



Universidade Federal Rural de Pernambuco

Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada

**Modelagem Estocástica de um Ambiente de Telecirurgia para
Avaliação de Disponibilidade, Confiabilidade e Entrega de
Mensagem**

Vamberto de Freitas Rocha Junior

Orientador: Prof. Dr. Ermeson Carneiro de Andrade

Coorientador: Prof. Dr. Jean Carlos Teixeira de Araujo

Recife, 2024

**Modelagem Estocástica de um Ambiente de Telecirurgia para Avaliação de
Disponibilidade, Confiabilidade e Entrega de Mensagem**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Informática Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Ermeson Carneiro de Andrade
Coorientador: Prof. Dr. Jean Carlos Teixeira de Araujo

Recife, 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R672m Rocha Junior, Vamberto
Modelagem Estocástica de um Ambiente de Telecirurgia para Avaliação de Disponibilidade, Confiabilidade e Entrega de Mensagem / Vamberto Rocha Junior. - 2024.
76 f. : il.
- Orientador: Ermeson Carneiro de Andrade.
Coorientador: Jean Carlos Teixeira de Araujo.
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada, Recife, 2024.
1. Telecirurgia. 2. Redes de Petri. 3. Dependabilidade. I. Andrade, Ermeson Carneiro de, orient. II. Araujo, Jean Carlos Teixeira de, coorient. III. Título

A tecnologia move o mundo.

Steve Jobs

Agradecimentos

À minha esposa, Thaís, e às minhas filhas, Luísa e Lívia.

Aos meus pais, Helena e Vamberto.

À minha irmã, Cristina, e aos meus sobrinhos, Guilherme e Felipe.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ermeson Andrade.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Jean Araújo.

Aos colegas de trabalho na UFAPE.

Ao meu colega de mestrado, Edson.

A todos aqueles que, de alguma forma, me ajudaram durante esta jornada.

RESUMO

Nos últimos anos, observou-se um expressivo aumento no número de cirurgias realizadas por robôs. A efetivação bem-sucedida da telecirurgia (ou cirurgia remota) demanda uma sincronia primordial entre o robô e o *link* de comunicação. Contudo, até o momento, não é do nosso conhecimento a existência de um estudo que tenha abordado analiticamente esses ambientes de cirurgia remota quando tais procedimentos são executados entre hospitais distintos. Nesta abordagem, o médico especialista conduz a operação a partir de um hospital, enquanto o paciente está em um segundo hospital, situado em uma localização geograficamente distante. O objetivo central desta pesquisa é modelar e analisar um ambiente de telecirurgia, viabilizando a obtenção de métricas essenciais, como disponibilidade e confiabilidade. Foram conduzidos estudos de caso, visando as melhores configurações através do cálculo de métricas como: disponibilidade, tempo de inatividade e confiabilidade. Adicionalmente, realizou-se uma análise aprofundada dos diferentes tipos de redes de comunicação, a fim de determinar a mais indicada para a execução eficaz da telecirurgia. Além disso, foi desenvolvido modelos de entrega de mensagens para mensurar o tempo médio de transmissão entre o console do cirurgião e o carrinho do paciente. 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. Os resultados e conclusões apresentados neste trabalho têm o potencial de auxiliar a equipe de manutenção (ou equipe médica) na otimização do planejamento da infraestrutura utilizada na telecirurgia, minimizando possíveis falhas que poderiam comprometer a segurança e a vida dos pacientes.

Palavras-chave: Telecirurgia, Redes de Petri, Modelagem, Disponibilidade, Confiabilidade, Rede 5G.

ABSTRACT

In recent years, there has been a significant increase in the number of surgeries performed by robots. The successful implementation of tele-surgery (or remote surgery) demands a primary synchronization between the robot and the communication link. However, to date, we are not aware of any study that has analytically addressed these remote surgery environments when such procedures are performed between different hospitals. In this approach, the specialist doctor conducts the operation from one hospital, while the patient is in a second hospital, located at a geographically distant location. The central objective of this research is to model and analyze a tele-surgery environment, enabling the obtainment of essential metrics, such as availability and reliability. Case studies were conducted, aiming at the best configurations through the calculation of metrics such as availability, downtime, and reliability. Additionally, a thorough analysis of different types of communication networks was carried out to determine the most suitable for the effective execution of tele-surgery. Furthermore, message delivery models were developed to measure the average transmission time between the surgeon's console and the patient's cart. The results revealed that the shortest downtime occurs when performing surgery in the same hospital, with the system being inactive for 10.6 hours annually. For tele-surgery between two hospitals connected by 5G, the failure probability index was 98.889%, with a message delivery probability of 100% in just 0.8 seconds. The results and conclusions presented in this work have the potential to assist the maintenance team (or medical team) in optimizing the planning of the infrastructure used in tele-surgery, minimizing potential failures that could compromise the safety and lives of patients.

Keywords: Tele-surgery, Petri Nets, Modeling, Availability, Reliability, 5G Network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Robô Da Vinci, composto por: Console cirurgião, carrinho do paciente e o carrinho visão.	23
Figura 2 – Cirurgia realizada com o sistema Da Vinci.	23
Figura 3 – Árvore de dependabilidade - Adaptado de (LAPRIE, 1992).	29
Figura 4 – Elementos de uma Rede de Petri.	34
Figura 5 – Redes de Petri - Períodos do Dia.	34
Figura 6 – 5G Core Network.	41
Figura 7 – Arquitetura da Rede 5G.	42
Figura 8 – Metodologia utilizada.	44
Figura 9 – Arquitetura de telecirurgia considerando os <i>links</i> WiFi e 4G.	48
Figura 10 – Modelos de Rede de Petri de um ambiente de Telecirurgia.	49
Figura 11 – Modelo SPN de envio mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente em hospitais diferentes.	51
Figura 12 – Modelo SPN de envio de mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente no mesmo hospital.	52
Figura 13 – Disponibilidade geral do ambiente de telecirurgia.	56
Figura 14 – Tempo de inatividade em horas do ambiente de telecirurgia.	57
Figura 15 – Gráfico de probabilidade de falha de um ambiente de Telecirurgia realizada em um mesmo hospital e em hospitais diferentes.	58
Figura 16 – Envio de mensagem considerando <i>links</i> WiFi + 4G e realizada num mesmo hospital e em hospitais diferentes.	59
Figura 17 – Arquitetura de telecirurgia adotada que utiliza <i>link</i> 5G para interconexão dos equipamentos.	61
Figura 18 – Modelagem de Rede de Petri de um ambiente de Telecirurgia que utiliza <i>link</i> 5G para inteconexão dos equipamentos.	62
Figura 19 – Modelagem de Rede de Petri para o envio de uma mensagem de um ambiente de Telecirurgia que utiliza <i>link</i> 5G para interconexão dos equipamentos.	63
Figura 20 – probabilidade de falha de um ambiente de Telecirurgia.	68

Figura 21 – Tempo de envio de uma mensagem de um ambiente de Telecirurgia . . 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados.	19
Tabela 2 – Comparação entre a cirurgia robótica e a convencional.	25
Tabela 3 – Requisitos mínimos de rede para realização de uma telecirurgia.	26
Tabela 4 – Comparação entre o 4G e 5G	43
Tabela 5 – Transições e funções de guarda.	50
Tabela 6 – Descrição, transições e valores do ambiente de telecirurgia.	53
Tabela 7 – Componentes, transições e valores para o envio da mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente.	53
Tabela 8 – Métricas e funções utilizadas para calcular a disponibilidade e o tempo de inatividade em hospitais diferentes.	54
Tabela 9 – Métricas e funções utilizadas para calcular a disponibilidade e o tempo de inatividade em um mesmo hospital.	55
Tabela 10 – Métricas e funções utilizadas para calcular a confiabilidade.	55
Tabela 11 – Componentes, transições e valores utilizados nos experimentos desse trabalho.	65
Tabela 12 – Métricas e funções utilizadas para calcular a disponibilidade e o tempo de inatividade em hospitais diferentes e em um mesmo hospital.	67
Tabela 13 – Métricas e funções utilizadas para calcular a probabilidade de falha.	67
Tabela 14 – Disponibilidade e tempo de inatividade de um ambiente de telecirurgia realizada em um mesmo hospital e em hospitais diferentes.	67

LISTA DE SIGLAS

TI	<i>Tecnologia da Informação</i>
AF	<i>Application Function</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i>
AUSF	<i>Authentication Server Function</i>
ECG	Eletrocardiograma
EEG	Eletroencefalograma
eMMB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
EMG	Eletromiografia
gNB	<i>Next Generation Node B</i>
IaaS	<i>Infrastructure as a Service</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
MEC	<i>Mobile Engine Computer</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
NaaS	<i>Network as a Service</i>
NEF	<i>Network Exposure Function</i>
NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
NRF NF	<i>(Network Function) Repository Function</i>
PCF	<i>Policy Control Function</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
SDN	<i>Software Defined Network</i>
SMF	<i>Session Management Function</i>
SPN	<i>Stochastic Petri Nets</i>
UDM	<i>Unified Data Management</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable Low Latency Communication</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
SUMÁRIO	11
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Motivação e Justificativa	15
1.2 Trabalhos Relacionados	16
1.3 Objetivos	19
1.4 Estrutura da Dissertação	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Telecirurgia	21
2.1.1 Vantagens e desvantagens da cirurgia robótica	24
2.2 Dependabilidade	27
2.2.1 Disponibilidade	31
2.2.2 Confiabilidade	32
2.3 Redes de Petri	33
2.3.1 Redes de Petri Estocásticas	35
2.4 Redes 5G	38
2.5 Considerações finais	43
3 METODOLOGIA	44
3.1 Considerações Finais	46
4 ESTUDO DE CASO	47
4.1 Estudo de Caso 1 - WiFi x 4G	47
4.1.1 Arquitetura	47
4.1.2 Modelos	49
4.1.3 Parâmetros de entrada	52

4.1.4	Métricas	54
4.1.5	Resultados	56
4.2	Estudo de Caso 2 - 5G	60
4.2.1	Arquitetura	60
4.2.2	Modelos	61
4.2.3	Parâmetros de entrada	64
4.2.4	Métricas	65
4.2.5	Resultados	66
4.3	Considerações finais	69
5	CONCLUSÕES	70
5.1	Contribuições	71
5.2	Trabalhos Futuros	72
	REFERÊNCIAS	73

1 Introdução

Vive-se uma era de constantes avanços tecnológicos, e a medicina não fica fora desse processo. Nas últimas décadas, observamos um grande crescimento da tecnologia médica, sendo um dos marcos mais notáveis a utilização de robôs na realização de cirurgias, que ocorrem a uma distância de alguns metros entre o paciente e o cirurgião, graças aos avanços nas tecnologias de comunicação (MATOS, 2017).

A telecirurgia, uma modalidade inovadora na realização de procedimentos cirúrgicos, em que o cirurgião opera a partir de uma localização geográfica distante do paciente, está deixando de ser uma ideia considerada impossível para se tornar um componente crucial na prática médica contemporânea (SEELIGER; MARESCAUX, 2023). A convergência da cirurgia tradicional com as capacidades da telemedicina prometem revolucionar a prestação de cuidados da saúde, possibilitando o acesso a intervenções cirúrgicas avançadas em regiões remotas e situações de emergência, quando o acesso direto a um cirurgião pode ser limitado.

Apesar das grandes vantagens proporcionadas pela telecirurgia, surgem preocupações significativas, especialmente em relação ao *link* de Internet que interconecta o equipamento do paciente e o utilizado pelo cirurgião. Quedas de conexão ou atrasos podem comprometer a cirurgia e colocar a vida do paciente em risco. Outro ponto crítico diz respeito à disponibilidade e à confiabilidade dos equipamentos. Falhas na comunicação entre os componentes do robô cirurgião podem resultar na indisponibilidade do equipamento ou em movimentos inadequados dos braços do carrinho do paciente, representando um risco à vida do paciente (ZHANG; LIU; ZHAO, 2018). Portanto, é essencial analisar a disponibilidade dessas infraestruturas para ajudar a equipe de manutenção a estimar a ocorrência de falhas, realizar manutenções preventivas e adotar estratégias de redundância para evitar interrupções no funcionamento.

Diversas pesquisas têm sido conduzidas com o objetivo de avaliar a qualidade do *link* e a latência em telecirurgias. No estudo de Zhang, Liu e Zhao (2018), os autores delineiam as características de um ambiente de telecirurgia, identificando seus fatores limitantes, e descrevem os requisitos de *quality of service* (QoS) do *link*. Lum et al. (2009) abordam o impacto do tempo de atraso em procedimentos de telecirurgia. Uma

abordagem mais recente, apresentada por [Boabang et al. \(2021\)](#), destaca a importância de um *link* confiável, propondo ainda um método para antecipar o conteúdo de mensagens perdidas, visando aprimorar o desempenho da comunicação. Em outro estudo relevante, [Meshram e Patil \(2020\)](#) realizam uma análise abrangente sobre a utilização das tecnologias 4G e 5G no contexto da telecirurgia. Além disso, os autores propõem uma arquitetura inovadora para telecirurgia robótica, integrando *feedback* tátil.

Contudo, até o presente momento, não existem trabalhos que proponham modelos analíticos específicos para a análise de disponibilidade e de confiabilidade em ambientes de telecirurgia. Tais modelos podem oferecer *insights* significativos sobre os fatores críticos que impactam a estabilidade e a segurança desses ambientes altamente especializados ([ROCHA et al., 2023](#)). A complexidade inerente à telecirurgia, juntamente com a constante evolução das tecnologias associadas, sugere a necessidade de uma abordagem mais aprofundada e analítica para avaliar não apenas a eficácia do *link* de comunicação, mas também a robustez do sistema como um todo. A implementação de modelos analíticos poderia fornecer informações valiosas sobre os potenciais gargalos, permitindo estratégias proativas de mitigação de riscos e aprimoramento da confiabilidade operacional em procedimentos de telecirurgia. Evidencia-se, portanto, a necessidade de pesquisas que se dediquem ao preenchimento dessa lacuna, contribuindo para o avanço e a segurança contínua de uma inovadora modalidade médica.

Considerando esses fatores, propomos a modelagem do ambiente de telecirurgia utilizando redes de Petri estocásticas para calcular a disponibilidade, tempo de inatividade e confiabilidade ([REISIG, 2012](#)). A utilização de modelos permite a abstração de detalhes de nível inferior irrelevantes para a caracterização do desempenho de nível superior, simplificando o processo de modelagem em comparação a outras técnicas de avaliação. As redes de Petri estocásticas foram escolhidas pela capacidade de representar sistemas complexos e dinâmicos. Além disso, oferecem avaliação quantitativa de desempenho, facilitando a otimização e a tomada de decisões, e permitem a análise de sistemas concorrentes e a verificação formal de propriedades, sendo aplicáveis em diversos domínios, como computação, manufatura e biologia molecular ([HAAS, 2006](#)).

Para demonstrar a aplicabilidade da abordagem proposta, foram conduzidos dois estudos de caso nos quais foram analisados cenários considerando diferentes tipos de *links* de comunicação, como WiFi, 4G e 5G, e a realização da cirurgia dentro do mesmo hospital

ou em hospitais distintos. Além disso, calculamos a probabilidade de uma mensagem ser entregue do console do cirurgião ao carrinho do paciente em um determinado período de tempo. Os resultados obtidos têm o potencial de auxiliar a equipe de manutenção (ou equipe médica) na elaboração de um planejamento mais eficaz da infraestrutura utilizada em uma telecirurgia, reduzindo a probabilidade de falhas que possam colocar em risco a vida dos pacientes.

1.1 Motivação e Justificativa

A telecirurgia representa um avanço significativo na prática cirúrgica ao permitir que cirurgiões realizem procedimentos a partir de locais geograficamente distantes dos pacientes. Apesar deste avanço, pouco se discute na literatura sobre seus desafios, principalmente no que tange à disponibilidade e à confiabilidade da comunicação entre o console cirurgião e o carrinho paciente.

Em geral, a avaliação de confiabilidade e disponibilidade pode ser realizada de duas maneiras: por meio de medições no sistema real ou por meio do desenvolvimento de modelos estocásticos (MURATA, 1989). A primeira abordagem tende a ser menos utilizada, uma vez que implica na espera por eventual falha. Por exemplo, a avaliação da confiabilidade de um ambiente de telecirurgias por meio de medição poderia levar meses, ou até mesmo anos. Modelos estocásticos, por outro lado, são largamente usados para modelagem em várias áreas. Dentro da Tecnologia da Informação (TI), esses métodos já foram aplicados na avaliação de dependabilidade em: web services, computação em nuvem (camada de IaaS), mobile cloud computing, clusters virtuais, data centers, redes inteligentes, infraestruturas de redes, rejuvenescimento de software em sistemas VoIP, agendamento da ação de rejuvenescimento software em ambientes de computação em nuvem, entre outros (ARAUJO, 2017).

Ao utilizar modelos de Redes de Petri Estocásticas para o cálculo da disponibilidade e confiabilidade de um ambiente de telecirurgia, esta pesquisa representa uma contribuição significativa que vai além do meio acadêmico. A comunidade clínica, por exemplo, se beneficia por essa pesquisa proporcionar uma compreensão mais aprofundada da operacionalidade e da confiabilidade dos sistemas de telecirurgia. Essa abordagem não apenas enriquece o conhecimento teórico, mas também facilita a implementação prática,

promovendo avanços significativos na eficácia e segurança dos procedimentos cirúrgicos remotos. Dessa forma, a pesquisa auxilia o desenvolvimento e aprimoramento contínuo da telecirurgia, contribuindo tanto para o avanço científico quanto para a prática clínica.

Como a pesquisa é fundamentada na necessidade de investigar e abordar questões cruciais relacionadas à confiabilidade e à disponibilidade em ambientes de telecirurgia, o seu propósito essencial desta pesquisa é contribuir de maneira significativa para o progresso contínuo da prática cirúrgica, visando não apenas a eficácia dos procedimentos, sobretudo o aprimoramento substancial da segurança dos pacientes envolvidos.

Ao concentrar nosso foco nas dimensões críticas de confiabilidade, empenhamo-nos em aprofundar nossa compreensão e abordar possíveis vulnerabilidades que possam impactar negativamente a realização bem-sucedida de uma telecirurgia. Essa abordagem visa não apenas identificar os desafios inerentes à confiabilidade na telecirurgia, assegurando assim uma execução mais segura e confiável de uma telecirurgia.

Além disso, ao apresentar dados da disponibilidade, este trabalho se torna crucial para que estratégias possam ser desenvolvidas assegurando a continuidade operacional dos sistemas de telecirurgia, considerando fatores como redundância, escalabilidade e prontidão para lidar com contingências imprevistas. A otimização da disponibilidade desses sistemas é vital não apenas para a eficiência dos procedimentos, mas também (e principalmente) para garantir que os profissionais de saúde possam contar com ferramentas confiáveis em todas as circunstâncias.

Dessa forma, este estudo é importante além do âmbito da pesquisa acadêmica, contribuindo diretamente para o avanço da telecirurgia e, conseqüentemente, para a qualidade e segurança dos cuidados médicos proporcionados aos pacientes.

1.2 Trabalhos Relacionados

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos relacionados a esta pesquisa e que fazem análises relacionadas aos ambientes de telecirurgia.

Em (ZHANG; LIU; ZHAO, 2018), são detalhadas as características de um sistema telecirúrgico robótico, bem como os elementos restritivos associados a esses sistemas. Além disso, são delineados os requisitos de qualidade de serviço (QoS) para o desempenho da rede, abrangendo latência, *jitter* (variação do atraso na entrega de pacotes de rede) e

perda de pacotes. O estudo ressalta que o alto custo de comunicação, juntamente com a alta latência e a falta de garantia da conectividade em uma rede pública de Internet, são as principais razões pela qual a telecirurgia ainda não é amplamente adotada. Entre os desafios para aumentar a utilização da telecirurgia, destaca-se a necessidade de transmitir dados sensoriais (visual, auditivo e tátil) entre o console do cirurgião e o carrinho do paciente, bem como a importância de uma conexão com baixa latência e alta confiabilidade, juntamente com a segurança e privacidade dos dados transmitidos. Por fim, os autores defendem que a implementação da tecnologia 5G tem o potencial de solucionar grande parte dos problemas associados à conectividade.

No estudo de (LUM et al., 2009), é apresentada uma análise sobre o efeito do tempo de atraso no desempenho das habilidades cirúrgicas ao usar um sistema de cirurgia robótica em modo de teleoperação. A conclusão do estudo destaca que a latência associada à compressão/descompressão de áudio/vídeo (a/v) é consideravelmente maior do que a latência vinculada à transmissão de comandos de posição entre o console do cirurgião e o carrinho do paciente. Adicionalmente, os resultados dos experimentos indicam uma degradação no desempenho da telecirurgia à medida que o tempo de atraso aumenta.

Em (BOABANG et al., 2021), é discutida a importância crítica de possuir uma conexão confiável com latência extremamente baixa em um ambiente de telecirurgia. O estudo propõe um método para prever o conteúdo de mensagens atrasadas ou perdidas utilizando o GPR (*Gaussian Process Regression*). São apresentadas duas versões do kernel do método de fatoração de matrizes esparsas e de baixo ranqueamento sequencial (1-SRLSMF e SRLSMF) para dimensionar o GPR. Os resultados demonstram que a estrutura proposta tem a capacidade de superar as abordagens de última geração em termos de desempenho na generalização de dados táteis.

Em (LI et al., 2022) discutem a importância crescente das redes de telecomunicações, particularmente no contexto das redes 5G e além, para a produção moderna e a vida cotidiana. Destaca-se, para atender às altas exigências das indústrias e garantir eficiência e confiabilidade, ser essencial implementar a Virtualização de Funções de Rede (NFV) tanto na Rede de Acesso Rádio (RAN) quanto na Rede Principal (CN). O estudo mencionado propõe um modelo baseado em redes de Petri para descrever as redes 5G, o qual pode ser útil para análises de disponibilidade de serviços de comunicação, estimativa

de confiabilidade de serviço e avaliação de resiliência de rede. Este modelo é apresentado como uma ferramenta valiosa para operadores na implementação de serviços 5G verticais.

Em (MESHARAM; PATIL, 2020), os autores projetam e analisam uma arquitetura de telecirurgia robótica com *feedback* tátil através de simulações e medições da qualidade dos serviços pelos parâmetros de desempenho da rede. Eles ainda apresentam uma comparação dos principais indicadores de desempenho 4G e 5G. Como resultado desse estudo se conclui que na operação de telecirurgia tradicional, o *jitter* dos sistemas 4G é maior que o sistema 5G, de modo que o *jitter* dos sistemas de telecirurgia 5G é reduzido em 92% em comparação com os sistemas 4G. Além disso, na rede do sistema 5G a taxa de transferência é aumentada em aproximadamente 108% em comparação com o sistema 4G e o sistema 5G de Internet com *feedback* tátil deve ser considerado para minimizar o atraso em 62% em comparação com o sistema 4G.

Como é possível observar, os trabalhos citados dão enfoque no desempenho da comunicação de rede dos equipamentos utilizados na telecirurgia. Nesta dissertação, fazemos uma análise de 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, consideramos aqui os *links* WiFi, 4G e 5G para comunicação dos equipamentos utilizados na telecirurgia. Com essa análise, nós podemos obter, por exemplo, a disponibilidade e 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.

A Tabela I resume os trabalhos relacionados a esta dissertação que foram mencionados neste capítulo, estabelecendo uma comparação entre eles e a dissertação com relação a quatro temas: telecirurgia, atributos de dependabilidade, modelos analíticos e análise 5G. Como pode ser observado, nosso trabalho é pioneiro na abordagem, abrangente e integrada, desses temas contribuindo, de forma relevante, para o avanço nesta área de pesquisa.

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados.

Autores	Telecirurgia	Modelos Analíticos	Atributos de depend.	Análise 5G
(ZHANG; LIU; ZHAO) (2018)	Sim	Não	Não	Sim
LUM et al. (2009)	Sim	Não	Não	Não
BOABANG et al. (2021)	Sim	Não	Não	Não
LI et al. (2022)	Não	Redes de Petri	Disponibilidade	Sim
(MESHRAM; PATIL) (2020)	Sim	Não	Não	Sim
Esta dissertação	Sim	Redes de Petri	Disponibilidade, Confiabilidade	Sim

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é modelar e analisar um ambiente de telecirurgia utilizando modelos estocásticos para calcular a disponibilidade, o tempo de inatividade e a confiabilidade. Com os resultados apresentados neste trabalho a equipe de manutenção ou a equipe médica pode realizar o planejamento adequado da infraestrutura para telecirurgias, evitando interrupções ou gargalos que possam colocar em risco a vida dos pacientes.

Para atingir os propósitos deste estudo, os objetivos específicos são:

- **Definição de uma Metodologia:** estabelecer uma metodologia abrangente de apoio que descreva as atividades necessárias para a definição e análise adequada dos modelos desenvolvidos. Essa metodologia proporcionará uma abordagem coerente para a execução e interpretação dos resultados obtidos;
- **Criação de Modelos para Avaliação da Disponibilidade, Inatividade e Confiabilidade do Ambiente de Telecirurgia:** desenvolver modelos analíticos que permitam uma avaliação precisa dos níveis de disponibilidade, inatividade e confiabilidade no contexto da telecirurgia. Esses modelos serão fundamentados em Redes de Petri Estocásticas, proporcionando uma base robusta para a análise quantitativa do ambiente cirúrgico remoto;
- **Criação de Modelos de Entrega de Mensagens para o Ambiente de Telecirurgia:** elaborar modelos específicos para a entrega de mensagens no ambiente de telecirurgia, com foco na identificação da probabilidade de entrega através de dife-

rentes tipos de redes de comunicação. Esses modelos visam aperfeiçoar a eficiência da comunicação entre o console do cirurgião e o carrinho do paciente;

- **Análise dos Diferentes Cenários:** conduzir uma análise abrangente dos mais variados cenários, que incluem diferentes tipos de redes de comunicação e locais para a realização das cirurgias, com o objetivo de avaliar sua adequação para a execução satisfatória de procedimentos de telecirurgia. Além disso, propor as melhores opções para cada contexto, visando melhorar a qualidade e segurança dos procedimentos.

1.4 Estrutura da Dissertação

Nesta seção, apresentaremos a estrutura deste trabalho, que se divide em cinco capítulos, os quais serão brevemente destacados nesta seção.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica para uma compreensão básica dos temas abordados. A explanação engloba conceitos essenciais relacionados à telecirurgia, redes de Petri, dependabilidade e redes 5G.

O Capítulo 3 aborda a metodologia adotada neste trabalho. Esta metodologia compreende 5 etapas e proporciona uma estrutura lógica para a análise das infraestruturas de telecirurgia e permite identificar possíveis ajustes e melhorias ao longo do processo.

O Capítulo 4 descreve os dois estudos de caso conduzidos neste trabalho, e seus respectivos resultados. O primeiro estudo envolve uma análise de um ambiente de telecirurgia em que os equipamentos estão interconectados por meio de *links* 4G e WiFi e as cirurgias são realizadas em um mesmo hospital e em hospitais diferentes. No segundo estudo de caso, examinamos um ambiente de telecirurgia em que os equipamentos são interligados através de uma conexão 5G e as cirurgias são realizadas em um mesmo hospital e em hospitais diferentes. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho, assim como as principais contribuições e, posteriormente, são apresentadas propostas para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo consiste em apresentar e discutir os principais conceitos, teorias, modelos e estudos que embasam o tema em estudo. A explanação engloba conceitos essenciais relacionados à telecirurgia, dependabilidade, redes de Petri e redes 5G.

2.1 Telecirurgia

Nos últimos anos, a Medicina tem sido palco de notáveis avanços, impulsionados pela constante busca por inovação e eficiência no campo cirúrgico. Nesse cenário, a telecirurgia surge como um procedimento de vanguarda, representando uma síntese engenhosa entre os mais recentes avanços tecnológicos e as práticas cirúrgicas contemporâneas. Esta seção busca explorar essa revolucionária modalidade de intervenção médica, delineando seu impacto na prática cirúrgica, seus fundamentos tecnológicos e as implicações que oferece para a medicina do século XXI.

A telecirurgia surge como uma inovação na área da Medicina, representando uma união entre avanços tecnológicos e práticas cirúrgicas. Essa modalidade de intervenção cirúrgica, caracterizada por permitir a realização de procedimentos à distância por meio de tecnologias de comunicação de alta velocidade, vem redefinindo os limites da medicina contemporânea. A telecirurgia, ao unir a destreza dos profissionais de saúde com a eficiência das redes de comunicação, ultrapassa barreiras geográficas, viabilizando intervenções precisas e oportunas independentemente da localização do paciente ou do cirurgião.

Segundo (MATOS, 2017), 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 (MATOS, 2017). Em 2000, o robô da Vinci foi aprovado pelo FDA (*Food and Drug Administration*) para a sua utilização em cirurgia laparoscópica. Nesse mesmo ano, em Paris, foi realizada a primeira prostatectomia radical pelo robô e, desde então, vem aumentando exponencialmente o número de cirurgias realizadas por robôs no mundo (MATOS, 2017).

O sistema da Vinci, produzido pela empresa Intuitive Surgical, apresenta seu modelo mais recente, o da Vinci XI, composto por três partes: o console cirurgião, o carrinho de visão e o carrinho do paciente (INTUITIVE, b). O console permite ao cirurgião controlar os instrumentos e oferece visualização endoscópica, crucial em procedimentos minimamente invasivos. Até o ano de 2022, foram realizadas mais de 12 milhões de cirurgias, com mais de 7500 unidades do robô da Vinci espalhados por 70 países. De acordo com o site Portal da Vinci (Portal DaVinci, 2024), o Brasil possui 106 robôs Da Vinci ativos em janeiro de 2024, com mais de 120 mil procedimentos realizados.

A Figura 11 apresenta os três equipamentos que compõem o robô cirurgião da Vinci. O console cirurgião, equipamento que é utilizado pelo cirurgião e controla o movimento dos instrumentos utilizados na cirurgia do paciente. Além do controle de movimento, o console cirúrgico possibilita uma visualização endoscópica, proporcionando ao cirurgião uma perspectiva detalhada do interior do corpo do paciente. Isso é particularmente valioso em procedimentos minimamente invasivos, onde a visão direta é limitada. A capacidade de visualizar a anatomia interna em tempo real auxilia o cirurgião na tomada de decisões informadas e na execução precisa da intervenção. O carrinho do paciente é projetado para acomodar e operar os quatro braços robóticos utilizados durante a cirurgia. Esses braços robóticos são extremamente flexíveis e precisos, permitindo ao cirurgião realizar movimentos intrincados. Cada braço é equipado com instrumentos cirúrgicos especializados, proporcionando ao cirurgião uma gama diversificada de ferramentas para diferentes etapas do procedimento. O carrinho visão abriga equipamentos de processamento de vídeo e imagem destinados a alimentar informações visuais provenientes do endoscópio e das principais unidades de processamento eletrônico. Esses componentes são essenciais para capturar imagens de alta resolução da região cirúrgica, proporcionando uma visão detalhada e ampliada do campo de trabalho. Além disso, o software incorporado no carrinho de visão desempenha um papel vital na coordenação e sincronização eficientes de todos esses componentes, garantindo uma integração harmoniosa e um desempenho otimizado durante todo o procedimento cirúrgico (INTUITIVE, a).

¹ Fonte: Disponível em: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/x>, acesso em: 17/01/2024



Figura 1 – Robô Da Vinci, composto por: Console cirurgião, carrinho do paciente e o carrinho visão.



Figura 2 – Cirurgia realizada com o sistema Da Vinci.

A Figura 2² exibe o ambiente completo do sistema da Vinci, desenvolvido pela empresa Intuitive. No ambiente cirúrgico, o médico utiliza o console cirúrgico para conduzir operações em um paciente localizado em outra sala, por meio dos carrinhos do paciente e de visão (INTUITIVE, b).

² Fonte: Disponível em: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/x> , acesso em: 17/01/2024

2.1.1 Vantagens e desvantagens da cirurgia robótica

Segundo (MATOS, 2017), entre as principais vantagens da cirurgia robótica citam-se:

- **Proporciona ao paciente um menor tempo de permanência no hospital:** A abordagem robótica demonstra a capacidade de reduzir o tempo de permanência do paciente no ambiente hospitalar devido a precisão das incisões e a perda menor de sangue. Essa eficiência é crucial não apenas para otimizar a utilização dos recursos hospitalares, mas também para promover uma recuperação mais rápida e confortável para o paciente;
- **Proporciona uma perda menor de sangue se comparada à cirurgia convencional:** A cirurgia robótica oferece uma vantagem considerável ao minimizar a perda de sangue durante os procedimentos, quando comparada à cirurgia convencional. Isso não apenas contribui para a segurança do paciente, reduzindo os riscos associados à perda sanguínea, mas também facilita a recuperação pós-operatória;
- **Proporcionar uma precisão excepcional na realização das incisões cirúrgicas:** O controle refinado e a estabilidade proporcionados pelos sistemas robóticos permitem ao cirurgião realizar intervenções altamente precisas, resultando em menor trauma aos tecidos circundantes e, conseqüentemente, em uma recuperação mais rápida e menos dolorosa para o paciente;
- **Proporciona ao paciente um menor tempo de permanência no hospital:** A abordagem robótica demonstra a capacidade de reduzir o tempo de permanência do paciente no ambiente hospitalar devido a precisão das incisões e a perda menor de sangue. Essa eficiência é crucial não apenas para otimizar a utilização dos recursos hospitalares, mas também para promover uma recuperação mais rápida e confortável para o paciente;
- **Permitir a um especialista operar um paciente mesmo estando em um local geograficamente distante** - Isso abre novas possibilidades para a colaboração entre especialistas e a prestação de cuidados cirúrgicos de alta qualidade, independentemente das barreiras geográficas.

Tabela 2 – Comparação entre a cirurgia robótica e a convencional.

Espec.	Procedimento	Tipo	Perda Sangue	Internação	Cortes
Urologia	Extração radical da próstata	Robótica	150 ml	1 a 2 dias	1 a 3 cm
		Convencional	700 ml	3 a 4 dias	15 cm
Ginecologia	Extração do útero	Robótica	100 ml	2 dias	1 a 3 cm
		Convencional	300 ml	5 a 5 dias	10 cm
Cardiologia	Ponte de safena e mamária	Robótica	200 ml	3 a 4 dias	1 cm
		Convencional	400 ml	10 dias	20 cm
Gastro.	Retirada Tumor no figado	Robótica	250 ml	4 a 5 dias	1 a 5 cm
		Convencional	750 ml	10 dias	30 cm

A Tabela 2 apresenta um comparativo entre a cirurgia robótica e a convencional. Podemos perceber que as vantagens de uma telecirurgia vão além do fato de médico e paciente estarem em lugares geograficamente diferentes. Quando a cirurgia é realizada por um robô, a perda de sangue e o tempo de internação são menores se compararmos à mesma cirurgia realizada sem o uso do robô.

Porém, o uso desse tipo de cirurgia também possui algumas desvantagens. Segundo (MATOS, 2017), entre as principais desvantagens da cirurgia robótica, é possível citar:

- **A implementação de sistemas robóticos, como o da Vinci, implica em custos substanciais** - O investimento inicial na aquisição do equipamento é expressivo, com o modelo mais recente chegando a custar aproximadamente 1,5 milhão de euros. Além disso, há a consideração adicional dos custos anuais de manutenção, que giram em torno de 150 mil euros. Essa considerável despesa pode ser um obstáculo financeiro para instituições médicas e sistemas de saúde, limitando a adoção generalizada dessa tecnologia;
- **Necessidade de uma equipe altamente treinada e especializada** - Profissionais de saúde, incluindo cirurgiões e técnicos, precisam passar por treinamento extensivo para dominar as complexidades do sistema da Vinci e realizar procedimentos cirúrgicos com competência. Essa exigência de especialização pode aumentar a carga de trabalho dos profissionais e demandar investimentos adicionais em programas de treinamento contínuo.

Na Tabela 3 são apresentados alguns requisitos na comunicação de dados para realização de uma telecirurgia (ZHANG; LIU; ZHAO, 2018). A taxa de transmissão,

Tabela 3 – Requisitos mínimos de rede para realização de uma telecirurgia.

	Tipo	Latência	Jitter	Perda	Transmissão
Multimídia	Câmera 2D	<150 ms	3-30 ms	$<10^{-3}$	<10 Mbps
	Câmera 3D	<150 ms	3-30ms	$<10^{-3}$	137 Mbps - 1,6Gbps
	Audio	<150 ms	<30 ms	$<10^{-2}$	22 - 200 Kbps
Sinais Vitais	Temperatura	<250 ms	-	$<10^{-3}$	<10 Kbps
	Pressão arterial	<250 ms	-	$<10^{-3}$	<10 Kbps
	Frequência cardíaca	<250 ms	-	$<10^{-3}$	<10 Kbps
	Taxa de respiração	<250 ms	-	$<10^{-3}$	<10 Kbps
	ECG	<250 ms	-	$<10^{-3}$	<10 Kbps
	EEG	<250 ms	-	$<10^{-3}$	72 kbps
	EMG	<250 ms	-	$<10^{-3}$	1,536 Mbps
Feedback tátil	Força	3 - 10 ms	<2 ms	$<10^{-4}$	128 - 400 Kbps
	Vibração	<5,5 ms	<2 ms	$<10^{-4}$	128 - 400 Kbps

destacada como um requisito central na tabela, representa a latência com que os dados são transmitidos entre os dispositivos conectados. Em procedimentos de telecirurgia, onde a comunicação em tempo real é vital, uma taxa de transmissão adequada é essencial para garantir a sincronização precisa dos movimentos do dispositivo cirúrgico remoto com as ações do cirurgião. A exigência de uma transmissão de dados eficiente ressalta a importância de redes de alta velocidade e largura de banda adequada para sustentar as demandas complexas dessa aplicação médica avançada. A latência, representando o tempo que um pacote de dados leva para percorrer a distância entre os pontos de origem e destino em uma rede, é um parâmetro crítico na telecirurgia. Uma baixa latência é crucial para assegurar que as informações visuais e táteis transmitidas do local remoto para o console do cirurgião sejam recebidas em tempo real, evitando atrasos perceptíveis. A minimização da latência é essencial para garantir a precisão e a segurança durante os procedimentos cirúrgicos à distância, proporcionando uma experiência virtual que se equipare à execução direta de intervenções cirúrgicas.

Outro desafio a ser considerado é a latência nas redes de comunicação, que pode impactar a sincronização entre as ações do cirurgião e as respostas do sistema robótico. Este trabalho, mais especificamente, foca na disponibilidade, confiabilidade e a probabilidade de entrega de mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente do ambiente de telecirurgia. Além disso, a disponibilidade e confiabilidade da infraestrutura são imprescindíveis para garantir a segurança e o sucesso da telecirurgia. Esses aspectos

tos são de particular relevância, pois determina a eficácia e segurança dos procedimentos realizados à distância (NAVARRO; ÁLVAREZ; ANGUIANO, 2022).

Em resumo, a telecirurgia, embora promissora, demanda uma atenção criteriosa a vários fatores. Elevada disponibilidade, baixa latência e a confiabilidade do ambiente são elementos interconectados que devem ser abordados com cuidado para garantir avanços seguros nesse campo inovador da prática cirúrgica.

2.2 Dependabilidade

A análise de sistemas computacionais consiste de um agrupamento de métodos categorizados em dois tipos principais: aqueles que se fundamentam em medições e aqueles que se baseiam em modelagem, sendo este último o enfoque adotado neste trabalho. As técnicas baseadas em modelagem podem ser classificadas como técnicas analíticas e técnicas baseadas em simulação (LILJA, 2005). A utilização de técnicas de modelagem possibilita a obtenção de informações valiosas acerca da estrutura e do comportamento dinâmico do sistema, proporcionando, dessa forma, suporte para a análise de dependabilidade. No entanto, distintos graus de abstração podem ser empregados na modelagem dos sistemas. Cada um desses níveis é mais apropriado para a solução de um problema específico (JAIN, 1991), sendo crucial a seleção do que melhor se adéqua à natureza do problema em pauta.

A dependabilidade é frequentemente dividida nos seguintes atributos (AVIZIENIS; LAPRIE; RANDELL, 2001):

- **Disponibilidade:** capacidade de fornecer serviços de forma instantânea;
- **Confiabilidade:** capacidade de fornecer serviços de forma contínua;
- **Segurança:** capacidade do sistema de operar sem causar danos inaceitáveis a pessoas, ao ambiente ou ao próprio sistema;
- **Integridade:** ausência de alterações indesejadas nos sistemas;
- **Manutenabilidade:** facilidade com que um sistema pode ser reparado ou modificado.

Alguns sistemas computacionais permitem a modelagem e descrição de seu comportamento, utilizando, por exemplo, Diagramas de Bloco de Confiabilidade (*Reliability block diagram* - RBD), Grafo de Alcançabilidade (*Reliability graph* - RG), Cadeias de Markov (*Markov chain*), Redes de Petri Estocásticas (*Stochastic Petri net* - SPN) ou outras. Dentre as várias ferramentas existentes para modelagem de sistemas, destacam-se: Sharpe, Block-Sim, TimeNet, Asto Tool, GreatSPN, SPNP e Mercury (CAMBOIM, 2012).

A dependabilidade refere-se à capacidade de um sistema desempenhar suas funções de forma consistente, previsível e confiável ao longo do tempo, mesmo em situações adversas (AVIZIENIS; LAPRIE; RANDELL, 2001). A análise de dependabilidade aborda a investigação dos efeitos de erros, defeitos e falhas em um sistema, uma vez que esses eventos podem ter um impacto adverso nos atributos de dependabilidade. Uma falha é caracterizada como o colapso de um componente, subsistema ou sistema que interage com o sistema em consideração (MACIEL et al., 2012). Um erro se refere a um estado que pode eventualmente resultar em uma falha. Já um defeito indica uma desordem no funcionamento adequado do sistema.

A dependabilidade de um sistema computacional pode ser afetada pela ocorrência de eventos de falhas, erros e defeitos, que são eventos que tentam impedir o correto funcionamento de um sistema em função de uma sucessão de eventos indesejáveis. Neste sentido, técnicas para prevenção a falhas, tolerância a faltas, remoção de faltas e prevenção a faltas devem ser utilizadas para atingir a dependabilidade.

A Figura 3 apresenta a árvore de dependabilidade, onde são apresentados os meios para o alcance da dependabilidade, desenvolvidos através de técnicas específicas (AVIZIENIS; LAPRIE; RANDELL, 2001).

- **As ameaças:** Incluem defeitos, erros e falhas. Um defeito pode ser definido como a falha de um componente do sistema. A falha do sistema ocorre quando a entrega do serviço não ocorre conforme o esperado. Os erros são estados incorretos do sistema que ocorrem quando um defeito é ativado. Identificar e compreender essas ameaças é crucial para mitigar riscos e fortalecer a dependabilidade dos sistemas.
- **Os atributos:** Estes proporcionam medidas quantitativas essenciais para a análise dos serviços oferecidos. A capacidade de quantificar elementos como confiabilidade,

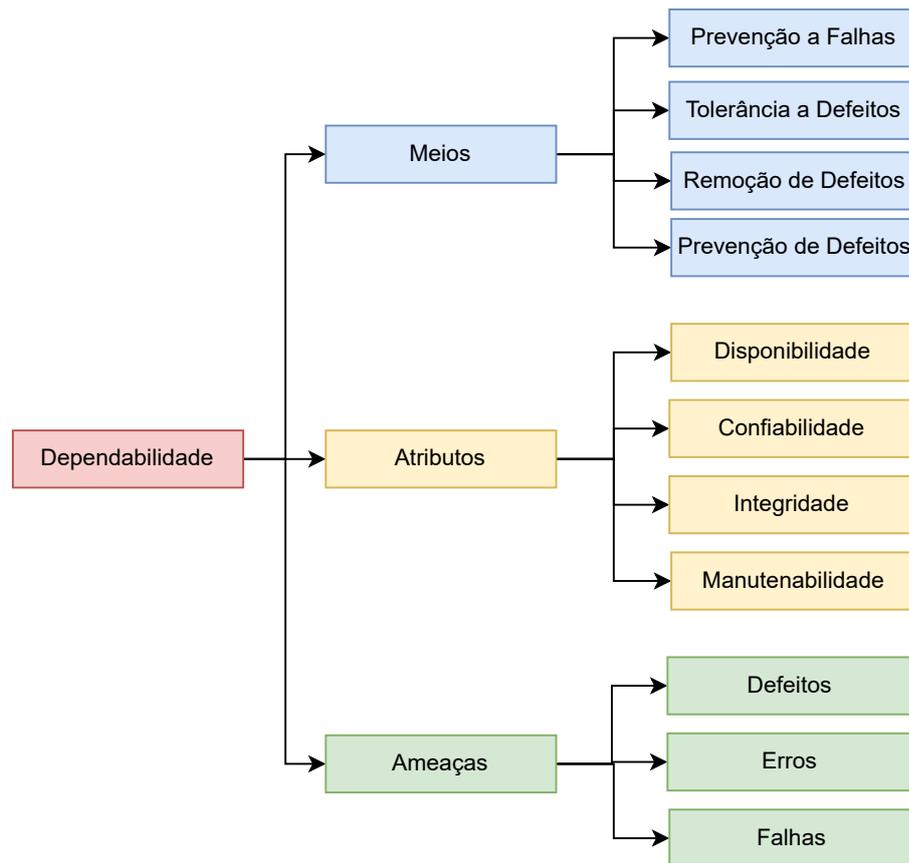


Figura 3 – Árvore de dependabilidade - Adaptado de (LAPRIE, 1992).

disponibilidade e desempenho é vital para avaliar e melhorar continuamente a eficácia do sistema;

- **Os meios:** Referem-se aos métodos e estratégias empregados para atingir a dependabilidade. Estes meios abrangem práticas como redundância, monitoramento contínuo, correção proativa e outros processos que visam assegurar o funcionamento confiável dos sistemas.

Compreender a árvore de dependabilidade, suas ameaças, atributos e meios associados é fundamental para o desenvolvimento e manutenção de sistemas e serviços altamente confiáveis em diversas áreas, desde tecnologia da informação até setores críticos como saúde e segurança. Neste trabalho, mais especificamente, concentramo-nos na previsão de falhas através do cálculo da disponibilidade e confiabilidade, visando evitar o impacto das falhas no ambiente de telecirurgia.

A análise de dependabilidade compreende a utilização de índices como: tempo médio de falha (*Men Time to Failure*(MTTF)) e o tempo médio de reparo (*Men Time to Repair*(MTTR)) (PAULO et al., 2011).

- O conceito de MTTF é essencial na avaliação da confiabilidade de um sistema. O MTTF refere-se ao tempo médio que decorre entre as ocorrências de falhas em um sistema. É uma métrica crítica para compreender a estabilidade e a durabilidade de um sistema, contribuindo significativamente para a análise de sua confiabilidade. Pode ser representado pela equação [2.1](#), onde $R(t)$ é a confiabilidade desse sistema em função do tempo decorrido:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.1)$$

- O conceito do MTTR é fundamental na avaliação do desempenho operacional de sistemas, especialmente quando se trata da disponibilidade contínua desses sistemas. O MTTR refere-se ao tempo médio durante o qual um sistema fica indisponível devido a atividades de manutenção ou reparo. Esta métrica é crucial para entender a eficiência dos processos de manutenção, bem como para otimizar a disponibilidade e o tempo de operação de um sistema. Pode ser representado pela equação [2.2](#):

$$MTTR = MTTF \times \frac{UA}{A} \quad (2.2)$$

Onde UA representa o tempo de inatividade do sistema e A representa a disponibilidade do sistema.

- O MTBF é uma métrica crucial na avaliação da confiabilidade de um sistema. Essa medida representa o intervalo médio de tempo decorrido entre as ocorrências de defeitos ou falhas em um sistema específico. O MTBF desempenha um papel vital no entendimento da estabilidade operacional de um sistema, sendo uma métrica amplamente utilizada em diversas áreas, desde eletrônica até indústrias críticas. Pode ser representado pela equação [2.3](#):

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (2.3)$$

Esses índices têm um papel crucial ao tentar mensurar o impacto das deficiências e dos procedimentos de reparo, além de serem essenciais para adquirir métricas como a disponibilidade e o tempo de inatividade.

De acordo com [Souza \(2013\)](#), para se computar métricas de dependabilidade com modelos SPN, podem ser utilizadas análise ou simulação. A análise envolve a aplicação

de métodos matemáticos e algoritmos para calcular diretamente as métricas de dependabilidade a partir do modelo SPN. Já a simulação, é uma técnica que envolve a criação de um modelo computacional baseado no modelo SPN e o uso de métodos estatísticos para estimar métricas de dependabilidade. Em ambos existem técnicas estacionárias e transientes, onde:

- **Análise transiente:** A análise transiente permite a observação de mudanças e evoluções em métricas críticas durante fases específicas do processo ou operação de um sistema. Ao considerar a dinâmica temporal, os engenheiros e analistas ganham informações valiosas sobre o desempenho, a estabilidade e a eficiência de um sistema em momentos distintos;
- **Análise estacionária:** A análise estacionária é uma abordagem fundamental na teoria de sistemas dinâmicos, fornecendo uma compreensão profunda da distribuição de probabilidades estacionárias do sistema. Quando um sistema atinge o equilíbrio, a análise estacionária nos permite determinar a fração do tempo que o sistema permanece em cada um dos seus estados possíveis;
- **Simulação:** possibilita a capacidade de extrair informações de um modelo, onde muitas vezes é um único método. Vale ressaltar, que isto ocorre, por exemplo, quando o espaço de estados de uma rede é muito grande para ser estudado analiticamente.

É importante salientar que este trabalho se concentrará nas análises transientes e estacionárias. Além disso, conforme mencionado anteriormente, o foco deste trabalho será especificamente em dois atributos fundamentais da dependabilidade: disponibilidade e confiabilidade, os quais serão detalhados a seguir.

2.2.1 Disponibilidade

Uma simples definição de disponibilidade pode ser basicamente descrita como uma porcentagem de tempo em que o sistema está ativo (MACIEL et al., 2012).

A avaliação da disponibilidade é uma etapa crucial na análise de sistemas, levando em conta tanto os eventos que podem levar à falha quanto os esforços de manutenção necessários para restaurar o sistema ao seu funcionamento correto. A disponibilidade

de um sistema é determinada pela capacidade de estar operacional quando necessário, garantindo que os usuários tenham acesso contínuo e confiável aos serviços oferecidos. Através de uma análise criteriosa, é possível tomar medidas proativas para garantir a disponibilidade contínua do sistema, minimizando interrupções e fornecendo um serviço confiável.

Para medir a disponibilidade de um sistema, são utilizadas métricas como o MTBF e o MTTR . A equação para o cálculo da disponibilidade pode ser escrita por uma função do MTTF e do MTTR, conforme equação apresentada a seguir:

$$A = \frac{MTBF}{MTTF + MTTR}$$

2.2.2 Confiabilidade

A confiabilidade é um componente crítico da dependabilidade de sistemas. Ela se refere à capacidade de um sistema de manter suas funções de forma consistente ao longo do tempo e sob diferentes condições operacionais. Um sistema confiável é aquele que demonstra uma baixa taxa de falhas e é capaz de resistir às condições adversas ou avarias.

De acordo com (ANDRADE et al., 2019), podemos definir a confiabilidade de um sistema como sendo a capacidade de entregar uma funcionalidade específica que pode ser justificadamente confiável. Para qualquer tempo determinado pelo intervalo $(0, t)$. A função de confiabilidade de um sistema pode ser expressa pela seguinte equação:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

onde $R(t)$ é a probabilidade de o sistema operar sem falhas até o tempo t , e é a base do logaritmo natural, λ é a taxa de falha constante do sistema, e t é o tempo de operação considerado.

Para avaliar a confiabilidade de um sistema, utilizam-se diversas métricas, como a taxa de falha, a taxa de falha cumulativa e a probabilidade de falha ao longo do tempo. A taxa de falha indica a frequência com que um sistema apresenta falhas em um determinado período. A taxa de falha cumulativa representa o número total de falhas ocorridas ao longo do tempo. Já a probabilidade de falha ao longo do tempo quantifica a chance de um sistema falhar em um ponto específico no tempo.

2.3 Redes de Petri

Segundo Petri (1962), podemos definir redes de Petri como sendo uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática que pode ser aplicada em vários tipos de sistemas e permite a modelagem de sistemas paralelos, concorrentes, assíncronos e não determinísticos. Elas foram introduzidas em 1962 por Carl Adams Petri, da Universidade Técnica de Darmstadt, na Alemanha. Foi desenvolvida inicialmente como uma abordagem para modelar e analisar os sistemas de comunicação.

As redes de Petri possibilitam a representação e análise de sistemas de eventos discretos que são demasiadamente complexos para serem descritos por autômatos ou modelos de filas (REISIG, 2012). A utilidade das redes de Petri como uma ferramenta para a investigação de sistemas é significativa, uma vez que, além de permitir a representação matemática e a análise dos modelos, também pode oferecer informações valiosas sobre a estrutura e o comportamento dinâmico dos sistemas modelados (MURATA, 1989).

Atualmente, é possível identificar diferentes versões que se originaram do modelo inicial. Essas variantes são aplicadas em variados setores, como sistemas de manufatura, desenvolvimento de software, sistemas administrativos, entre outros, com o propósito de contribuir para a análise do comportamento e desempenho de distintos sistemas.

De acordo com (MURATA, 1989), 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;
- $W : F \rightarrow IR + \cup_0$ é a função de atribuição de peso aos arcos;
- $\mu_o : P \rightarrow IN$ é a função de marcação inicial, onde $P \cap T = \emptyset$ e $P \cup T \neq \emptyset$.

A Figura 4 apresenta os principais elementos de uma Rede de Petri. Estes elementos são formados por: *lugares*, que são representados por círculos e que simbolizam os estados possíveis de um sistema; *transições*, que são representadas por barras e simbolizam as ações realizadas pelo sistema; *arcos*, que são representados por setas e simbolizam o fluxo de *tokens*, que indicam o estado atual do modelo, pela rede; e *arco inibidor*, que

inibe o disparo da transição quando o lugar de entrada possui *tokens*. Ainda destacamos as expressões de guarda, as quais são utilizadas para habilitar ou não o disparo de uma transição.

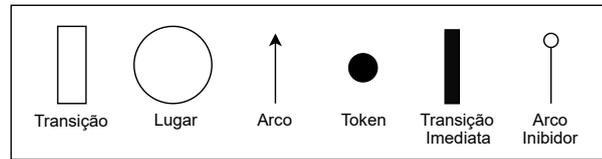


Figura 4 – Elementos de uma Rede de Petri.

A Figura 5 representa o ciclo repetitivo dos períodos do dia por meio de um modelo de rede de Petri. Um dia é dividido em três períodos distintos: manhã, tarde e noite. As transições entre esses períodos devem obedecer a algumas condições, como a manhã precedendo a tarde, a tarde precedendo a noite, e assim por diante. Dessa forma, pré-condições e pós-condições podem ser estabelecidas (MACIEL; LINS; CUNHA, 1996).

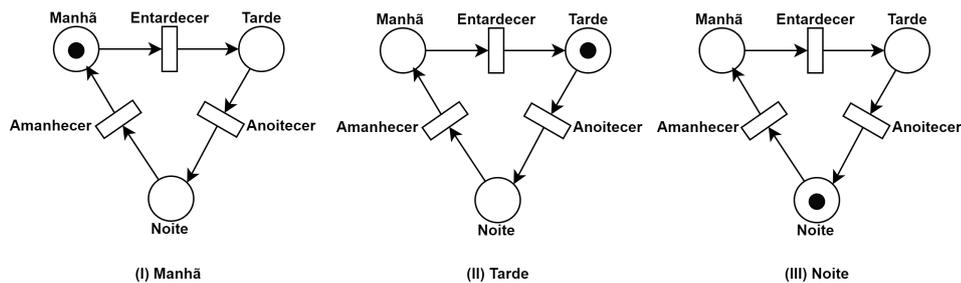


Figura 5 – Redes de Petri - Períodos do Dia.

Para modelar esse sistema usando uma rede de Petri, foram criados três lugares, representando os três períodos do dia, e três transições, representando as mudanças entre esses períodos. O estado inicial do modelo é marcado com um token no lugar “Manhã”. Com essa marcação, o único evento possível é o entardecer, representado pela transição “entardecer”. Após a execução desse evento, é adicionado um token no lugar “Tarde”. Com um token no lugar “Tarde”, o próximo evento é o anoitecer, representado pela transição “anoitecer”. A execução desse evento adiciona um token ao lugar “Noite”. Um token no lugar “Noite” possibilita a ocorrência do evento amanhecer, representado pela transição “amanhecer”. A execução desse evento reinicia o processo.

Nas Redes de Petri, existe ainda o conceito das funções de guarda. A importância das funções de guarda reside na capacidade de introduzir condições específicas que devem ser atendidas para que uma transição seja considerada viável em um determinado contexto.

Essas expressões lógicas podem incorporar variáveis, estados ou eventos específicos da rede, proporcionando uma maneira flexível e precisa de modelar as restrições que regem a evolução do sistema.

Ao avaliar se uma transição está ou não habilitada com base nas funções de guarda, as redes de Petri tornam-se poderosas ferramentas para representar e analisar sistemas dinâmicos, permitindo uma modelagem mais sofisticada e precisa do comportamento do sistema em diferentes condições. Dessa forma, as funções de guarda emergem como elementos importantes no fluxo das transições em redes de Petri, contribuindo significativamente para a compreensão e aprimoramento dos sistemas modelados.

Todavia, os primeiros modelos de redes de Petri não incorporavam qualquer conceito de tempo devido à influência que o tempo pode exercer sobre o comportamento. Posteriormente, surgiram algumas extensões hierárquicas que introduziram a dimensão temporal no formalismo de Petri. Diversas extensões foram desenvolvidas para proporcionar uma representação gráfica conveniente e de fácil compreensão para o usuário, incluindo as Redes de Petri Temporizadas (TPN), Redes de Petri Coloridas (CPN), Redes de Petri Estocásticas (SPN) e Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN). Grupos de pesquisa em todo o mundo têm explorado as Redes de Petri como objeto de estudo, dedicando-se ao desenvolvimento de pesquisas sobre seus fundamentos teóricos e suas aplicações (REISIG, 2012).

Para a modelagem do ambiente de telecirurgia, optamos pela aplicação de redes de Petri estocásticas devido às suas inúmeras vantagens, especialmente pela habilidade de integrar elementos de aleatoriedade e incerteza.

2.3.1 Redes de Petri Estocásticas

Nesta Subseção iremos apresentar as redes de Petri Estocásticas. Veremos como as transições em uma SPN são associadas a distribuições de probabilidade, e como isso enriquece a capacidade de representar cenários complexos e dinâmicos.

Segundo (Marranghello (2005)), 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. Nas SPNs, foi adicionado tanto o conceito de tempo, quanto as transições imediatas (que disparam com tempo zero) ao formalismo das redes de Petri (CUNHA et al., 2021). Segundo (TRIVEDI et al., 1996),

os modelos em SPN permitem calcular as mais diversas métricas. Um exemplo de tais métricas é a disponibilidade, que é a probabilidade do sistema estar funcionando em um determinado ponto no tempo.

Uma SPN é definida pela 9-tupla $SPN = \{P; T; I; O; H; \Pi; G; M_0; Atts\}$ (CAM-BOIM, 2012), onde:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ é o conjunto de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ é o conjunto de transições imediatas e temporizadas, $P \cap T = \emptyset$;
- $I \in (N^n \rightarrow N)^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos de entrada (que podem ser dependentes de marcações).
- $O \in (N^n \rightarrow N)^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos de saída (que podem depender das marcações).
- $H \in (N^n \rightarrow N)^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos de saída (que podem ser dependentes de marcações).
- $\Pi \in \mathbb{N}^m$ é um vetor que associa o nível de prioridade a cada transição;
- $G \in (N^n \rightarrow \{\text{true}; \text{false}\})^m$ é o vetor que associa uma condição de guarda relacionada à marcação do lugar a cada transição;
- $M_0 \in \mathbb{N}^n$ é o vetor que associa uma marcação inicial a cada lugar (estado inicial);
- $Atts = (Dist; Markdep; Policy; Concurrency; W)^m$ compreende o conjunto de atributos associados às transições, onde:
 - $Dist \in \mathbb{N}^m \rightarrow \mathbb{F}$ é uma possível função de distribuição de probabilidade associada ao tempo de uma transição (esta distribuição pode ser dependente de marcação) (o domínio de F é $[0, \infty)$);
 - $Markdep \in \{\text{constante}; \text{enabdep}\}$, onde a distribuição de probabilidade associada ao tempo de uma transição pode ser independente (constante) ou dependente de marcação (enabdep - a distribuição depende da condição de habilitação atual);

- *Policy* $\in \{prd; prs\}$ define a política de memória adotada pela transição (prd - preemptive repeat different, valor padrão, de significado idêntico à race enabling policy; prs - preemptive resume, corresponde ao age memory policy);
- *Concurrency* $\in \{ss, is\}$ é o grau de concorrência das transições, onde ss representa a semântica single server e is representa a semântica infinity server.
- $W : T \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ é a função peso, que representa o peso (w_t) de transições imediatas e a taxa λ_t de transições temporizadas, onde:

$$\pi(t) = \begin{cases} \geq 0; & \text{se caso contrário. } t \text{ é uma transição imediata;} \\ 1; & \text{se } t \text{ é uma transição temporizada.} \end{cases}$$

Se t for uma transição temporizada, então λ_t será o valor do parâmetro da função densidade probabilidade exponencial. Se t for uma transição imediata, então W_t será um peso, que é usado para o cálculo das probabilidades de disparo das transições imediatas em conflitos. Os arcos inibidores são usados para prevenir transições de serem habilitadas quando certa condição é verdadeira.

Em redes de Petri estocásticas, as transições podem ser classificadas como imediatas ou temporizadas. As transições temporizadas caracterizam-se por tempos associados, distribuídos de acordo com uma distribuição exponencial. Já as transições imediatas têm um tempo associado igual a zero. Nesse caso, o período de habilitação coincide com o tempo de execução da atividade, e o disparo ocorre no término da atividade. Além disso, é possível atribuir diferentes níveis de prioridade às transições. As transições imediatas têm prioridade de disparo mais alta em comparação com as transições temporizadas. As probabilidades de disparo associadas às transições imediatas podem resolver situações de conflito (CAMBOIM, 2012).

Nesse trabalho, 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, tempo de inatividade, confiabilidade e probabilidade de entrega de mensagens. A vantagem oferecida para uso de modelos estocásticos está na possibilidade de adicionar valores para determinados parâmetros de entrada, a fim de obter valores de saída. Além disso, há ainda a simplicidade oferecida por ferramentas de interface amigável para modelagem de sistemas, como por exemplo, a ferramenta Mercury (Modcs Research Group,).

Apesar da existência de diversos formalismos, como redes de filas, cadeias de Markov e máquinas de estados finitos, optamos pelas redes de Petri estocásticas para modelar um ambiente de telecirurgia devido a uma série de vantagens específicas. Essas incluem a capacidade dessas redes em representar de maneira eficaz dinâmicas concorrentes, integrar elementos estocásticos no modelo para lidar com incertezas e variações nos tempos de execução, possibilitar a análise detalhada de desempenho e disponibilidade do sistema, oferecer uma representação gráfica intuitiva que facilita a visualização e compreensão do modelo, contar com ferramentas específicas e disponíveis para a simulação e análise, além de possuir um histórico comprovado de aplicações bem-sucedidas em sistemas análogos. Essas características tornam as redes de Petri estocásticas uma opção robusta e eficiente para abordar a complexidade inerente aos ambientes de telecirurgia (BAUSE; KRITZINGER, 2002).

2.4 Redes 5G

O 5G representa uma evolução significativa em relação às gerações anteriores de tecnologia móvel. Ao contrário do seu predecessor, o 4G, o 5G não se limita apenas a aumentar a taxa de transferência de *download*, ele introduz uma série de recursos que podem ser essenciais para a realização de uma telecirurgia. Na estrutura abrangente da arquitetura 5G, identificam-se componentes cruciais que desempenham papéis distintos e interligados. Entre esses elementos destacam-se a virtualização de funções de rede, as redes definidas por software e o conceito de fatiamento de rede (OLIVEIRA; ALENCAR; LOPES, 2018).

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 (WEN et al., 2021). 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 (BOAVA; MAILER; KRAUS, 2021). Por uma questão de compatibilidade, tanto as redes públicas quanto as privadas são implementa-

das seguindo padrões definidos por entidades como o 3rd Generation Partnership Project (3GPP), uma organização que cuida do desenvolvimento de padrões de telecomunicações que colaboram para criar e manter as especificações técnicas para redes móveis 2G, 3G, 4G, LTE-Advanced e 5G (LIN, 2022). Mesmo seguindo os padrões do 3GPP, pode existir uma incompatibilidade entre as redes devido a características adicionais e utilização de diferentes modelos de equipamentos (BOAVA; MAILER; KRAUS, 2021).

A Virtualização de Funções de Rede (*Network Function Virtualization* - NFV) é uma abordagem composta por técnicas de virtualização que facilitam a substituição de funções de rede anteriormente executadas em hardware proprietário por instâncias virtualizadas executadas em servidores comerciais (*Commercial Off-The-Shelf* - COTS). Essa estratégia visa minimizar tanto os investimentos em bens de capital (*Capital Expenditure* - CAPEX), por meio da consolidação e ganho de escala, quanto as despesas operacionais (*Operational Expenditure* - OPEX), mediante a redução de consumo, espaço físico e custos associados. Além disso, a abordagem proporciona vantagens na manutenção, ao empregar uma plataforma física única. O processo de orquestração da NFV simplifica procedimentos complexos, como a ativação de novos serviços, tornando-os automatizados e de baixa complexidade. Isso ocorre porque a instalação de hardware pode ser substituída por uma simples instalação de software, equivalente à criação de uma ou mais funções de rede virtuais.

Redes Definidas por Software (*Software Defined Networks* - SDN) introduzem um novo paradigma na concepção da arquitetura de rede, abrangendo o projeto, construção e gerenciamento, ao desvincular as camadas de controle e encaminhamento de dados. Essa separação viabiliza a centralização das funções de controle em entidades únicas, conhecidas como controladores SDN, permitindo a automação da configuração e do provisionamento de toda a rede, sem depender de limitações específicas de hardware. O controlador SDN proporciona uma camada de abstração que oculta características específicas da infraestrutura, conferindo maior flexibilidade na administração da rede, independentemente da tecnologia empregada (OLIVEIRA; ALENCAR; LOPES, 2018).

O fatiamento de rede, também conhecido como *network slicing*, é um recurso inovador do 5G, sendo fundamental para modelos de negócio *Network as a Service* (NaaS). Essa técnica envolve a divisão da infraestrutura física de rede em partes lógicas chamadas de “*slices*”, proporcionando acesso diferenciado para cada tipo de dispositivo. Por exem-

plo, serviços que necessitam de comunicação em tempo real, como telecirurgias, podem utilizar uma fatia/slice com maior prioridade e Qualidade de Serviço (QoS), enquanto aqueles que não dependem de baixa latência para suas aplicações podem optar por uma fatia/slice de menor prioridade, e conseqüentemente, menor custo (FOUKAS et al., 2017).

A infraestrutura central das redes 5G, conhecida como “*5G Core Network*”, desempenha um papel de destaque nesse ecossistema. Ela representa uma evolução substancial em relação às gerações de redes móveis anteriores, como o 3G e o 4G, tendo sido cuidadosamente projetada para atender às crescentes demandas de uma ampla variedade de novos serviços e aplicativos. Essas demandas incluem requisitos cruciais, como altas taxas de transmissão de dados, baixa latência e maior eficiência energética (PARVEZ et al., 2018).

De acordo com (OLIVEIRA; ALENCAR; LOPES, 2018) os principais componentes da *5G Core Network* são:

- **SMF:** O *Session Management Function* (SMF) é encarregado de gerenciar a criação, modificação e terminação de sessões de dados no 5G Core. Ele também pode aplicar políticas de qualidade de serviço (QoS) para otimizar o tráfego de dados.
- **UPF:** O *User Plane Function* (UPF) é responsável pelo encaminhamento e roteamento do tráfego de dados. Ela também executa funções como a comutação de pacotes e aplicação de políticas de QoS.
- **PCF:** O *Policy Control Function* (PCF) controla as políticas de QoS e serviços na rede 5G. Ele determina as condições de acesso, limites de taxa de transferência e prioridades para diferentes tipos de tráfego.
- **UDM:** O *Unified Data Management* (UDM) é responsável pela gestão de dados de assinantes e perfis de usuários. Ele autentica os dispositivos e fornece informações de identidade..
- **AUSF:** O *Authentication Server Function* (AUSF) é responsável pela autenticação de usuários e dispositivos na rede 5G. Ele verifica as credenciais e fornece os tokens de autenticação necessários.
- **NEF:** O *Network Exposure Function* (NEF) permite a exposição de informações e serviços da rede para aplicativos externos e desenvolvedores de terceiros. Isso facilita a criação de novos serviços e aplicações na plataforma 5G.

- **NRF**: O *Network Repository Function* (NRF) é um repositório de funções de rede (NFs) e suas informações de registro. Ele auxilia na descoberta de funções de rede disponíveis na rede.
- **AMF**: O *Access and Mobility Management Function* (AMF) é responsável pelo gerenciamento de mobilidade, autenticação e autorização dos dispositivos na rede 5G. Ele controla a configuração da conexão e gerencia as alterações na mobilidade do dispositivo.
- **AF**: O *Application Function* (AF) refere-se a uma função que está envolvida no gerenciamento de políticas e na aplicação de funções específicas para serviços e aplicações na rede.

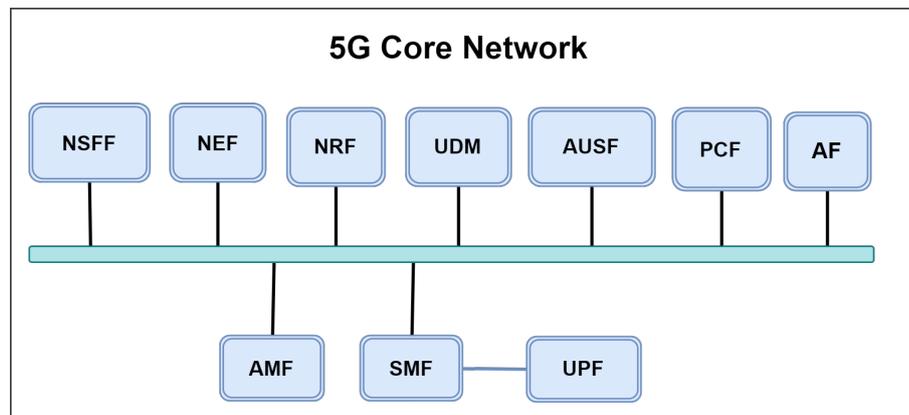


Figura 6 – 5G Core Network.

A Figura 7 apresenta um exemplo da arquitetura 5G, enfatizando seus componentes principais. Esta estrutura é parcialmente inspirada no trabalho de (SIRIWARDHANA et al., 2021). A arquitetura detalhada revela como a rede 5G suporta diversas aplicações.

Entre as aplicações destacadas, encontra-se a telecirurgia, que exemplifica o aproveitamento da alta velocidade e baixa latência da rede 5G para realizar procedimentos cirúrgicos à distância, permitindo cirurgias realizadas em tempo real. Além disso, a arquitetura evidencia a conexão de clientes 5G, incluindo dispositivos como computadores, *smartphones e tablets*, demonstrando a acessibilidade da tecnologia para o usuário final.

Outro ponto de destaque são os Novos Serviços/Aplicações, mostrando a capacidade da rede 5G de suportar uma ampla gama de serviços. Isso inclui a criação de redes virtuais personalizadas sobre uma única infraestrutura física para satisfazer necessidades específicas, tais como Internet das Coisas (IoT), comunicações ultraconfiáveis e de

baixa latência (URLLC) e banda larga móvel aprimorada (eMBB) para aplicações que demandam grande volume de dados.

Além disso, a arquitetura conta com a 5G Core Network, que incorpora diversos elementos essenciais para a gestão e fornecimento de conectividade. Isso inclui funções de acesso e suporte de mobilidade (AMF), funções de gerenciamento de sessão (SMF), entre outras necessárias para o manejo de dados e a operacionalização da rede.

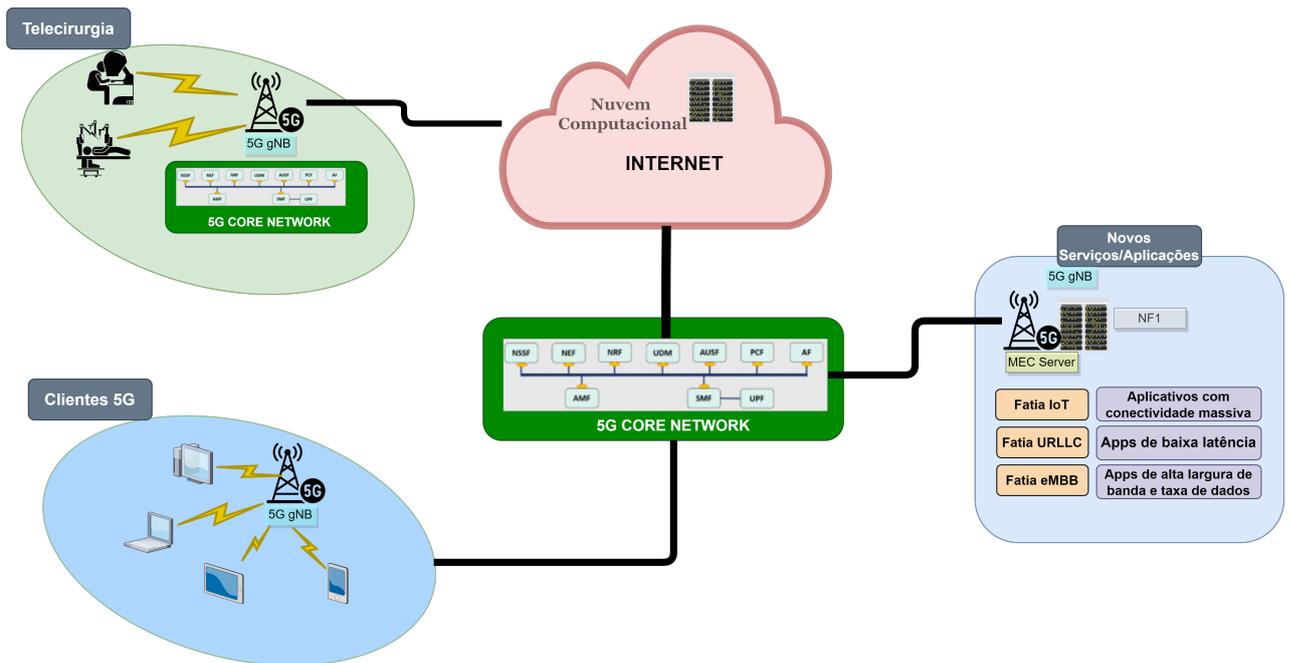


Figura 7 – Arquitetura da Rede 5G.

A Tabela 4 apresenta uma comparação de desempenho entre o 4G e o 5G, de acordo com (BARB; OTESTEANU, 2020). Nela podemos observar parâmetros importantes, a saber: Latência e taxa de dados por usuário, que nos auxiliam a compreender a evolução da rede do 4G para o 5G e que são extremamente importantes para o ambiente de telecirurgia. Como vimos na Seção 2.1, uma baixa latência é essencial para proporcionar ao cirurgião remoto o controle preciso e em tempo real dos instrumentos cirúrgicos, bem como para manter a comunicação eficaz com a equipe cirúrgica no local.

Tabela 4 – Comparação entre o 4G e 5G

Requisitos principais	4G	5G
Taxa de dados máxima	1Gbit/s	20Gbit/s
Taxa de dados pelo usuário	10 Mbit/s	100 Mbit/s
Mobilidade	350 Km/h	500 Km/h
Latência	10 ms	<1 ms
Densidade de conexão	10^5 dispositivos/Km	10^6 dispositivos/Km
Capacidade de tráfego de área	0,1 Mbit/s/m ²	10 Mbit/s/m ²

2.5 Considerações finais

Neste capítulo apresentamos a fundamentação teórica, que consiste em uma visão abrangente e substancial dos principais conceitos, teorias e estudos relacionados ao tema desta pesquisa. Através dessa revisão, estabelecemos uma base sólida de conhecimento que sustenta o estudo em questão.

É importante ressaltar que a fundamentação teórica apresentada neste capítulo é uma etapa inicial e fundamental para o desenvolvimento da pesquisa. Ela estabelece as bases conceituais, teóricas e empíricas necessárias para a compreensão do tema em estudo, servindo como ponto de partida para as etapas subsequentes da pesquisa.

3 Metodologia

Neste capítulo apresentamos a abordagem metodológica adotada para a avaliação do ambiente de telecirurgia. A escolha e implementação de uma metodologia são essenciais para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados alcançados (CRESWELL, 2014).

A avaliação de um ambiente de telecirurgia é uma tarefa complexa que requer uma abordagem metodológica bem definida. Neste trabalho, adotamos uma metodologia composta por quatro 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 8 apresenta as etapas propostas para a avaliação de um 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.

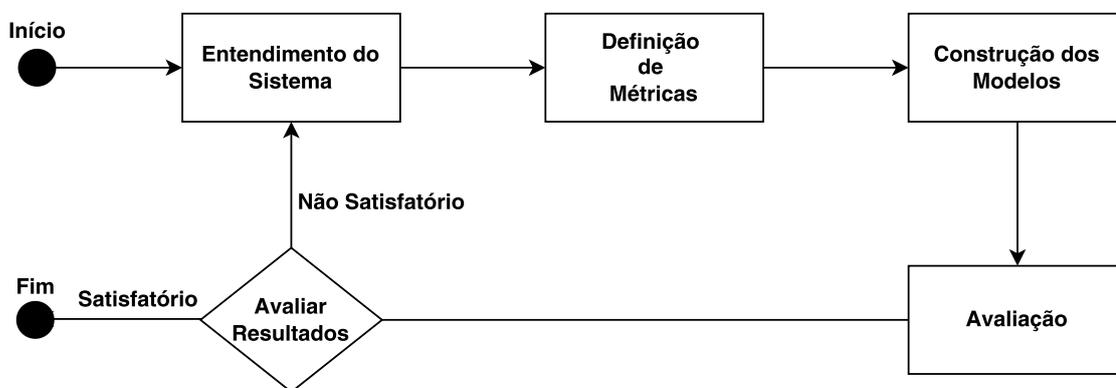


Figura 8 – Metodologia utilizada.

A primeira etapa da metodologia consiste no entendimento do sistema de telecirurgia. Nessa fase, é realizada uma revisão bibliográfica, além de uma análise detalhada dos componentes do sistema, incluindo os robôs cirúrgicos, os dispositivos de comunicação, etc. A compreensão do sistema requer grande atenção e cuidados especiais por parte do avaliador, para assim, evitar erros de interpretação e comprometimento das demais etapas

da metodologia. Essa etapa é essencial, pois possibilita tomar conhecimento das técnicas que poderão ser adotadas, adaptadas ou que terão que ser criadas.

Em seguida, na etapa de definição de métricas, é essencial identificar aquelas que serão coletadas, pois elas influenciam diretamente nos modelos e nas análises realizadas no ambiente de telecirurgia.

- **Disponibilidade:** Essa métrica desempenha um papel importante ao indicar não apenas a probabilidade de o sistema estar operacional e pronto para uso imediato, mas também sua prontidão para ser utilizado quando necessário. Em um contexto tão sensível e crucial como a telecirurgia, a disponibilidade torna-se um fator determinante na garantia de que o ambiente esteja sempre acessível sempre que necessário, minimizando qualquer potencial impacto adverso nas intervenções médicas.
- **Probabilidade de Entrega da Mensagem:** Esta métrica assume um papel importante na avaliação da confiabilidade da comunicação no ambiente de telecirurgia. Ela não apenas mensura a probabilidade de que uma mensagem seja entregue com sucesso, mas também considera a necessidade crítica de que essa entrega ocorra sem perdas ou atrasos. Ao assegurar uma alta probabilidade de entrega de mensagens, promove-se uma comunicação efetiva e em tempo real entre os diversos componentes do sistema, contribuindo para a eficiência e segurança dos procedimentos cirúrgicos remotos.
- **Confiabilidade:** A métrica de confiabilidade abrange a capacidade do sistema de operar de maneira consistente e previsível ao longo do tempo. Essa métrica desempenha um papel crítico na garantia de que o ambiente de telecirurgia seja não apenas funcional, mas também seguro. Ao manter uma operação consistente, a confiabilidade contribui significativamente para a prevenção de falhas inesperadas, assegurando um ambiente seguro e confiável para a realização de procedimentos médicos delicados e complexos.

A terceira etapa envolve a construção dos modelos sendo de suma importância, pois os modelos desenvolvidos permitirão uma simulação precisa e detalhada do comportamento dinâmico do ambiente. 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. É importante salientar que os resultados foram obtidos através de análises utilizando o software Mercury na versão 5.0.2 (SILVA et al., 2015). Quando o valor computado é satisfatório, o processo é finalizado, sendo reinicializado somente quando o sistema sofrer alguma modificação. No entanto, se ao menos uma métrica de interesse não alcançou um nível satisfatório, é imperativo retroceder para uma ou mais etapas anteriores, a fim de realizar ajustes e refinamentos nos modelos ou nas métricas utilizadas.

3.1 Considerações Finais

A metodologia apresentada neste capítulo estabelece as bases para conduzir a pesquisa proposta neste trabalho e serve como fundamento para análises subsequentes. Por meio dessa abordagem, é possível realizar uma exploração confiável do ambiente de telecirurgia, identificando áreas passíveis de melhorias. Este capítulo descreve o planejamento da avaliação e oferece detalhes replicáveis para outros pesquisadores interessados no mesmo domínio. A estrutura proporciona uma visão clara das etapas a serem seguidas, contribuindo para o avanço do conhecimento e o aprimoramento contínuo da telecirurgia.

4 Estudo de Caso

Este capítulo apresenta dois estudos de caso detalhados sobre a avaliação do ambiente de telecirurgia, aplicando a metodologia previamente apresentada. No estudo de caso 1, realizamos a análise do ambiente de telecirurgia considerando uma cirurgia realizada no mesmo hospital e em hospitais diferentes, utilizando os *links* 4G e WiFi para a comunicação dos equipamentos. É importante ressaltar que o termo WiFi aqui não se refere apenas à conexão sem fio, mas também engloba toda a infraestrutura óptica que suporta a comunicação WiFi. No estudo de caso 2, realizamos a análise do ambiente de telecirurgia considerando uma cirurgia realizada no mesmo hospital e em hospitais diferentes, utilizando o link 5G para a comunicação dos equipamentos.

4.1 Estudo de Caso 1 - WiFi × 4G

No primeiro estudo de caso, conduzimos uma análise de um ambiente de telecirurgia considerando procedimentos realizados tanto no mesmo hospital quanto em hospitais diferentes. Para tal avaliação, contemplamos as conexões 4G e WiFi para acesso à Internet, e conseqüentemente, para a intercomunicação dos equipamentos.

A realização de cirurgias remotas dentro do mesmo complexo hospitalar pode, por exemplo, apresentar vantagens específicas em termos de latência e confiabilidade na transmissão de dados, permitindo uma interação praticamente em tempo real entre o cirurgião e o ambiente cirúrgico. Neste estudo de caso, também é apresentada a arquitetura proposta para telecirurgias realizadas em hospitais distintos, além da discussão dos modelos utilizados para calcular as métricas adotadas e os resultados obtidos.

4.1.1 Arquitetura

A arquitetura do ambiente de telecirurgia abrange os robôs responsáveis pela cirurgia e os *links* responsáveis pela comunicação desses equipamentos. Nesta seção, apresentamos os elementos constituintes deste ambiente. Uma compreensão aprofundada desta arquitetura não só oferece uma visão abrangente das interações entre os elementos do sistema, mas também revela os desafios técnicos e operacionais inerentes à telecirurgia. Ao

esclarecer essa base tecnológica, nosso objetivo é facilitar a avaliação precisa do ambiente de telecirurgia.

A Figura 9 apresenta a arquitetura proposta para um ambiente de telecirurgia realizada em diferentes hospitais. Nessa arquitetura, constam os robôs que irão realizar a cirurgia, a nuvem computacional e os *links* 4G e WiFi para comunicação entre os equipamentos e foi parcialmente baseada em (ZHANG; LIU; ZHAO, 2018).

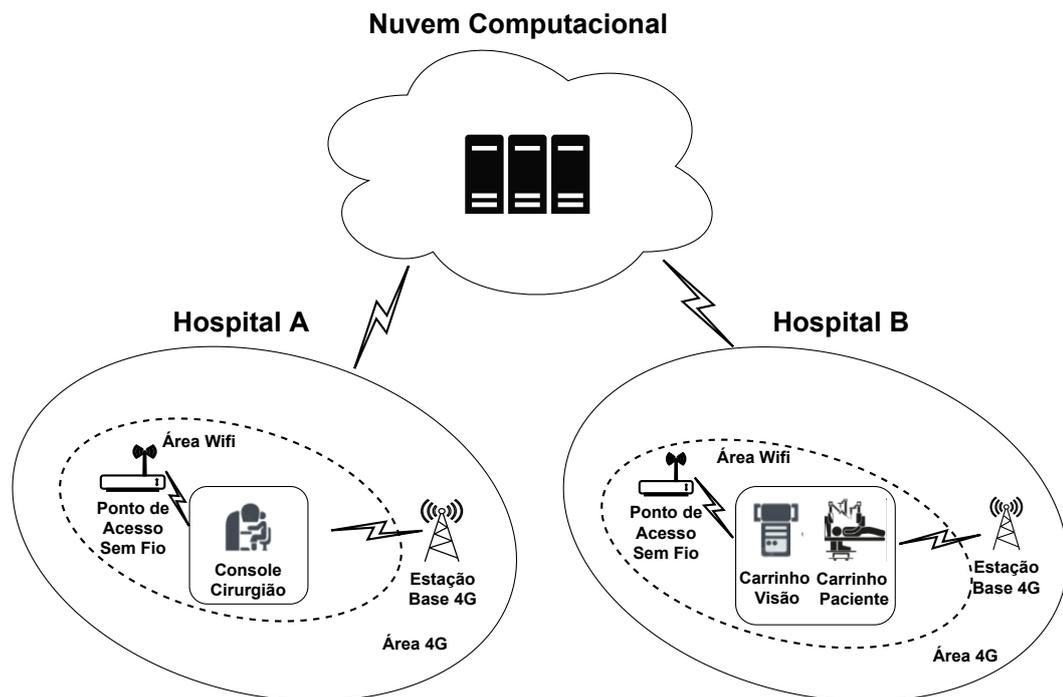


Figura 9 – Arquitetura de telecirurgia considerando os *links* WiFi e 4G.

Considerou-se um cenário no qual uma telecirurgia é realizada em diferentes hospitais. Significa dizer que o médico opera utilizando o console cirurgião no hospital 'A', enquanto o paciente se encontra no carrinho paciente e o carrinho de visão está no hospital 'B'. A nuvem computacional é a rota pela qual o tráfego flui entre os hospitais A e B e ainda abriga o prontuário eletrônico do paciente, pronto para ser consultado em caso de necessidade. Um aspecto crucial dessa arquitetura é a necessidade de uma comunicação sem falhas entre o carrinho do paciente e o console cirurgião durante o procedimento de telecirurgia. Para garantir isso, foi considerada a utilização de dois *links* de Internet, cada um com tecnologias distintas, um utilizando a rede 4G e o outro uma conexão WiFi, tanto no hospital A quanto no hospital B.

4.1.2 Modelos

A Figura 10 apresenta o modelo SPN proposto para representar o ambiente de telecirurgia descrito na Figura 9. Este é dividido em três partes distintas: *Nuvem Computacional*, *Hospital A* e *Hospital B*. Na parte dedicada à *Nuvem Computacional*, é exposto o modelo que representa a disponibilidade da nuvem computacional (Figura 10A). A nuvem está operacional quando um *token* se encontra no local *CL_on*. As transições *F_CL* e *R_CL* representam, respectivamente, o tempo médio de falha, isto é, o tempo que o componente possui até uma falha ocorrer e o tempo médio de reparo, ou seja, o tempo que o componente possui até que ele seja reparado.

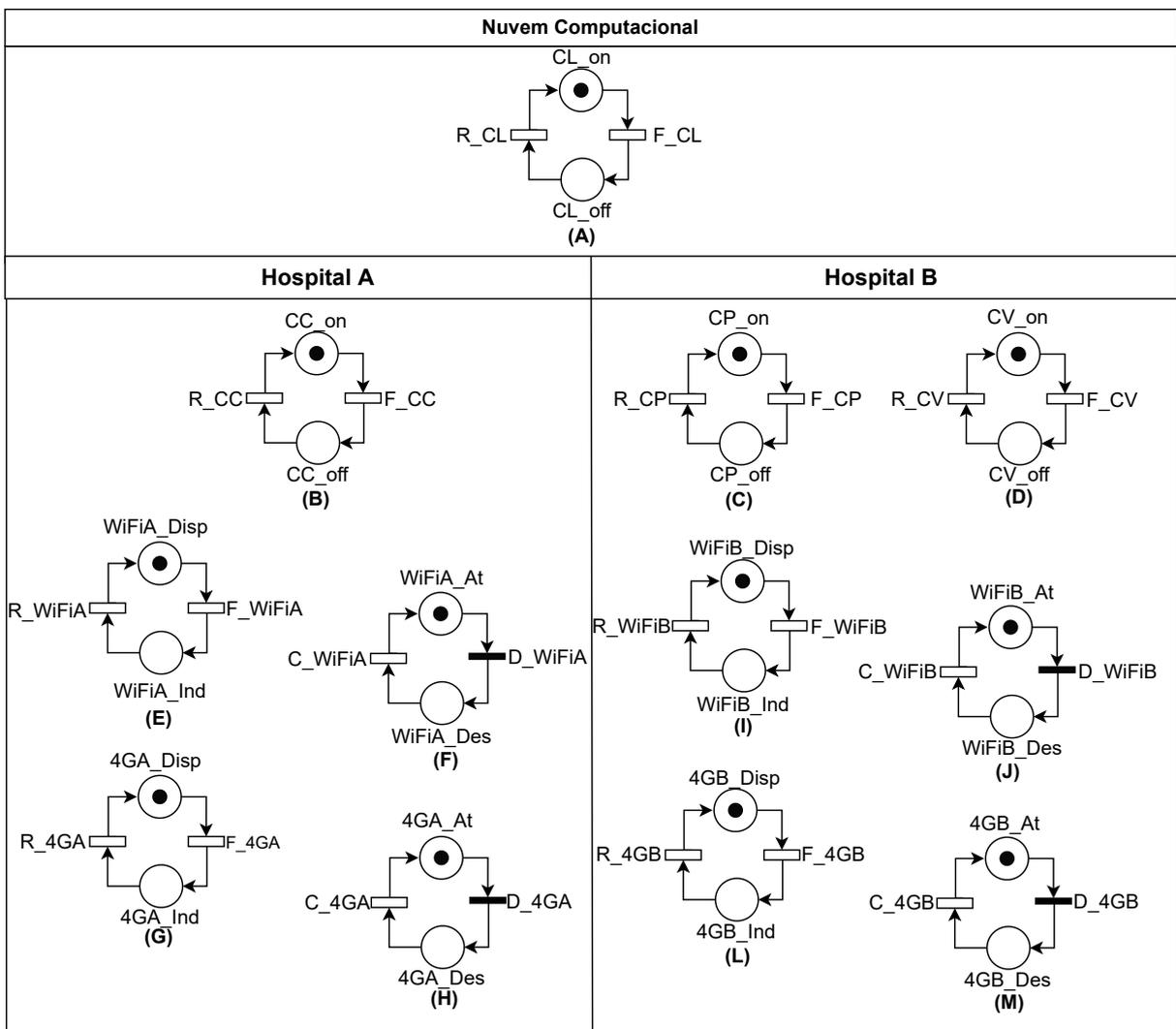


Figura 10 – Modelos de Rede de Petri de um ambiente de Telecirurgia.

No *Hospital A*, são apresentados os modelos que representam o console cirurgião (Figura 10B), a conexão e ativação da rede WiFi (Figuras 10E e F) e a conexão e ativação

Tabela 5 – Transições e funções de guarda.

Transição	Função de Guarda
C_4GA	$(\#WiFiA_Disp=0)AND(\#4GA_Disp=1)$
D_4GA	$(\#WiFi_Disp=1)AND(\#WiFi_At=1)OR(\#4GA_Disp=0)$
C_WiFiA	$(\#WiFiA_Disp=1)$
D_WiFiA	$(\#WiFiA_Ind=0)$

da rede 4G (Figuras 10G 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 (Figura 10E) e ativa (Figura 10F). Quando as transições *F_WiFiA* e *D_WiFiA* são disparadas, a conexão WiFi ficará indisponível (Figura 10E) e desconectada (Figura 10F). Já quando as transições *R_WiFiA* e *C_WiFiA* são disparadas, a conexão WiFi ficará disponível (Figura 10E) e ativa (Figura 10F). Note que a ativação e desativação da WiFi depende das funções de guarda definidas na Tabela 5.

O modelos das Figuras 10G 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 5.

No *Hospital B*, são apresentados os modelos que representam o carrinho do paciente (Figura 10C), o carrinho visão (Figura 10D), a conexão e ativação da rede WiFi (Figuras 10I e J) e a conexão e ativação da rede 4G (Figuras 10L e M). O comportamento desses modelos é semelhante ao apresentado anteriormente para o *Hospital A*. Além disso, a Tabela 5 apresenta as funções de guarda usadas para a ativação do 4G.

Devido ao nível de criticidade que ocorre numa 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.

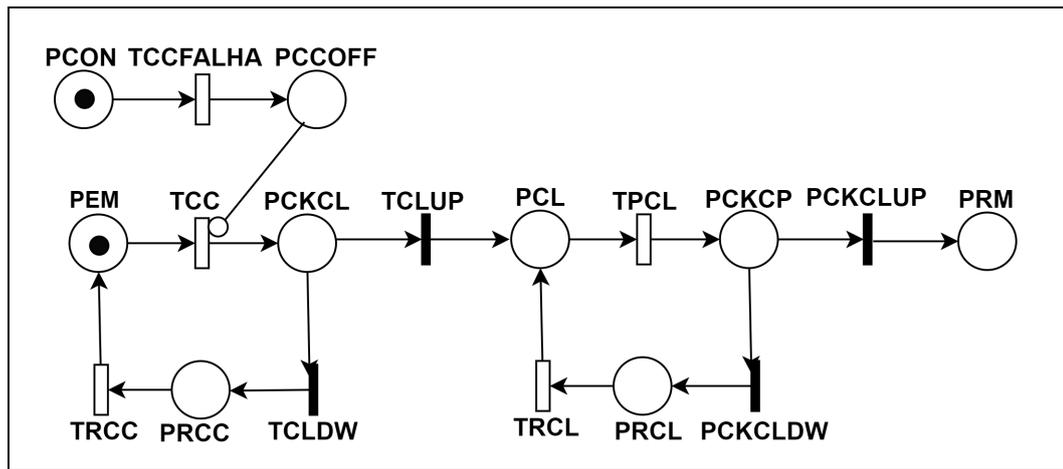


Figura 11 – Modelo SPN de envio mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente em hospitais diferentes.

É importante salientar que a Figura 10 apresenta os modelos que representam uma telecirurgia realizada em dois hospitais diferentes. Quando a telecirurgia é realizada em um mesmo hospital são utilizados os mesmos modelos, com exceção das Figuras 10(I e J) e a conexão e ativação da rede 4G Figuras 10(L e M).

A Figura 11 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 *PEM* representa uma mensagem que precisa ser entregue do console cirurgião até o carrinho do paciente, no lugar *PRM*. Um *token* no lugar *PCON* informa que o console cirurgião está operacional. Caso a transição *TCCFALHA* seja disparada, o *token* irá para o lugar *PCCOFF*. O arco inibidor que conecta o lugar *PCCOFF* à transição *TCC* garante que a transição *TCC* não será disparada caso não haja *token* no lugar *PCON*. Quando a transição *TCC* é disparada, o *token* é enviado para o lugar *PCKCL*, então uma condição será analisada. Se a transição *TCLUP* for disparada, a mensagem será enviada para a cloud (*PCL*). Por outro lado, se a transição *TCLDW* for disparada, significa que o envio falhou e, após um período de *timeout*(*TRCC*), a mensagem será enviada novamente. Quando a transição *TPCL* é disparada, um *token* é gerado no lugar *PCKCP*, significando que a mensagem está deixando a *nuvem computacional*. Com o disparo da transição *TPCL*, um *token* será gerado em *PCKCP* e, posteriormente, uma checagem do *carrinho do paciente* é realizado. Se ele estiver operacional, a (transição *PCKCLUP*) irá disparar e a mensagem será então entregue (*PRM*). Caso contrário, o *token* será retornado para o lugar *PRCL* 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 Figura 12 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 temos dois hospitais distintos. A diferença é que nesse caso não consideramos o componente da nuvem computacional.

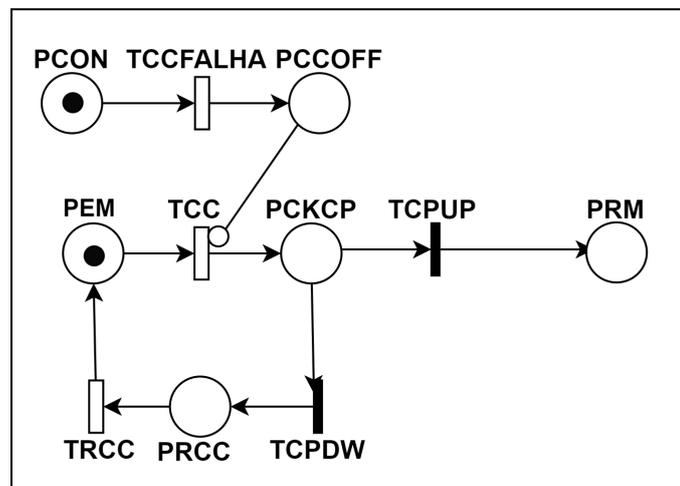


Figura 12 – Modelo SPN de envio de mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente no mesmo hospital.

4.1.3 Parâmetros de entrada

Para avaliar a disponibilidade, o tempo de inatividade e a confiabilidade do ambiente de telecirurgia, torna-se crucial considerar os tempos de falha e reparo dos seus componentes fundamentais. Nesta seção, dedicamo-nos à explanação detalhada desses parâmetros.

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros de entrada para análise do ambiente de telecirurgia. As transições e os valores adotados são explicitamente vinculadas a cada um desses parâmetros, oferecendo uma representação clara das interações dinâmicas no contexto da telecirurgia.

Os valores de MTTF e MTTR da nuvem computacional foram baseados no trabalho de (ANDRADE; NOGUEIRA, 2020). Os valores para Carrinho Paciente, Carrinho Visão

Tabela 6 – Descrição, transições e valores do ambiente de telecirurgia.

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

e Console Cirurgião foram definidos com base no manual dos equipamentos do robô da Vinci (INTUITIVE, a). Já os valores de ativação e desativação do WiFi e 4G foram baseados em (MACHIDA; ANDRADE, 2021). Na Tabela 7 são apresentadas as transições e os valores de referência para o envio da mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente. Os valores das transições $TCCFALHA$, TCC , $TRCC$, $TRCL$, e $TPCL$ estão em segundos e foram baseados em (ANDRADE et al., 2021) e (ARAUJO et al., 2014). Os valores das transições $TCLUP$ e $PCKCLUP$ são probabilidades e foram obtidos a partir dos modelos do ambiente de telecirurgia.

Tabela 7 – Componentes, transições e valores para o envio da mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente.

Componente	Transição	Valor(s)
Console Cirurgião	TCCFALHA	3.1558e+7
Envio Mensagem	TCC	0,0297
Timeout	TRCC, TRCL	0,00833
Disp.link x Disp.nuvem	TCLUP	0,99988
1-(Disp.link x Disp.nuvem)	TCLDW	0,00012
Envio Cloud	TPCL	0,3024
Disp.cp x Disp.nuvem	PCKCLUP	0,99954
1-(Disp.cp x Disp.nuvem)	PCKCLDW	0,00046

Tabela 8 – 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	$(1-(P\{(((\#WiFiA_Disp=1)AND(\#WiFiA_At=1))$ $OR((\#4GA_Disp=1) AND(\#4GA_At=1)))$ $AND(((\#WiFiB_Disp=1)AND(\#WiFiB_ativo=1))$ $OR((\#4GB_Disp=1)AND(\#4GB_At=1)))$ $AND(\#CL_on=1)AND(\#CC_on=1)AND$ $(\#CP_on=1)AND(\#CV_on=1)\})) * 8766$

4.1.4 Métricas

Esta seção se dedica à apresentação e explicação das métricas selecionadas, que servirão para a análise do ambiente de telecirurgia. Podemos definir as métricas como sendo notações usadas para representar cálculos matemáticos, onde basicamente dois tipos de cálculos podem ser realizados: a esperança matemática (ou simplesmente média) e a probabilidade. Nas funções que são apresentadas, o caractere especial "P" calcula a probabilidade de haver determinada quantidade de tokens em um lugar e o caractere "#" referencia o número de tokens em lugar na Rede de Petri.

Na Tabela 8 são apresentadas as funções utilizadas no Mercury para obter as estimativas de métricas de disponibilidade e tempo de inatividade dos equipamentos utilizados para realização de uma telecirurgia em hospitais diferentes. A disponibilidade é calculada levando em consideração que os componentes essenciais, como o carrinho da visão, o console cirurgião, o carrinho do paciente e a nuvem computacional, estejam em funcionamento. Além disso, é necessário que haja uma conexão ativa de WiFi ou 4G tanto no Hospital A quanto no Hospital B.

O cálculo da métrica do tempo de inatividade é bem parecida com o cálculo da disponibilidade, a diferença é que subtraímos 1 para obter a probabilidade de falha (indisponibilidade). Multiplicando pelo número de horas em um ano (8760), é obtido o tempo de inatividade em horas ao longo de um ano.

Na Tabela 9 são apresentadas as funções utilizadas no Mercury para obter as estimativas de métricas de disponibilidade e tempo de inatividade dos equipamentos utilizados para realização de uma telecirurgia em um mesmo hospital. As funções do cálculo dessas métricas é semelhante as funções apresentadas na Tabela 9, a diferença é que nesse caso é considerado apenas os *links* WiFi e 4g em apenas 1 hospital.

Tabela 9 – 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	$(1-(P\{(((\#WiFiA_disponivel=1)AND(\#WiFiA_ativo=1))OR((\#celA_disponivel=1)AND(\#celA_ativo=1)))AND(\#cloud_on=1)AND(\#SurgeonConsole_on=1)AND(\#PatientCart_on=1)AND(\#VisionCart_on=1))\}))*8766$

Na Tabela 10 são apresentadas as funções utilizadas no Mercury para obter as estimativas de métricas de confiabilidade dos equipamentos utilizados para realização de uma telecirurgia em hospitais diferentes. O cálculo da confiabilidade, ou seja, a probabilidade de falha, é obtido por meio de uma análise transiente, na qual ao menos um componente do ambiente de telecirurgia está indisponível.

Tabela 10 – Métricas e funções utilizadas para calcular a confiabilidade.

Métrica	Função
Conf WiFi	$P\{((\#SurgeonConsole_off=1)OR(\#PatientCart_off=1)OR(\#VisionCart_off=1)OR(\#cloud_off=1)OR(\#WiFiA_indisponivel=1)OR(\#WiFiB_indisponivel=1))\}$
Conf WiFi + 4G	$P\{((\#SurgeonConsole_off=1)OR(\#PatientCart_off=1)OR(\#VisionCart_off=1)OR(\#cloud_off=1)OR((\#WiFiA_indisponivel=1)AND(\#celA_indisponivel=1))OR((\#WiFiB_indisponivel=1)AND(\#celB_indisponivel=1)))\}$

4.1.5 Resultados

A Figura 13 apresenta os resultados da disponibilidade do ambiente de telecirurgia, considerando uma cirurgia realizada em um mesmo hospital e em hospitais diferentes utilizando somente WiFi, 4G e WiFi + 4G. Note que o termo WiFi aqui não se refere apenas à conexão sem fio, mas também engloba toda a infraestrutura óptica que suporta a comunicação WiFi. É possível observar que o melhor cenário, ou seja, o que apresenta maior disponibilidade, utiliza os *links* WiFi e 4G em uma cirurgia realizada em um mesmo hospital. A disponibilidade nesse caso ficou em 99,886%. Porém, a diferença foi mínima em relação à cirurgia realizada em hospitais diferentes. Isso se deve ao fato da utilização de *links* de comunicação redundantes. Já a que obteve o pior resultado de disponibilidade foi a cirurgia realizada em hospitais diferentes utilizando apenas a rede WiFi para comunicação entre os equipamentos, que alcançou 99,8523%. A cirurgia no mesmo hospital, por outro lado, alcançou uma melhor disponibilidade, chegando a 99,8857%. Esses resultados reforçam a premissa de que a redundância de *links* de comunicação desempenha um papel essencial na garantia da disponibilidade do ambiente de telecirurgia. Quando não for possível ter *links* redundantes é melhor que a telecirurgia seja realizada no mesmo hospital em que o paciente se encontra.

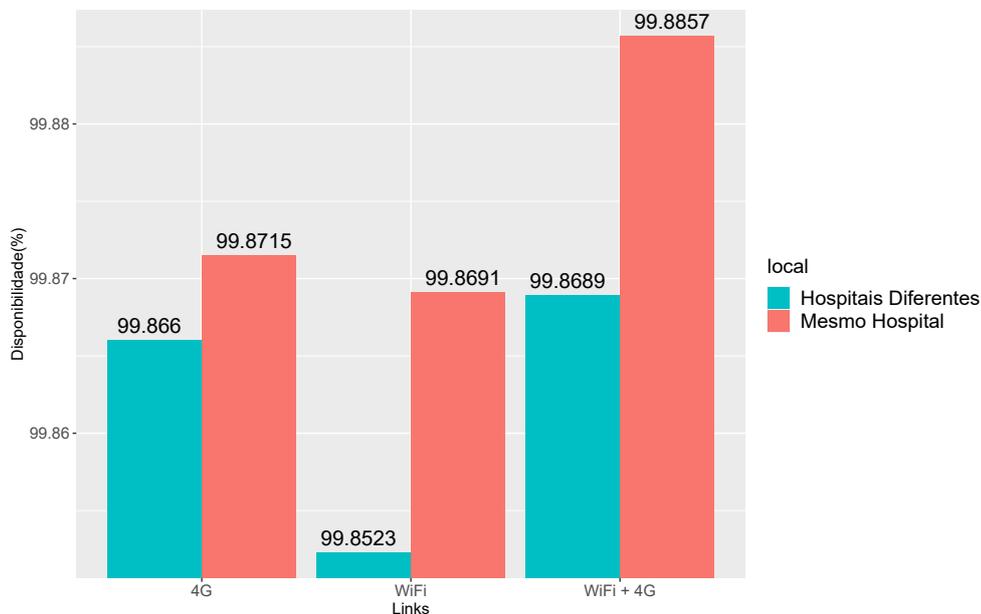


Figura 13 – Disponibilidade geral do ambiente de telecirurgia.

A Figura 14 apresenta o gráfico do tempo de inatividade em horas, considerando o período de um ano para o ambiente de telecirurgia adotado. Para esse caso, também

consideramos uma cirurgia realizada em um mesmo hospital e em hospitais diferentes utilizando somente WiFi e WiFi + 4G. Observa-se que o melhor cenário, ou seja, o que apresenta o menor tempo de inatividade, é quando uma cirurgia é realizada em um mesmo hospital e utilizando os *links* WiFi e 4G. O tempo de inatividade ficou em 10,0072 horas. Isso representa que os equipamentos ficam inoperantes por 0,1160% de tempo no período de um ano. O cenário que obteve o pior resultado foi considerando uma cirurgia em hospitais diferentes utilizando a rede WiFi, alcançando uma indisponibilidade de 12,9377 horas por ano. Vale destacar que a diferença dos *downtimes* em realizar a cirurgia remota ou local com apenas WiFi é quase o dobro.

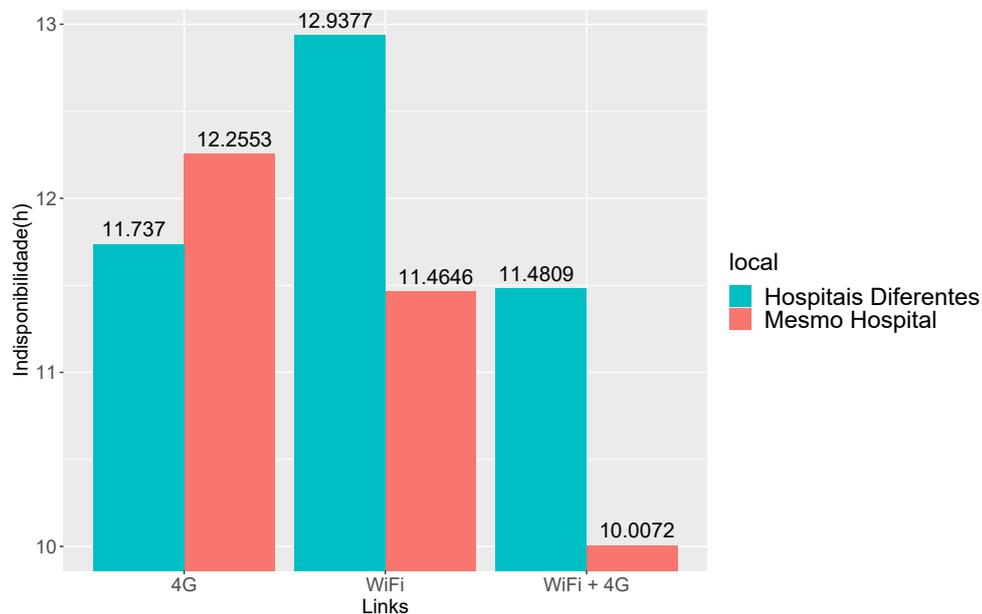


Figura 14 – Tempo de inatividade em horas do ambiente de telecirurgia.

A Figura 15 o gráfico referente a probabilidade de falha de um ambiente de telecirurgia em circunstâncias nas quais a cirurgia é realizada em hospitais distintos. Em outras palavras, representa a probabilidade de ocorrência de falhas no ambiente de telecirurgia, levando em consideração tanto a utilização exclusiva de WiFi quanto a combinação de WiFi e 4G. É notável que o contexto mais favorável, caracterizado pela menor probabilidade de ocorrência de problemas, é observado quando uma cirurgia é conduzida com a utilização simultânea dos *links* WiFi e 4G. Ao analisarmos um intervalo de tempo de 1 ano, equivalente a 8766 horas, a probabilidade de ocorrência de um erro em uma cirurgia

com os mencionados *links* é de 91,9674%, em contraste com a probabilidade mais elevada de 98,6457% quando somente o *link* WiFi é empregado.

Ampliando a análise para um período mais extenso, como 12000 horas, percebe-se uma redução marginal na diferença entre as probabilidades de erro. Contudo, a vantagem persiste em favor da utilização combinada de *links* WiFi e 4G, apresentando uma probabilidade de erro de 96,7977%, enquanto a utilização exclusiva do *link* WiFi resulta em uma probabilidade mais alta de 99,8017%.

Essa constatação sugere que a combinação de WiFi e 4G oferece uma maior robustez ao ambiente de telecirurgia, reduzindo significativamente as chances de ocorrência de falhas durante o procedimento. A análise detalhada das probabilidades ao longo de diferentes períodos de tempo destaca a estabilidade e confiabilidade proporcionadas pela redundância na comunicação, reforçando a importância prática desta abordagem na minimização de riscos em cirurgias remotas.

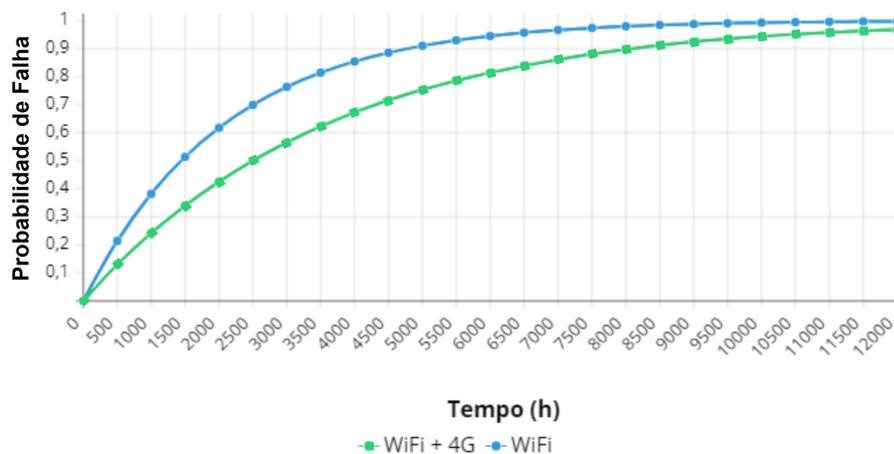


Figura 15 – Gráfico de probabilidade de falha de um ambiente de Telecirurgia realizada em um mesmo hospital e em hospitais diferentes.

Devido ao nível de criticidade que possui o ambiente de telecirurgia, o tempo de entrega das mensagens entre o console cirurgião e o carrinho do paciente é uma métrica importante a ser analisada. Os cirurgiões devem ser imediatamente informados sobre qualquer atraso no tempo de entrega das mensagens. Para calculamos a probabilidade da mensagem ser entregue foi realizada uma avaliação transiente da métrica $P\{\#PRM = 1\}$ em um tempo específico. A Figura 16 apresenta o gráfico do envio de uma mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente, utilizando os *links* WiFi + 4G de uma

telecirurgia realizada num mesmo hospital e em hospitais diferentes considerando o tempo em segundos.

A análise das probabilidades de entrega de mensagens em ambientes de telecirurgia revela informações cruciais. Para cirurgias realizadas no mesmo hospital, a probabilidade de 99,9999% em 0,4 segundos evidencia uma eficiência notável na transmissão de informações. No entanto, ao considerarmos cirurgias em hospitais diferentes, a probabilidade de entrega ainda é substancial, alcançando 70,4412% no mesmo intervalo de tempo de 0,4 segundos. Esta redução pode ser atribuída à necessidade da mensagem atravessar uma rede externa, introduzindo uma variabilidade no processo.

Ao ampliarmos o tempo para 1 segundo, observamos um aumento significativo na probabilidade de entrega em hospitais diferentes, atingindo 95,9319%. No entanto, é digno de nota que a probabilidade de entrega no mesmo hospital permanece inabalável em 100%, reforçando a conclusão esperada.

Esses resultados corroboram a previsão de que a probabilidade de entrega de mensagens em cirurgias realizadas no mesmo hospital supera aquela em hospitais diferentes. A explicação reside na ausência da mensagem passando por uma rede externa, garantindo uma eficácia e confiabilidade superiores no processo de comunicação. Essa compreensão aprofundada das probabilidades destaca a importância de considerar a localização geográfica na avaliação da robustez dos sistemas de telecirurgia, proporcionando um panorama mais abrangente das variáveis que influenciam o sucesso na entrega de mensagens críticas durante procedimentos cirúrgicos remotos.

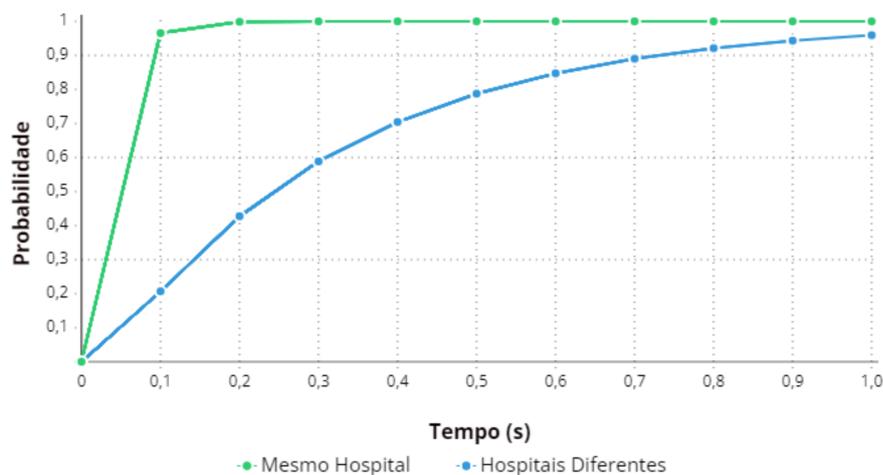


Figura 16 – Envio de mensagem considerando *links* WiFi + 4G e realizada num mesmo hospital e em hospitais diferentes.

4.2 Estudo de Caso 2 - 5G

No segundo estudo de caso, conduzimos uma análise de um ambiente de telecirurgia considerando procedimentos realizados tanto no mesmo hospital quanto em hospitais diferentes. Para tal avaliação, foi utilizada a conexão 5G para acesso à Internet e, consequentemente, para a intercomunicação dos equipamentos.

4.2.1 Arquitetura

A Figura 17 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 (OLIVEIRA; ALENCAR; LOPES, 2018), o Núcleo da Rede 5G desempenha uma função essencial e central na administração e encaminhamento de dados, voz e diversas outras formas de informações entre os dispositivos interconectados na infraestrutura da tecnologia 5G. Esta infraestrutura, caracterizada pela sua alta taxa de transmissão, baixa latência e capacidade de conexão massiva, confere ao Núcleo 5G um papel fundamental na gestão eficiente e dinâmica do tráfego de dados. O Núcleo da Rede 5G é responsável por coordenar e controlar os fluxos de informação, garantindo a entrega rápida e confiável de serviços em tempo real, como videochamadas, transmissões de alta qualidade e aplicativos que demandam uma resposta imediata. Além disso, sua arquitetura flexível e orientada a serviços possibilita a adaptação a uma variedade de requisitos de aplicativos e usuários, tornando-o um componente crucial para o sucesso e a inovação contínua na evolução das redes de comunicação móvel. Este 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.

Vale destacar que para este estudo de caso 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” e num mesmo hospital.

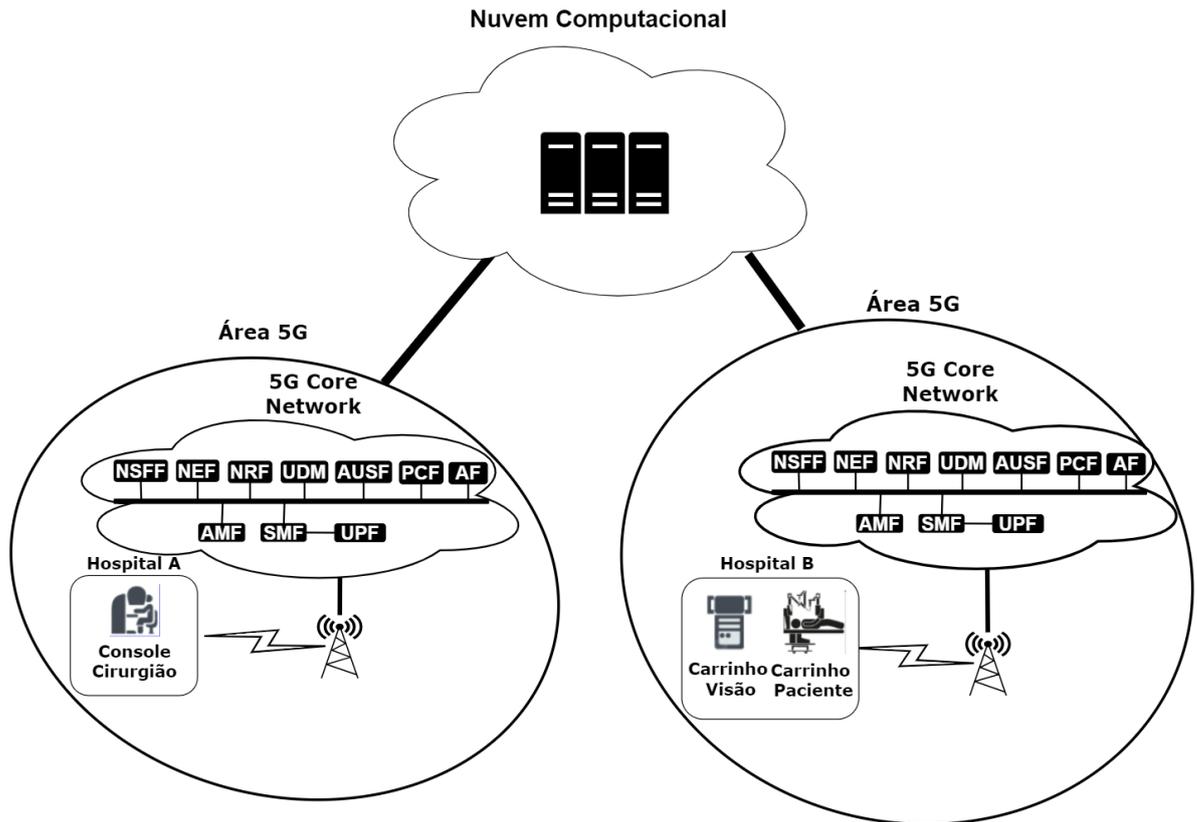


Figura 17 – Arquitetura de telecirurgia adotada que utiliza *link* 5G para interconexão dos equipamentos.

4.2.2 Modelos

A Figura 18 apresenta o modelo SPN proposto para representar o ambiente de telecirurgia descrito na Figura 17. Ele é dividido em 3 partes: *Nuvem Computacional*, *Hospital A* e *Hospital B*. Como pode ser observado na (Figura 18A), 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 18B), o núcleo da rede 5G (Figura 18C) e o *link* 5G (Figura 18D). 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*

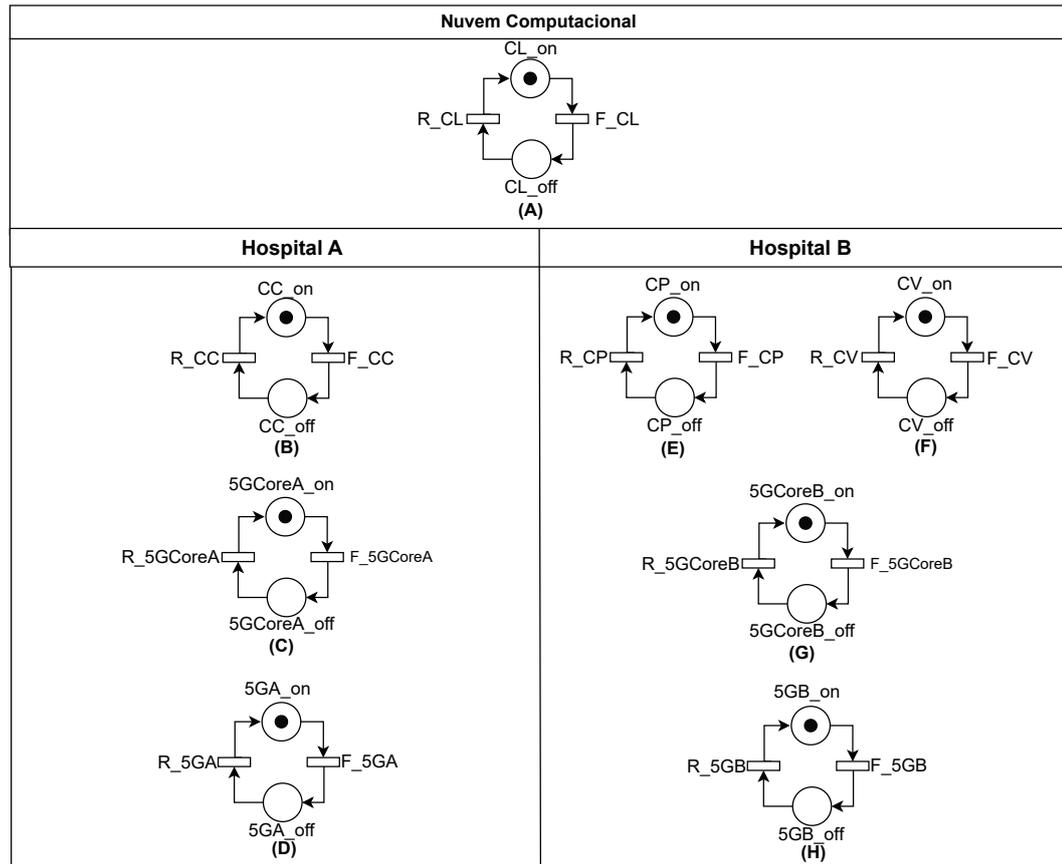


Figura 18 – Modelagem de Rede de Petri de um ambiente de Telecirurgia que utiliza *link* 5G para inteconexão dos equipamentos.

A, ou seja, o núcleo da rede 5G e o *link* 5G, possuem um comportamento análogo ao do console cirurgião. Já no *Hospital B*, temos os modelos que representam o carrinho do paciente (Figura 18E), o carrinho de visão (Figura 18F), o *link* 5G (Figura 10H) e o núcleo da rede 5G (Figura 18G). 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 19 apresenta o modelo SPN proposto para representar o envio da mensagem entre o o console cirurgião e o carrinho do paciente. 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.

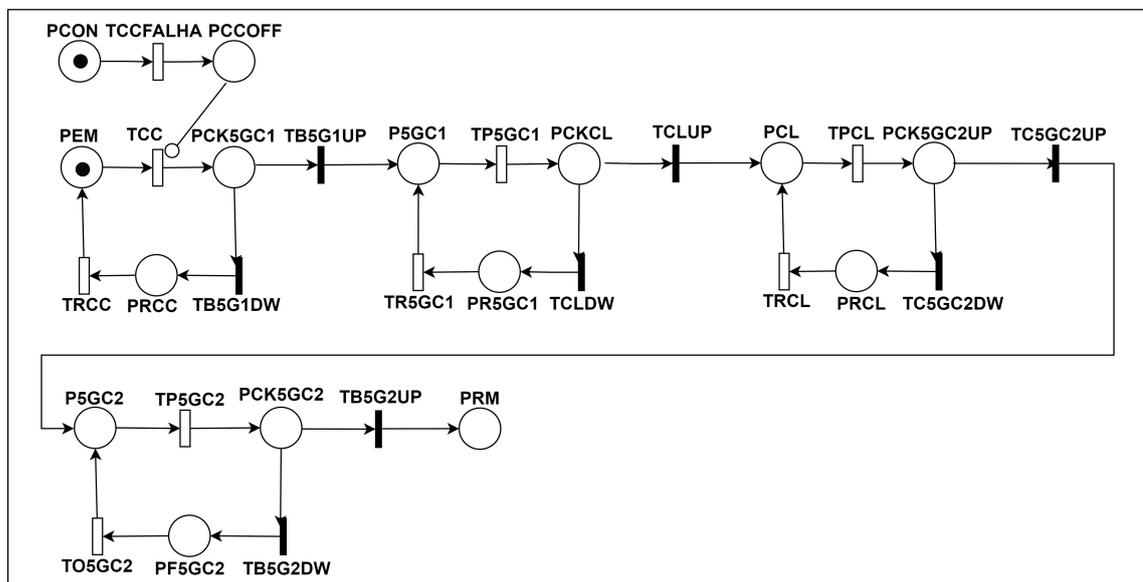


Figura 19 – Modelagem de Rede de Petri para o envio de uma mensagem de um ambiente de Telecirurgia que utiliza *link* 5G para interconexão dos equipamentos.

4.2.3 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. Esses tempos são essenciais para calcular a dependabilidade e a capacidade de resposta do ambiente de telecirurgia, influenciando diretamente na eficácia e operacionalidade dos procedimentos realizados.

Na Tabela [11](#), apresentamos uma compilação abrangente das descrições, transições e os valores específicos que foram adotados para representar os tempos de falha e reparo dos componentes. Ao utilizar unidades padronizadas, como "s" para segundos, "h" para horas e "prob" para probabilidade, garantimos uma representação precisa e consistente dos dados. Isso facilita a interpretação e o cálculo dos índices de disponibilidade e confiabilidade do sistema de telecirurgia.

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 [\(INTUITIVE, a\)](#). 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 [\(ANDRADE et al., 2021\)](#) e [\(ARAÚJO et al., 2014\)](#). 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 $TP5GC2$, tomamos como base os dados de processamento em redes 4G, com a perspectiva em mente de que a tecnologia 5G apresenta um potencial de taxa de transmissão até 10 vezes superior à 4G, conforme apontado em estudos [\(SERIES, 2015\)](#). Essa transição de paradigma na taxa de transmissão de comunicação sem fio é um marco significativo no avanço da tecnologia de redes, prometendo

revolucionar uma ampla gama de aplicações e serviços que dependem de uma conectividade de alta performance. Com a 5G emergindo como uma força motriz na próxima geração de comunicações móveis, é fundamental integrar essas melhorias potenciais em nossas análises e estratégias de implementação de sistemas de telecirurgia. Dessa forma, podemos capitalizar ao máximo os benefícios que essa nova tecnologia oferece.

Tabela 11 – 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

4.2.4 Métricas

As Tabelas [12](#) e [13](#) 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 ([MACIEL et al., 2021](#)). 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 [10](#) foram ajustados para não incluir processos de reparo.

A disponibilidade de uma telecirurgia realizada em hospitais diferentes, é calculada levando em consideração que os componentes essenciais, como o carrinho da visão, o console cirurgião, o carrinho do paciente e a nuvem computacional, estejam em funcionamento. Além disso, é necessário que haja uma conexão ativa 5G tanto no Hospital A quanto no Hospital B. Já a função para calcular a telecirurgia realizada em um mesmo hospital é bem parecida, bastando apenas considerar apenas a conexão 5G em um único hospital.

O cálculo da indisponibilidade é semelhante ao da disponibilidade, divergindo apenas no procedimento de subtrair 1 para obter a probabilidade de falha, que é equivalente à indisponibilidade. Este método visa quantificar o período em que o sistema não está operacional. Ao multiplicar esse valor pela quantidade de horas em um ano (8766), obtém-se o tempo total de indisponibilidade ao longo de um ano.

O cálculo da confiabilidade, ou seja, a probabilidade de falha, é obtido por meio de uma análise transiente, na qual ao menos um componente do ambiente de telecirurgia está indisponível. Essa análise transiente não apenas contribui para uma compreensão mais abrangente da confiabilidade do ambiente de telecirurgia, mas também facilita a identificação de áreas passíveis de melhorias e otimizações. Ao explorar os cenários de falha, os responsáveis pelo sistema podem adotar medidas proativas para mitigar riscos e aprimorar a confiabilidade do ambiente, resultando em uma infraestrutura mais robusta e resistente a potenciais contratemplos.

4.2.5 Resultados

A Tabela 14 exibe 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 inatividade de 12 horas. Essas conclusões ressaltam a importância de considerar as variáveis relacionadas à localização hospitalar ao projetar e gerenciar ambi-

Tabela 12 – 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	$P\{((\#5G_on=1)AND(\#CL_on=1)AND(\#CC_on=1)AND(\#CP_on=1)AND(\#CV_on=1)AND(\#5GCore_on=1))\}$
	Hospitais Diferentes	$P\{((\#5GA_on=1)AND(\#5GB_on=1)AND(\#CL_on=1)AND(\#CC_on=1)AND(\#CP_on=1)AND(\#CV_on=1)AND(\#5GCoreA_on=1)AND(\#5GCoreB_on=1))\}$
Inatividade	Mesmo Hospital	$(1-P\{((\#5G_on=1)AND(\#CL_on=1)AND(\#CC_on=1)AND(\#5GCore_on)AND(\#CP_on=1)AND(\#CV_on=1))\}) * 8766$
	Hospitais Diferentes	$(1-P\{((\#5GA_on=1)AND(\#5GB_on=1)AND(\#CL_on=1)AND(\#CC_on=1)AND(\#CP_on=1)AND(\#CV_on=1)AND(\#5GCoreA_on=1)AND(\#5GCoreB_on=1))\}) * 8766$

Tabela 13 – Métricas e funções utilizadas para calcular a probabilidade de falha.

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

entes de telecirurgia, com o objetivo de otimizar o tempo de inatividade e maximizar a disponibilidade.

Tabela 14 – 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
Hopitais Diferentes	99,8627%	12,03 h/a

A Figura 20 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%.

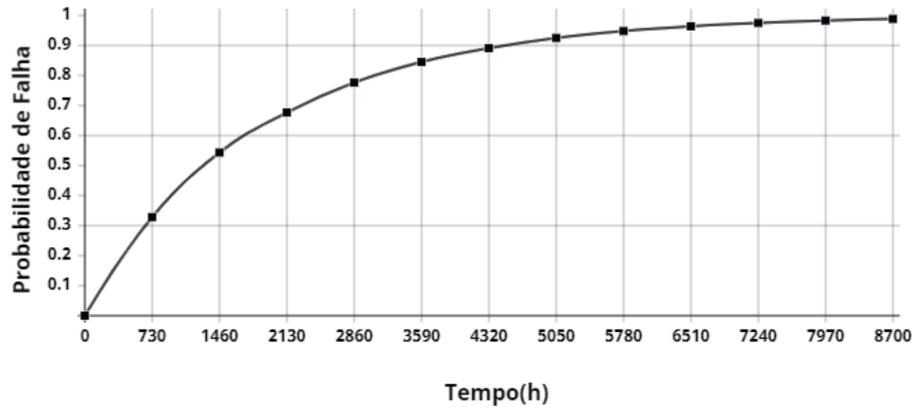


Figura 20 – probabilidade de falha de um ambiente de Telecirurgia.

A Figura 21 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.

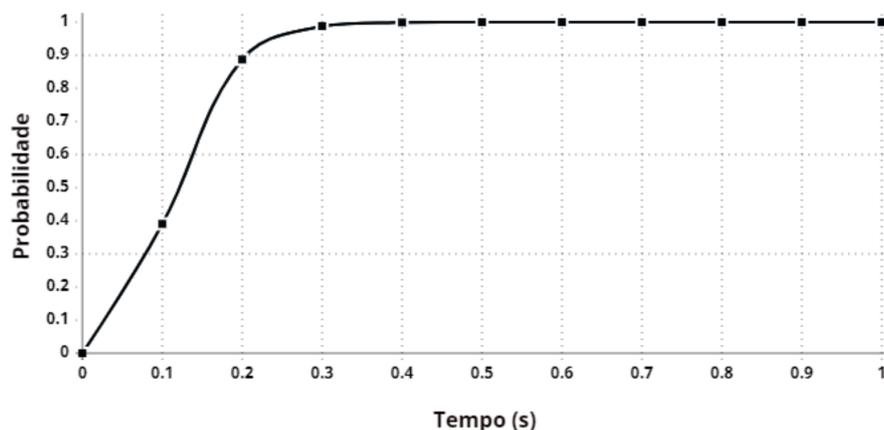


Figura 21 – Tempo de envio de uma mensagem de um ambiente de Telecirurgia

4.3 Considerações finais

Este capítulo apresentou os resultados obtidos na realização de dois estudos de caso. No primeiro estudo. Realizamos a análise do ambiente de telecirurgia considerando uma cirurgia realizada no mesmo hospital e em hospitais diferentes, utilizando os *links* 4G e WiFi para a comunicação dos equipamentos. No segundo estudo de caso. Realizamos a análise do ambiente de telecirurgia considerando uma cirurgia realizada no mesmo hospital e em hospitais diferentes, utilizando o link 5G para a comunicação dos equipamentos.

Com base nos resultados dos dois estudos de casos, concluímos que a utilização do 5G torna o envio da mensagem entre o console cirurgião e o carrinho do paciente mais eficiente, visto visto ser essa eficiência obtida pelo fato do 5G ser até 10 vezes mais rápido do que o 4G. Considerando a disponibilidade, o tempo de inatividade e a confiabilidade, o uso do WiFi + 4G teve resultados próximos ao do 5G, porém, é importante ressaltar que o 5G representa uma tecnologia relativamente recente, e ainda há lacunas a serem preenchidas na literatura, em relação aos dados de MTTR e MTTF. Esses dados são essenciais para obtermos resultados mais precisos sobre a disponibilidade, confiabilidade e tempo de inatividade do 5G de ambientes de telecirurgias.

5 CONCLUSÕES

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 a disponibilidade e 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 dados obtidos nesse estudo são uma análise valiosa do ambiente de telecirurgia utilizando modelos de redes de Petri, mas é essencial reconhecer que qualquer modelo é uma simplificação da realidade e que suposições são feitas para tornar a análise viável. Portanto, a aplicação desses resultados em ambientes clínicos reais deve ser realizada com cuidado, levando em consideração as complexidades inerentes à telecirurgia e as limitações das suposições feitas durante o processo analítico.

Outro ponto crucial a ser levado em conta é a premissa da estabilidade da conexão entre os hospitais. Embora essa suposição seja feita para facilitar a modelagem e a análise, é importante reconhecer que na prática, falhas de conexão podem ocorrer devido a uma variedade de fatores, como problemas de infraestrutura, interrupções no fornecimento de energia ou eventos imprevisíveis. Portanto, ao aplicar as informações derivadas deste estudo, é vital ter em mente que a estabilidade da conexão pode ser uma variável sensível e que medidas adequadas de contingência e redundância devem ser consideradas na implementação real de um sistema de telecirurgia.

Dessa forma, é fundamental ressaltar que os modelos e análises apresentados oferecem uma valiosa perspectiva sobre o ambiente de telecirurgia. No entanto, é essencial que os profissionais de saúde, os engenheiros de sistemas e os responsáveis pela tomada de decisões usem essas informações como uma base sólida, mas também estejam preparados para lidar com as nuances e imprevistos que podem surgir na prática clínica. Somente ao manter uma abordagem flexível e adaptativa será possível garantir a eficácia e a operacionalidade contínuas da telecirurgia em um ambiente dinâmico e em constante evolução.

5.1 Contribuições

Os resultados obtidos nesta pesquisa proporcionam informações importantes 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. Ao endereçar os problemas identificados na pesquisa, a equipe pode antecipar e abordar proativamente possíveis pontos de falha, implementando ações corretivas ou preventivas para garantir a contínua integridade e confiabilidade do sistema.

Além disso, os dados desta pesquisa deverão servir como base para aperfeiçoamentos contínuos nos protocolos de manutenção, permitindo uma abordagem mais eficiente e personalizada. Isso inclui a identificação de componentes críticos que requerem atenção especial, a determinação de intervalos de manutenção mais adequados e a implementação de estratégias proativas para lidar com potenciais desafios. Ao alavancar essas informações, a equipe de manutenção pode contribuir significativamente para a operacionalidade e eficácia contínuas dos procedimentos de telecirurgia, garantindo o mais alto padrão de cuidados aos pacientes.

Também foi proposta uma metodologia utilizando Redes de Petri estocásticas para a análise de métricas críticas, incluindo disponibilidade, tempo de inatividade e confiabilidade, em um contexto específico relacionado à telecirurgia. Adicionalmente, foram desenvolvidos modelos de entrega de mensagens destinados ao ambiente de telecirurgia, os quais identificam o tempo médio de entrega de mensagens por meio de diferentes tipos de redes de comunicação. Essa abordagem integrada oferece uma perspectiva abrangente e robusta para avaliar não apenas a eficácia operacional do ambiente de telecirurgia, mas também para otimizar a comunicação essencial para o sucesso desses procedimentos médicos remotos.

Além das contribuições acima citadas, esta pesquisa resultou na publicação de dois artigos em periódicos, a saber:

- Rocha, V., Araujo, J., Nogueira, B., & Andrade, E. (2023). "Modeling and Analysis of a Telesurgery Environment Using Stochastic Petri Nets." Publicado no *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 10, pp. 1073-1080.

- Rocha, V., Araujo, J., Nogueira, B., & Andrade, E. (2024). "Modeling and Analysis of a Telesurgery Environment Considering a 5G Network." Aceito para publicação na *Revista de Informática Teórica e Aplicada - RITA* (no prelo).

5.2 Trabalhos Futuros

Sendo um ambiente de telecirurgia é de extrema importância por lidar diretamente com vidas humanas, propomos 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.

Uma área adicional para pesquisa seria a realização de estudos abrangentes de desempenho e performabilidade, levando em consideração diferentes arquiteturas dentro do ambiente de telecirurgia. Comparar os resultados obtidos com as arquiteturas já consolidadas no mercado permitiria uma análise mais aprofundada das vantagens e desafios associados às diferentes configurações. Essa abordagem comparativa poderia oferecer informações importantes para o aprimoramento contínuo e a evolução da infraestrutura de telecirurgia, visando a otimização da qualidade, disponibilidade e confiabilidade do sistema em questão.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ANDRADE, E. et al. Dependability analysis of a cyber-physical system for smart environments. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Wiley Online Library, v. 31, n. 1, p. e4739, 2019.
- 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.
- 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.
- ARAUJO, J. C. T. d. Planejamento de infraestruturas de mobile cloud computing baseado em modelos estocásticos. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J.-C.; RANDELL, B. Fundamental concepts of dependability. *Department of Computing Science Technical Report Series*, Newcastle University, 2001.
- BARB, G.; OTESTEANU, M. 4g/5g: A comparative study and overview on what to expect from 5g. In: IEEE. *2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. [S.l.], 2020. p. 37–40.
- BAUSE, F.; KRITZINGER, P. S. *Stochastic petri nets*. [S.l.]: Vieweg Wiesbaden, 2002. v. 1.
- BOABANG, F. et al. A machine learning framework for handling delayed/lost packets in tactile internet remote robotic surgery. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, IEEE, v. 18, n. 4, p. 4829–4845, 2021.
- 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.
- CAMBOIM, K. M. A. *Modelagem Hierárquica e Heterogênea para Infraestrutura de Redes Convergentes e Política de Manutenção para Garantia de Níveis de Serviços*. 2012.
- CRESWELL, J. W. *A concise introduction to mixed methods research*. [S.l.]: SAGE publications, 2014.
- 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.

- FOUKAS, X. et al. Network slicing in 5g: Survey and challenges. *IEEE communications magazine*, IEEE, v. 55, n. 5, p. 94–100, 2017.
- HAAS, P. J. *Stochastic petri nets: Modelling, stability, simulation*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.
- INTUITIVE. *Da Vinci Manual*. <<https://manuals.intuitivesurgical.com>>. Acessado: 14-04-2024.
- INTUITIVE. *Da Vinci Surgical Systems*. <<https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/systems>>. Acessado: 15-04-2024.
- JAIN, R. *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. [S.l.]: Wiley New York, 1991. v. 1.
- LAPRIE, J.-C. *Dependability: Basic concepts and terminology*. [S.l.]: Springer, 1992.
- LI, R. et al. Modélisation d'un réseau 5g par des réseaux de pétri pour estimer sa résilience. In: *AlgoTel 2022-24èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications*. [S.l.: s.n.], 2022.
- LILJA, D. J. *Measuring computer performance: a practitioner's guide*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.
- LIN, X. An overview of 5g advanced evolution in 3gpp release 18. *IEEE Communications Standards Magazine*, IEEE, v. 6, n. 3, p. 77–83, 2022.
- 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.
- MACHIDA, F.; ANDRADE, E. Availability modeling for drone image processing systems with adaptive offloading. In: IEEE. *2021 IEEE 26th Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC)*. [S.l.], 2021. p. 93–103.
- 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.
- MACIEL, P. R.; LINS, R. D.; CUNHA, P. R. *Introdução às redes de Petri e aplicações*. [S.l.]: UNICAMP-Instituto de Computacao, 1996.
- MACIEL, P. R. et al. Dependability modeling. In: *Performance and dependability in service computing: concepts, techniques and research directions*. [S.l.]: IGI Global, 2012. p. 53–97.
- MARRANGHELLO, N. *Redes de petri: Conceitos e aplicações*. São Paulo: DCCE/IBILCE/UNESP, 2005.
- MATOS, H. A. A. d. *Cirurgia robótica em ORL: uma abordagem ao sistema Da Vinci*. Tese (Doutorado) — Escola de Medicina de Lisboa, 2017.
- MESHRAM, D. A.; PATIL, D. D. 5g enabled tactile internet for tele-robotic surgery. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 171, p. 2618–2625, 2020.

Modcs Research Group. *Mercury*. Disponível em: https://www.modcs.org/?page_id=2392.

MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989.

NAVARRO, E. M.; ÁLVAREZ, A. N. R.; ANGUIANO, F. I. S. A new telesurgery generation supported by 5g technology: benefits and future trends. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 200, p. 31–38, 2022.

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.

PARVEZ, I. et al. A survey on low latency towards 5g: Ran, core network and caching solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 3098–3130, 2018.

PAULO, M. et al. Dependability modeling. *Performance and Dependability in Service Computing: Concepts, Techniques and Research Directions*, 2011.

PETRI, C. A. *Kommunikation mit automaten*. Tese (Doutorado) — Technische Universität Darmstadt, 1962.

Portal DaVinci. *Portal da Vinci*. 2024. <https://www.portaldavinci.com.br/>. Acessado em: 17/01/2024.

REISIG, W. *Petri nets: an introduction*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 4.

ROCHA, V. et al. Modeling and analysis of a telesurgery environment using stochastic petri nets. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 21, n. 10, p. 1073–1080, 2023.

SEELIGER, B.; MARESCAUX, J. Robot-assisted laparoscopic telesurgery—from inception to future perspectives. *Show Chuan Medical Journal*, Show Chuan Medical Corporation Show Chuan Memorial Hospital, v. 22, n. 3, p. 454–459, 2023.

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.

SILVA, B. et al. Mercury: An integrated environment for performance and dependability evaluation of general systems. In: *Proceedings of industrial track at 45th dependable systems and networks conference, DSN*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.

SIRIWARDHANA, Y. et al. The role of 5g for digital healthcare against covid-19 pandemic: Opportunities and challenges. *Ict Express*, Elsevier, v. 7, n. 2, p. 244–252, 2021.

SOUZA, R. R. d. *Avaliação de dependabilidade de infraestruturas de data centers considerando os efeitos da variação de temperatura*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

TRIVEDI, K. S. et al. *Reliability analysis techniques explored through a communication network example*. [S.l.], 1996.

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.

ZHANG, Q.; LIU, J.; ZHAO, G. Towards 5g enabled tactile robotic telesurgery. *arXiv preprint arXiv:1803.03586*, 2018.