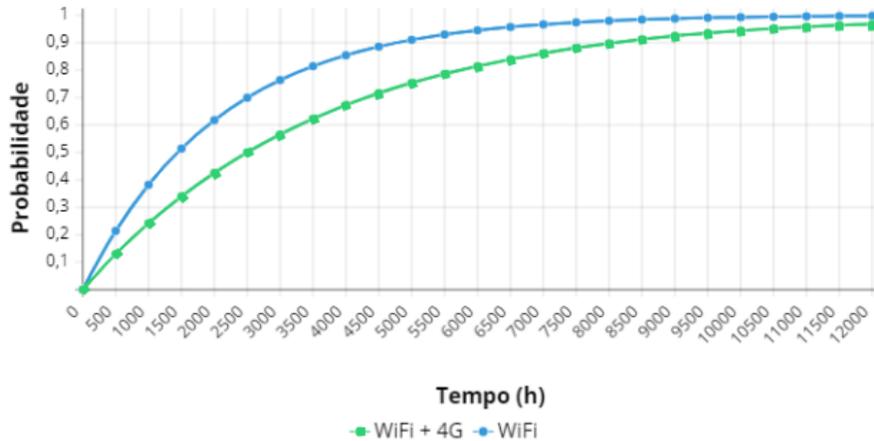


Fig. 9. Confiabilidade do ambiente de telecirurgia.

Para calcular a probabilidade de entrega das mensagens, avaliamos a métrica $P\{\#RM = 1\}$ em um tempo específico. A Fig. 10 exibe o gráfico do envio de uma mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente, utilizando os links Wi-Fi + 4G em uma telecirurgia realizada no mesmo hospital e em hospitais diferentes, considerando o tempo em segundos. Podemos verificar que a probabilidade de entrega da mensagem em uma cirurgia realizada no mesmo hospital é de 98,5368% em 1 segundo. Por outro lado, considerando uma cirurgia em hospitais diferentes, a probabilidade é de 95,9162% em 1 segundo. No entanto, se considerarmos 0,5 segundos, a diferença aumenta significativamente, com a probabilidade de entrega sendo de 98,5367% para o mesmo hospital e 78,6666% para hospitais distintos. Com esses resultados, chegamos à conclusão de que a probabilidade de entrega de mensagens em uma cirurgia realizada no mesmo hospital é maior do que em hospitais diferentes, devido ao fato de as mensagens não passarem por uma rede externa.

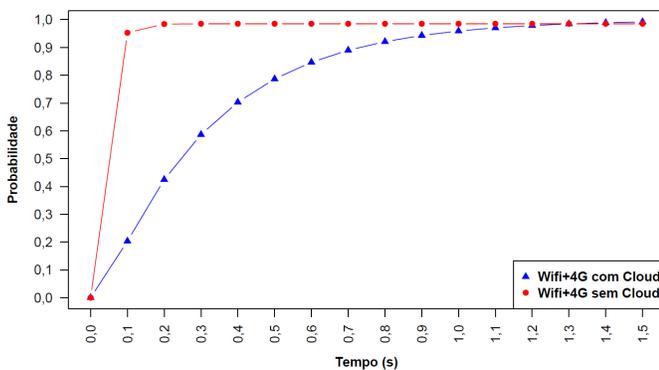


Fig. 10. Gráfico do envio da mensagem considerando um ambiente com e sem cloud.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, nós apresentamos uma proposta baseada em modelos estocásticos para modelar e analisar o ambiente de telecirurgia utilizando as SPNs. Fizemos análises considerando a cirurgia sendo realizada em um mesmo hospital e em hospitais diferentes e consideramos diferentes tipos de links. Os melhores resultados foram apresentados com o robô localizado em um mesmo hospital e utilizando mais de uma rede para comunicação entre os equipamentos. Porém, a diferença não foi tão grande quando realizado a cirurgia em hospitais diferentes com WiFi + 4G, mostrando a importância de usar links redundantes, e consequentemente, reduzindo os riscos aos pacientes. Já a confiabilidade considerando links WiFi e 4G é de 91,9674%, enquanto utilizando apenas o link WiFi é de 98,6457% para o período de 1 ano. Com relação à entrega da mensagem, podemos verificar que a probabilidade da mensagem ser entregue, em uma cirurgia realizada no mesmo hospital, é maior que em hospitais distintos. Uma limitação deste estudo é a suposição de que todas as transições são exponenciais. Embora seja uma simplificação comumente utilizada em modelos analíticos, pode não refletir precisamente a realidade em certos contextos. Além disso, é importante destacar que consideramos que a conexão Ethernet entre os hospitais não falha.

Como trabalho futuro, pretendemos expandir nossa análise incorporando a tecnologia 5G ao cenário proposto. A inclusão da rede 5G permitirá uma investigação mais aprofundada do desempenho e da viabilidade de sua utilização na telecirurgia. Essa tecnologia promete vantagens significativas em termos de velocidade de comunicação, baixa latência e maior capacidade de transmissão de dados. Esperamos investigar de que forma o uso da rede 5G pode aprimorar a telecirurgia, por exemplo, reduzindo a latência e aumentando a confiabilidade das comunicações entre os robôs cirúrgicos.

REFERENCES

- [1] H. A. A. d. Matos, *Cirurgia robótica em ORL: uma abordagem ao sistema Da Vinci*. PhD thesis, Escola de Medicina de Lisboa, 2017.
- [2] Q. Zhang, J. Liu, and G. Zhao, "Towards 5g enabled tactile robotic telesurgery," *arXiv preprint arXiv:1803.03586*, 2018.
- [3] M. J. Lum, J. Rosen, H. King, D. C. Friedman, T. S. Lendvay, A. S. Wright, M. N. Sinanan, and B. Hannaford, "Teleoperation in surgical robotics—network latency effects on surgical performance," in *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 6860–6863, IEEE, 2009.
- [4] F. Boabang, A. Ebrahimzadeh, R. H. Glitho, H. Elbiaze, M. Maier, and F. Belqasmi, "A machine learning framework for handling delayed/lost packets in tactile internet remote robotic surgery," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 4, pp. 4829–4845, 2021.
- [5] D. A. Meshram and D. D. Patil, "5g enabled tactile internet for tele-robotic surgery," *Procedia Computer Science*, vol. 171, pp. 2618–2625, 2020.
- [6] A. L. G. MORRELL, A. C. MORRELL-JUNIOR, A. G. MORRELL, J. MENDES, M. FREITAS, F. TUSTUMI, A. MORRELL, *et al.*, "Evolução e história da cirurgia robótica: da ilusão à realidade," *Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões*, vol. 48, 2021.
- [7] Intuitive, "Da Vinci surgical systems." <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/systems>. Acessado: 05-04-2022.
- [8] C. A. Petri, *Kommunikation mit automaten*. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt, 1962.
- [9] P. R. Maciel, R. D. Lins, and P. R. Cunha, *Introdução às redes de Petri e aplicações*. UNICAMP-Instituto de Computacao, 1996.
- [10] N. Marranghello, "Redes de petri: Conceitos e aplicações," *São Paulo: DCCE/IBILCE/UNESP*, 2005.
- [11] A. Cunha, G. Callou, E. Sousa, and E. Tavares, "Modelagem hierárquica e heterogênea para avaliação de disponibilidade de aplicações big data na nuvem privada," in *Anais do XX Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*, pp. 49–60, SBC, 2021.
- [12] K. S. Trivedi, S. Hunter, S. Garg, and R. Fricks, "Reliability analysis techniques explored through a communication network example," tech. rep., North Carolina State University. Center for Advanced Computing and Communication, 1996.
- [13] Modes Research Group, "Mercury."
- [14] E. Andrade and B. Nogueira, "Dependability evaluation of a disaster recovery solution for iot infrastructures," *The Journal of Supercomputing*, vol. 76, no. 3, pp. 1828–1849, 2020.
- [15] Intuitive, "Da Vinci manual." <https://manuals.intuitivesurgical.com>. Acessado: 05-04-2022.
- [16] F. Machida and E. Andrade, "Availability modeling for drone image processing systems with adaptive offloading," in *2021 IEEE 26th Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC)*, pp. 93–103, IEEE, 2021.
- [17] E. Andrade, B. Nogueira, I. d. Farias Júnior, and D. Araújo, "Performance and availability trade-offs in fog–cloud iot environments," *Journal of Network and Systems Management*, vol. 29, no. 1, pp. 1–27, 2021.
- [18] J. Araujo, B. Silva, D. Oliveira, and P. Maciel, "Dependability evaluation of a mhealth system using a mobile cloud infrastructure," in *2014 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (SMC)*, pp. 1348–1353, IEEE, 2014.



Jean Araujo is an associate professor at the Department of Computing at the Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Brazil. In 2017, he completed his PhD in Computer Science from the Federal University of Pernambuco. His research interest is focused in Software Aging and Rejuvenation, Performance, Dependability, and Stochastic Modelling.



Bruno Nogueira is an assistant professor at the Institute of Computing at Universidade Federal de Alagoas, Brazil. In 2015, he completed his PhD in Computer Science from the Federal University of Pernambuco. His research interest is focused in Optimization, Performance and Dependability Evaluation, and High-Performance Computing.



Ermeson Andrade is an associate professor at the Department of Computing at the Federal Rural University of Pernambuco, Brazil. In 2014, he completed his PhD in Computer Science from the Federal University of Pernambuco. His research interest is focused in Performance, Dependability, Critical Infrastructure, Data science and Modeling.



Vamberto Rocha Jr. is student of the Master's Program in Applied Informatics at the Federal Rural University of Pernambuco, Brazil. His research is in Intelligence and Computacional Modeling. He is currently the CTO of the Federal University of Agreste de Pernambuco (UFAPE).