



Pós-Graduação em Ciência da Computação

Universidade Federal de Pernambuco

Aline Regina do Monte Nascimento

**Um Estudo da Disponibilidade de Ventiladores Mecânicos em Unidades de Terapia
Intensiva**

Recife

2024

Aline Regina do Monte Nascimento

Um Estudo da Disponibilidade de Ventiladores Mecânicos em Unidades de Terapia Intensiva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos.

Orientador: Dr. Paulo Romero Martins Maciel

Coorientador: Dra. Renata Cristine de Sá Pedrosa Dantas

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Nascimento, Aline Regina do Monte.

Um Estudo da disponibilidade de ventiladores mecânicos em unidades de terapia intensiva / Aline Regina do Monte Nascimento. - Recife, 2025.

77f.: il.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação, 2025.

Orientação: Paulo Romero Martins Maciel.

Coorientação: Renata Cristine de Sá Pedrosa Dantas.

1. Equipamentos hospitalares; 2. Ventiladores mecânicos; 3. Modelos estocásticos; 4. Disponibilidade; 5. SPN. I. Maciel, Paulo Romero Martins. II. Dantas, Renata Cristine de Sá Pedrosa. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

Aline Regina do Monte Nascimento

“Um Estudo da Disponibilidade de Ventiladores Mecânicos em Unidades de Terapia Intensiva”

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Aprovado em: 22/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Antônio Guimarães Tavares
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Jean Carlos Teixeira de Araújo
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

Prof. Dr. Paulo Romero Martins Maciel
Centro de Informática / UFPE
(orientador)

À minha filha, Alane Regina, minha maior inspiração e o motivo pelo qual busco ser uma pessoa melhor a cada dia.

Que esta conquista seja apenas um reflexo do que você pode alcançar na vida, com esforço, dedicação e coragem para perseguir seus sonhos. Espero que este trabalho mostre que não há limites para o que podemos realizar quando nos dedicamos ao que acreditamos.

Que eu possa ser para você um exemplo de determinação e resiliência, assim como você é para mim a razão de tantas batalhas vencidas. Você é minha maior motivação e o brilho que ilumina meu caminho.

Com todo o meu amor,

[Aline do Monte]

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta dissertação, não poderia deixar de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Drº Paulo Maciel, pela paciência, dedicação e orientação criteriosa durante todas as etapas deste trabalho. Sua sabedoria e incentivo foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e pessoal.

A minha co-orientadora, Drª Renata Pedrosa que aceitou fazer parte dessa aventura já em andamento mas que não deixou a desejar em nenhum momento, cumprindo com excelência seu papel. Meu muito obrigada!!!

Aos meus colegas e amigos do Modcs Group, pela troca de conhecimentos, apoio mútuo e momentos de descontração que tornaram este percurso mais leve e enriquecedor. Especialmente ao grupo “Meninas MoDCS Bem Informadas” Vocês foram grandes irmãs, a amizade de vocês durante o programa foi um grande presente.

Aos meus familiares, especialmente à minha mãe, Rejane, por me apoiar em toda minha jornada de trabalho e estudo, me incentivando e sendo minha principal rede de apoio com minha filha. Ao meu pai, Antônio, por ter me proporcionado acesso a uma boa educação. Minha irmã Alice, por ser sempre minha fonte de inspiração em busca de ser sempre alguém melhor. A meu esposo Pablo, pelo incentivo e apoio a todo momento, emocional e operacional. Vocês são meu porto seguro e minha maior fonte de motivação.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio, conselhos e, às vezes, apenas um ombro amigo para compartilhar alegrias e dificuldades.

Por fim, agradeço à UFPE e ao Modcs Group que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho, disponibilizando recursos ou suporte técnico.

Este trabalho é fruto de uma construção coletiva e carrega, em cada página, um pouco do que aprendi com cada um de vocês.

Muito Obrigada!

“O progresso é impossível sem mudança, e aqueles que não conseguem mudar suas mentes não conseguem mudar nada.” – Shaw, George Bernard.

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo de suporte à tomada de decisão voltado para o gerenciamento de equipamentos médico-hospitalares, com ênfase nos ventiladores mecânicos utilizados em Unidades de Terapia Intensiva (UTIs). A pesquisa parte do reconhecimento da importância da ventilação mecânica no suporte à vida de pacientes críticos e dos riscos operacionais e financeiros, além das consequências potencialmente fatais, associadas à falha desses equipamentos em contextos emergenciais. A manutenção desses sistemas já representa um desafio e uma despesa significativa para as instituições de saúde. O principal objetivo consiste em desenvolver um modelo de suporte à tomada de decisão para o gerenciamento de ventiladores mecânicos em UTIs, por meio de modelagem estocástica com Redes de Petri Estocásticas (SPNs), com o intuito de analisar e comparar diferentes estratégias de configuração de alimentação por baterias. Dada a criticidade de uma fonte de energia confiável para sistemas de suporte à vida, a pesquisa visa maximizar a disponibilidade e a confiabilidade operacional desses equipamentos, considerando tanto a fonte principal quanto os sistemas de redundância, como baterias e geradores. A proposta baseia-se na utilização de SPNs como ferramenta para modelar e simular o comportamento dos ventiladores sob diferentes condições operacionais, considerando, aspectos como falhas técnicas, tempo de reparo e configurações de redundância energética. A metodologia adotada envolveu a compreensão técnica dos sistemas de ventilação, a coleta e parametrização de dados a partir de manuais e fontes reais, a construção dos modelos estocásticos e a análise de cenários simulados. Foi desenvolvido um modelo que incorpora a dinâmica das baterias, permitindo estimar a disponibilidade dos respiradores em distintos contextos, como variações no número de equipamentos redundantes e diferentes tempos de reparo. Os estudos de caso demonstraram que estratégias como a introdução de baterias adicionais e a redução do tempo de reparo contribuem significativamente para o aumento da disponibilidade dos sistemas, com alguns cenários alcançando índices superiores a 0,98. A análise de sensibilidade evidenciou que parâmetros como o tempo médio até a falha das baterias e a taxa de reparo dos componentes impactam diretamente na confiabilidade operacional. Os resultados obtidos confirmam o potencial dos modelos estocásticos para antecipar o desempenho de equipamentos críticos, orientando decisões relacionadas à manutenção, à alocação de recursos e às configurações técnicas mais adequadas, e fornecendo dados concretos para justificar o investimento em sistemas de reserva mais robustos. Como contribuição prática, o

trabalho propõe estratégias viáveis e de baixo custo para a otimização da gestão tecnológica hospitalar, com potencial impacto na segurança e na continuidade da assistência ao paciente.

Palavras-chaves: Equipamentos hospitalares, ventiladores mecânicos, modelos estocásticos, disponibilidade, SPN.

ABSTRACT

This paper presents a decision-making support model for the management of medical and hospital equipment, with an emphasis on mechanical ventilators used in Intensive Care Units (ICUs). The research is based on the recognition of the importance of mechanical ventilation in supporting the lives of critically ill patients and the operational and financial risks, as well as the potentially fatal consequences, associated with the failure of this equipment in emergency situations. Maintaining these systems already represents a challenge and a significant expense for healthcare institutions. The main objective is to develop a decision-making support model for the management of mechanical ventilators in ICUs, using stochastic modeling with Stochastic Petri Nets (SPNs), to analyze and compare different battery power configuration strategies. Given the criticality of a reliable power source for life support systems, the research aims to maximize the availability and operational reliability of these equipment, considering both the primary source and redundancy systems, such as batteries and generators. The proposal uses SPNs as a tool to model and simulate ventilator behavior under different operating conditions, considering aspects such as technical failures, repair time, and energy redundancy configurations. The methodology adopted involved a technical understanding of ventilation systems, collecting and parameterizing data from manuals and real sources, building stochastic models, and analyzing simulated scenarios. A model was developed that incorporates battery dynamics, allowing for the estimation of ventilator availability in different contexts, such as variations in the number of redundant devices and different repair times. Case studies demonstrated that strategies such as introducing additional batteries and reducing repair time significantly contribute to increased system availability, with some scenarios achieving rates above 0.98. Sensitivity analysis showed that parameters such as mean time to battery failure and component repair rate directly impact operational reliability. The results confirm the potential of stochastic models to anticipate the performance of critical equipment, guiding decisions related to maintenance, resource allocation, and the most appropriate technical configurations, and providing concrete data to justify investment in more robust backup systems. As a practical contribution, the work proposes viable, low-cost strategies for optimizing hospital technology management, with potential impact on safety and continuity of patient care.

Keywords: Hospital equipment, mechanical ventilators, stochastic models, availability, SPN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A Equipe de Saúde	26
Figura 2 – O Paciente e a Ventilação Mecânica	28
Figura 3 – Infraestrutura do sistema	41
Figura 4 – Fluxograma da Metodologia	43
Figura 5 – Modelo de Performabilidade	50
Figura 6 – Arquitetura Simplificada	50
Figura 7 – Disponibilidade-DTyh Cenários 1,2 e 3	58
Figura 8 – Disponibilidade — Cenário 4	59
Figura 9 – Disponibilidade - Cenário 5	60
Figura 10 – Cenário 4 e 5	61
Figura 11 – Disponibilidade — Cenário 6	62
Figura 12 – Disponibilidade — Cenário 7	63
Figura 13 – Cenário 6 e 7	63
Figura 14 – Disponibilidade dos Cenários	65
Figura 15 – Dinâmica de Setores	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados	35
Tabela 2 – Transições e Guardas Modelo	52
Tabela 3 – Metricas e Parâmetros	56
Tabela 4 – Cenário 4	59
Tabela 5 – Cenário 5	60
Tabela 6 – Cenário 6	61
Tabela 7 – Cenário 7	62
Tabela 8 – Todos os Cenários	66
Tabela 9 – Ranking de Sensibilidade	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada
BC	Círculo Respiratório
BT	Módulos de Baterias
CTMC	Cadeias de Markov em Tempo Contínuo
DC	Corrente Contínua
EAS	Estabelecimento Assistencial de Saúde
EMH	Equipamentos Médico-Hospitalares
FR	Frequência Respiratória
FT	Árvores de Falhas
G	Gerador
GSPN	Redes de Petri Estocásticas Generalizadas
IoT	Internet das Coisas
MTTF	Tempo Médio Até a Falha
MTTR	Tempo Médio Até o Reparo
PEEP	Pressão Expiratória Final Positiva
PV	Sistemas Fotovoltaicos
RBD	Diagramas de Blocos de Confiabilidade
RL	Respirador Lung
RLB	Respirador Lung Backup
SPN	Redes de Petri Estocásticas
SW	Switch
TRE	Teste de Respiração Espontânea
UT	Concessionária
UTI	Unidade de Terapia Intensiva
VC	Volume Corrente

VM

Ventilação Mecânica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.2.3	Contribuições Esperadas	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	DEPENDABILIDADE	20
2.1.1	Confiabilidade	20
2.1.2	Disponibilidade	21
2.1.3	Manutenabilidade	22
2.1.4	Redundância	22
2.1.5	Análise de Sensibilidade	22
2.1.6	Stochastic Petri Nets - SPN	23
2.2	O AMBIENTE HOSPITALAR	24
2.2.1	A UTI (Unidade de Terapia Intensiva)	24
2.2.2	A Equipe de Saúde - Na UTI	25
2.2.3	O Sistema de Ventilação Mecânica	27
2.2.4	O Impacto na Saúde com o Mau Funcionamento de Equipamentos Médicos	28
3	TRABALHOS RELACIONADOS	30
4	SISTEMA DO RESPIRADOR	37
4.1	A VENTILAÇÃO MECÂNICA	37
4.2	ELEMENTOS DO RESPIRADOR	38
5	METODOLOGIA	42
5.1	COMPREENSÃO DO SISTEMA	43
5.2	AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS	44
5.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO	45
5.4	AVALIAÇÃO DO MODELO	45

5.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES	46
6	MODELOS	48
6.1	MODELO DE DISPONIBILIDADE COM DINÂMICA DE BATERIAS - SPN	48
7	ESTUDO DE CASOS	55
7.1	1º CENÁRIO	56
7.2	2º CENÁRIO	57
7.3	3º CENÁRIO	57
7.4	4º CENÁRIO	58
7.5	5º CENÁRIO	59
7.6	6º CENÁRIO	61
7.7	7º CENÁRIO	62
7.8	8º CENÁRIO	64
8	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

O progresso tecnológico e o aumento da disponibilidade de Equipamentos Médico Hospitalares Equipamentos Médico-Hospitalares (EMH) causam impacto financeiro e no índice de mortalidade significativo nos Estabelecimento Assistencial de Saúde Estabelecimento Assistencial de Saúde (EAS), que precisam investir em métodos mais avançados e dispendiosos. O gerenciamento adequado dos Equipamentos Médicos Hospitalares (EMH) é uma parte indispensável dos cuidados prestados ao paciente, sendo um fator crucial para assegurar a integridade e diretamente ligado à qualidade dos serviços oferecidos (AMORIM; JUNIOR; SHIMIZU, 2015).

A Ventilação Mecânica (VM) é um componente essencial para o tratamento de pacientes críticos em UTIs, ou ainda durante procedimentos cirúrgicos onde ocorra bloqueio neuromuscular, não sendo possível o uso da musculatura respiratória. Envolve o uso de uma máquina para apoiar a respiração do paciente quando ele não consegue continuar de forma independente devido à insuficiência respiratória ou outras condições. A VM também ajuda a manter os níveis de oxigenação e dióxido de carbono em faixas seguras e a evitar procedimentos invasivos, como traqueostomias. Além disso, a VM é fundamental durante cirurgias e outros procedimentos que requerem anestesia para manter as vias aéreas do paciente e garantir oxigenação adequada. Finalmente, a VM também permite que os profissionais de saúde monitorem de perto o estado respiratório do paciente para apoiar o alerta precoce de possíveis complicações, como dessaturação (condição resultante da queda da taxa de oxigênio sanguíneo para níveis abaixo do normal) de oxigênio ou obstrução das vias aéreas (KESZLER, 2017).

O respirador provou ser a principal ferramenta para o tratamento de pacientes gravemente enfermos, especialmente aqueles com insuficiência respiratória (ZUÑIGA et al., 2004). Por exemplo, desempenhou um papel crucial no tratamento de pacientes com COVID-19 que desenvolveram sintomas respiratórios graves, fornecendo suporte respiratório ao permitir ventilação adequada, monitorização precisa e gestão de protocolos de tratamento (CHANG et al., 2021). Contudo, a falta de serviços de manutenção regulares pode expor o paciente a riscos mais significativos (COFFEY; CAMPBELL; ZHUANG, 1999).

As baterias são essenciais para o funcionamento dos Respiradores. Os Respiradores são geralmente usados em situações de cuidados críticos, como quedas de energia ou outras interrupções no fornecimento elétrico. Nesses casos, as baterias desempenham um papel crucial

para garantir que o respirador mecânico continue funcionando e fornecendo oxigênio ao paciente. Eles também permitem o transporte de pacientes entre hospitais ou em um hospital (SAVARY et al., 2020).

Baterias redundantes são conjuntos adicionais de baterias de reserva para um respirador mecânico. Essas baterias fornecem uma camada extra de proteção contra quedas de energia ou outras interrupções no fornecimento elétrico. Baterias redundantes são essenciais em situações de cuidados críticos onde a vida do paciente depende do funcionamento contínuo do respirador mecânico. Sem baterias redundantes, qualquer interrupção no fornecimento de energia poderia ter consequências fatais para o paciente (BLAKEMAN; ROBINSON; BRANSON, 2010).

Os autores do estudo de (KARABÖCE, 2018) estudaram as baterias dos respiradores usados na sala de cirurgia para manter o paciente respirando durante a anestesia geral. Eles discutem a importância da disponibilidade de baterias em respiradores e dispositivos de anestesia, enfatizando a necessidade de que as baterias sejam confiáveis, eficientes e capazes de fornecer energia suficiente a esses dispositivos médicos essenciais, frequentemente utilizados em emergências. Além disso, os autores defendem que monitorar os níveis das baterias e substituí-las quando necessário é crucial para garantir que os dispositivos permaneçam operacionais. Eles também enfatizam a importância da disponibilidade e confiabilidade das baterias em respiradores e aparelhos de anestesia. Eles também discutem se os profissionais de saúde devem ser treinados para monitorar os níveis da bateria e solucionar problemas relacionados à bateria.

No contexto da gestão hospitalar, a aquisição e o gerenciamento de equipamentos médico-hospitalares, especialmente os respiradores, representam uma dimensão estratégica essencial para a qualidade da assistência prestada. A escolha desses dispositivos envolve não somente critérios técnicos e financeiros, mas também aspectos relacionados à confiabilidade, manutenção, disponibilidade e adequação às demandas clínicas específicas de cada instituição. Em ambientes críticos como as Unidade de Terapia Intensiva (UTI), onde a falha de um único equipamento pode comprometer a vida de um paciente, decisões mal fundamentadas sobre aquisição e gestão tecnológica podem acarretar riscos significativos (OLIVEIRA et al., 2024). Dessa forma, a incorporação de ferramentas de apoio à decisão baseadas em dados e simulações, como modelos estocásticos, surge como uma alternativa promissora para otimizar recursos, garantir segurança operacional e fortalecer a atuação da engenharia clínica no planejamento e controle desses ativos vitais.

1.1 JUSTIFICATIVA

O gerenciamento eficiente (EMH) é um fator determinante para garantir a qualidade dos serviços prestados nas instituições de saúde. Em ambientes hospitalares de alta complexidade, como as (UTIs), a disponibilidade contínua e o bom funcionamento de equipamentos como ventiladores mecânicos são essenciais para preservar vidas. Falhas nesses dispositivos podem resultar em desfechos clínicos adversos, interrupção de tratamentos críticos e aumento nos índices de mortalidade e morbidade.

Com isto, a crescente complexidade dos sistemas hospitalares e o elevado custo de aquisição e manutenção de EMH exigem que a gestão hospitalar adote métodos mais avançados de planejamento e tomada de decisão. Isso é particularmente relevante em países em desenvolvimento, onde os recursos financeiros e técnicos são frequentemente limitados, tornando ainda mais necessário o uso de ferramentas que aumentem a eficiência operacional e a sustentabilidade econômica das instituições.

Outro ponto relevante diz respeito à dinâmica de falhas e manutenções desses equipamentos, muitas vezes pouco visível para os profissionais da saúde, mas fundamental para a segurança do paciente. A falta de manutenção preventiva e a dependência exclusiva de ações corretivas aumentam os riscos operacionais e reduzem a vida útil dos equipamentos. Por isso, a adoção de abordagens baseadas em dados, simulações e modelos matemáticos pode oferecer um diferencial estratégico, permitindo prever falhas, otimizar cronogramas de manutenção e assegurar maior confiabilidade nos processos assistenciais.

Diante desse cenário, o uso de técnicas como Cadeias de Markov em Tempo Contínuo (CTMC) e Redes de Petri Estocásticas (SPN) torna-se uma alternativa promissora para avaliar, modelar e propor melhorias na gestão desses sistemas. A modelagem estocástica oferece ferramentas analíticas para simular o comportamento de equipamentos sob diferentes condições, identificando gargalos, pontos críticos e oportunidades de intervenção com base em dados reais (STILES; MICK; WISE, 2001).

Diante da relevância exposta, este trabalho tem como propósito propor um modelo baseado em simulações matemáticas para avaliar a disponibilidade e a confiabilidade de ventiladores mecânicos em UTIs, considerando diferentes estratégias de manutenção e configurações de alimentação por baterias. A seguir, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearam o desenvolvimento desta pesquisa.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A gestão eficaz de (EMH), em especial os ventiladores mecânicos utilizados em (UTIs), representa um desafio técnico e estratégico para gestores hospitalares, engenheiros clínicos e profissionais de saúde. Devido à alta criticidade desses equipamentos, especialmente em contextos emergenciais, como falhas de energia ou ausência de manutenção adequada, exige-se alto grau de disponibilidade e confiabilidade operacional.

Nesse cenário, a análise rigorosa de sistemas complexos com base em dados e em análises quantitativas torna-se essencial. O uso de modelos estocásticos, em particular o formalismo das Redes de Petri Estocásticas, permite representar formalmente sistemas com múltiplos estados e comportamentos probabilísticos, oferecendo suporte à simulação e à avaliação de cenários complexos. Aplicadas aos ventiladores mecânicos, essas abordagens permitem analisar a ocorrência de falhas, a eficiência de intervenções técnicas e os impactos de diferentes configurações de redundância energética sobre a operação segura dos equipamentos.

Com base nesse contexto, este trabalho estabelece os seguintes objetivos:

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de suporte à tomada de decisão para o gerenciamento de ventiladores mecânicos em (UTIs), por meio de modelagem (SPNs), com o intuito de analisar e comparar diferentes estratégias de configuração de alimentação por baterias, visando maximizar a disponibilidade e a confiabilidade operacional desses equipamentos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar tecnicamente o sistema de ventilação mecânica hospitalar, identificando os componentes críticos dos ventiladores mecânicos como módulos de bateria, circuitos de ventilação, alarmes de segurança e lógica operacional com foco nos pontos mais suscetíveis a falhas ou interrupções.
- Coletar e estruturar dados técnicos para parametrização do modelo, com base em manuais técnicos, normas e literatura especializada, incluindo métricas como Tempo Médio Até a Falha (MTTF), Tempo Médio Até o Reparo (MTTR), taxas, e autonomia das

baterias em casos de emergência.

- Construir e implementar modelos estocásticos baseados em (SPN), representando formalmente o funcionamento dos ventiladores sob diferentes condições operacionais, permitindo a simulação de falhas, e estratégias de reparo e redundâncias.
- Realizar análise de sensibilidade dos parâmetros do sistema, a fim de identificar as variáveis com maior impacto sobre a disponibilidade e a confiabilidade dos ventiladores, subsidiando a priorização de ações estratégicas de engenharia clínica.

1.2.3 Contribuições Esperadas

- Desenvolvimento de um modelo de apoio à decisão para a gestão de ventiladores mecânicos em UTIs, baseada em simulação estocástica, capaz de prever comportamentos operacionais e propor estratégias mais eficientes de manutenção e abastecimento energético.
- Inovação metodológica na aplicação de SPNs ao contexto hospitalar, contribuindo para a ampliação do uso de modelagem formal na gestão de tecnologias médico-hospitalares.
- Potencial de replicabilidade do modelo para outros equipamentos médico-hospitalares críticos, promovendo maior segurança operacional e eficiência na gestão hospitalar.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A seguir a dissertação está organizada da seguinte maneira: No Capítulo 2 abordamos a Fundamentação Teórica, que se faz necessária para o entendimento dos conceitos, definições e técnicas da área da saúde e equipamentos hospitalares. O Capítulo 3 aborda os trabalhos relacionados acerca de análise de desempenho e gerenciamento de equipamentos hospitalares. No Capítulo 4 é apresentado o sistema do respirador e os conceitos específicos da fisioterapia respiratória. O Capítulo 5 estabelece uma metodologia de avaliação elaborada através do presente estudo para auxiliar a tomada de decisão por parte da gestão hospitalar. O Capítulo 6 apresenta o modelo estocástico produzido durante a pesquisa. O Capítulo 7 apresenta e discute os cenários obtidos a partir do modelo estocástico criado e suas avaliações. Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões, recomendações, lições aprendidas e as considerações

finals justamente dos trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos com base no presente trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo abordará definições e conceitos sobre o ambiente hospitalar e o funcionamento de equipamentos hospitalares, bem como análise de desempenho. Informações que auxiliarão para o entendimento do trabalho aqui apresentado, fornecendo conhecimento prévio necessário para o entendimento completo da pesquisa desenvolvida e apresentada nos próximos capítulos.

2.1 DEPENDABILIDADE

A dependabilidade de um sistema é a sua capacidade de fornecer um conjunto de serviços confiáveis que podem ser observados por agentes externos. Um serviço é confiável quando implementa as funcionalidades especificadas para o sistema, podendo ocorrer o defeito se este não conseguir prover o que foi especificado(MACIEL, 2023a).

(LAPRIE, 1992) definiu conceitos de dependabilidade no livro Dependability Basic Concepts and Terminology, sendo os mais utilizados quando se busca referenciar a dependabilidade. (AVIZIENIS; LAPRIE, 1986) descrevem como atributos da dependabilidade: a segurança, a confidencialidade, a integridade, a manutenibilidade, confiabilidade,e a disponibilidade.

- Segurança: ausência de consequências catastróficas para o(s) usuário(s) e o ambiente;
- Confidencialidade: ausência da divulgação de qualquer informação não autorizada pelo usuário;
- Integridade: pode ser entendida como a ausência de alterações impróprias no estado do sistema
- Manutenibilidade: corresponde à capacidade do sistema de sofrer reparos e modificações

2.1.1 Confiabilidade

A confiabilidade é definida como a probabilidade de que um dispositivo executará as suas funções pretendidas, satisfatoriamente, durante um determinado período de tempo sob condições(KUO; ZUO, 2003).Assim sendo, a confiabilidade não considera o reparo e diz ser a probabilidade do sistema está funcionando de forma ininterrupta em um determinado período do tempo. Ela está representada pela Eq.2.1.

$$R(t) = \{T \geq t\} \geq 0 \quad (2.1)$$

Onde T é uma variável aleatória, que representa o tempo para ocorrência da falha no sistema em certo intervalo de tempo t . A inconfiabilidade pode ser representada pela Eq2.2.

$$P(T > t) = R(t) = 1 - F_t(t) \quad (2.2)$$

2.1.2 Disponibilidade

Disponibilidade é a probabilidade de um sistema estar pronto para funcionar satisfatoriamente. Essa métrica é utilizada como parâmetro de avaliação no ambiente operacional e vem sendo estudada ao longo dos anos. Os sistemas críticos não toleram longos períodos de inatividade, exigindo uma maior disponibilidade (MACIEL, 2023c; AVIZIENIS; LAPRIE, 1986).

A disponibilidade do sistema pode ser representada pela razão entre o MTTF do Tempo Médio até a Falha e o MTTR do Tempo Médio até o Reparo do sistema (MACIEL, 2023c). A notação correspondente é expressa na Eq

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (2.3)$$

Podemos calcular o MTTF usando a confiabilidade $R(t)$ em função do tempo. Também podemos avaliar o MTTR com base nos valores de MTTF, disponibilidade e UA (WANG; TRIVEDI, 2005). As notações correspondentes são expressas na Eq. (2.4) e (2.5).

A *performability* é utilizada para avaliar modelos mais completos compostos por medidas de confiabilidade e desempenho. A medida de performabilidade é mais adequada para sistemas que podem sofrer falhas devido à passagem do tempo ou exaustão (SMITH; TRIVEDI; RAMESH, 1988). De acordo com (TRIVEDI; MALHOTRA, 1993), a análise de performabilidade visa capturar a dinâmica entre o comportamento da falha e o reparo e o desempenho proporcionado pelo sistema.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.4)$$

$$MTTR = MTTF \times \frac{UA}{A} \quad (2.5)$$

2.1.3 Manutenabilidade

Refere-se a manutenções realizadas no sistema em determinado período de tempo mediante ocorrência de falhas, a manutenabilidade é expressa pela Eq2.6, onde T representa o tempo de inatividade do sistema (downtime) sendo representado por uma função de densidade $g(t)$

$$V(t) = P\{T \leq t\} = \int_0^t g(t) \, dt \quad (2.6)$$

Dado que um Sistema está em falha a manutenabilidade é a probabilidade do que o sistema seja reparado em até T unidades de tempo.

2.1.4 Redundância

A adoção de mecanismos redundantes é uma estratégia utilizada para melhorar a confiabilidade e disponibilidade de um sistema por meio da replicação de componentes ou dados críticos. Tal abordagem envolve a criação de backups ou duplicatas de elementos essenciais para que, em caso de falha, o sistema continue a operar sem interrupção (KNIGHT, 2012).

A redundância pode ser implementada em diferentes níveis do sistema, incluindo hardware, software e dados, envolvendo a duplicação de componentes físicos, como processadores, memória ou dispositivos de armazenamento. Por exemplo, a replicação de componentes de software, como servidores ou aplicações, em múltiplas máquinas, criando cópias de dados críticos, como bases de dados ou arquivos, e armazenando-os em locais diferentes para evitar perda ou corrupção (KOREN; KRISHNA, 2020).

Um dos principais benefícios da redundância é o aumento da confiabilidade e da disponibilidade; ao criar backups ou duplicatas de componentes críticos, o sistema pode continuar a operar mesmo se um ou mais componentes falharem. Essa capacidade é essencial em sistemas críticos, como aviação, saúde ou serviços financeiros, onde o tempo de inatividade ou interrupções podem ter consequências graves (MACIEL, 2023b; DODSON; NOLAN, 1999).

2.1.5 Análise de Sensibilidade

Ao conduzir a análise de sensibilidade, há várias técnicas disponíveis, como Medidas de Sensibilidade Uma de Cada Vez, Método de Desvio Relativo, Taxa de Desvio Relativo, Coefi-

ciente de Correlação de Classificação Parcial, Análise de Sensibilidade Diferencial e Índice de Sensibilidade (HAMBY, 1994). Para nossa pesquisa, utilizaremos o Índice de Sensibilidade.

O Índice de Sensibilidade ($S_y(A)$) avalia o efeito de alterações no parâmetro de entrada (y) em uma disponibilidade específica. Ele é expresso como uma diferença percentual. Para calcular o índice de sensibilidade para a métrica y , usamos a Eq. 2.7. \max_y e \min_y representam os valores máximo e mínimo de saída obtidos ajustando o parâmetro y até o valor máximo \max_y :

$$S_y(A) = \frac{\max_y - \min_y}{\max_y}. \quad (2.7)$$

Ao determinar $S_y(A)$, manter os outros parâmetros do modelo constantes é essencial. Esta etapa é crucial para calcular todos os parâmetros e construir a classificação da análise de sensibilidade. Esta classificação aumenta a precisão da previsão de disponibilidade aumentada.

2.1.6 Stochastic Petri Nets - SPN

Redes de Petri Estocásticas (SPN) é um termo que denota uma família de modelos estocásticos que faz parte de uma família mais proeminente de modelos comportamentais chamada redes de Petri. As primeiras extensões estocásticas de redes de Petri foram propostas independentemente Symons (1989), Natkin (1980), Molloy (1981).

Em 1962, Carl Adam apresentou o conceito de Redes de Petri (PN) em sua tese de doutorado, intitulada *Kommunikation mit Automaten* (Comunicação com Automóveis), apresentada na Universidade de Damstadt, Alemanha (PETRI, 1962). A partir do formalismo proposto, tem-se utilizado de maneira abrangente em diversas PN, como a Ciência da Computação, Administração, Engenharias, entre tantas outras importantes áreas.

As Programações Neurolinguísticas são um instrumento de modelagem gráfica e matemática que pode ser utilizado para solucionar problemas de várias características e abordagens, segundo Murata (1989). Permitem observar o estado atual do sistema, bem como outros possíveis onde o sistema poderá se encontrar.

Conforme afirmam Girault e Valk (2013), as Redes de Petri (PN) constituem um conjunto de formalismos que possuem uma representação gráfica, apta a oferecer mecanismos de refinamento e abstração, sendo de notável relevância para o desenvolvimento de sistemas com-

plexos. Ademais, há à disposição várias ferramentas que simplificam sua modelagem, análise e verificação, culminando em sua ampla aplicabilidade nas ciências exatas.

Com o passar do tempo, o estudo das Redes Neurais (PN) abriu novos caminhos com variações do modelo original, como redes temporizadas, estocásticas, de alto nível e orientadas a objetos(MACIEL; LINS; CUNHA, 1996). Isso se deve à necessidade de adaptabilidade e às variadas características e necessidades dos problemas.

Esses modelos formaram o que então chamamos de Redes de Petri Estocásticas. Posteriormente, muitas outras extensões estocásticas foram introduzidas. Primeiro, Marsan et al. estenderam as redes de Petri estocásticas básicas considerando transições cronometradas estocásticas e transições imediatas (MARSAN; CONTE; BALBO, 1984).

Este modelo foi denominado Redes de Petri Estocásticas Generalizadas Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN)(MARSAN et al., 1994). Mais tarde, Marsan e Chiola propuseram uma extensão que também suportava transições temporizadas determinísticas (MARSAN; CHIOLA, 1986), que foi chamada de Redes de Petri Estocásticas Determinísticas (LINDEMANN, 1998). Muitas outras extensões se seguiram, incluindo eDSPN (GERMAN, 2000) e SRN (MUPPALA; CIARDO; TRIVEDI, 1994).

2.2 O AMBIENTE HOSPITALAR

O ambiente hospitalar constitui um sistema organizacional complexo, caracterizado pela integração de múltiplos setores assistenciais, diagnósticos, terapêuticos e administrativos. Sua estrutura funcional abrange unidades como centro cirúrgico, laboratórios clínicos, (UTI) e áreas de apoio, operando sob protocolos padronizados e normativas regulatórias específicas. A infra-estrutura tecnológica, composta por equipamentos médico-hospitalares de alta complexidade, sistemas informatizados de suporte à decisão e redes de monitoramento, requer manutenção sistemática e gestão estratégica. Nesse contexto, a governança hospitalar, alicerçada na gestão eficiente de recursos humanos e tecnológicos, é fundamental para garantir a continuidade operacional, a conformidade regulatória e a qualidade dos serviços prestados.(DIAZ, 2014).

2.2.1 A UTI (Unidade de Terapia Intensiva)

A (UTI) é um setor hospitalar altamente especializado, destinado à assistência de pacientes em estado crítico, que demandam monitoramento contínuo de parâmetros vitais e suporte

avançado à função orgânica. Este ambiente é dotado de infraestrutura tecnológica de alta complexidade, incluindo ventiladores mecânicos, monitores multiparamétricos, bombas de infusão, sistemas de terapia renal substitutiva e dispositivos de assistência circulatória. A operacionalização da UTI baseia-se em protocolos clínicos rigorosos e em recursos técnicos voltados à manutenção da estabilidade hemodinâmica e respiratória, sendo fundamental na condução de casos de elevada gravidade clínica. (PADILHA et al., 1997).

O funcionamento da (UTI) é estruturado sobre a atuação de uma equipe multiprofissional especializada, composta por médicos intensivistas, enfermeiros, fisioterapeutas, farmacêuticos, nutricionistas e demais profissionais da saúde, cuja intervenção ocorre de forma coordenada e protocolar. Essa equipe realiza monitoramento contínuo de parâmetros fisiológicos críticos, como frequência cardíaca, pressão arterial, saturação periférica de oxigênio e mecânica respiratória, promovendo ajustes terapêuticos em tempo real conforme a evolução clínica do paciente. A tomada de decisão é orientada por diretrizes baseadas em evidências e protocolos institucionais, com foco na eficácia terapêutica e na mitigação de riscos clínicos. Ademais, a UTI adota práticas rigorosas de controle de infecções nosocomiais, com ênfase na prevenção de eventos adversos, especialmente em pacientes imunocomprometidos ou com múltiplas comorbidades.(PERROCA; JERICÓ; CALIL, 2011).

A (UTI) é concebida como um ambiente de suporte avançado à vida, voltado não somente à intervenção em situações clínicas agudas, mas também à estabilização hemodinâmica e funcional de pacientes críticos, visando sua reabilitação progressiva e subsequente transferência para unidades de menor complexidade assistencial. A elevada densidade tecnológica, a demanda por monitoramento contínuo e a complexidade dos casos atendidos conferem à UTI um caráter estratégico e indispensável na estrutura hospitalar, sendo um dos setores com maior exigência técnico-operacional e impacto direto na taxa de desfechos clínicos.(BARBOSA, 2004).

2.2.2 A Equipe de Saúde - Na UTI

A atuação na (UTI) demanda elevado nível de integração entre diferentes especialidades, configurando uma equipe multiprofissional com competências complementares voltadas ao cuidado intensivo. Fisioterapeutas respiratórios, enfermeiros, médicos intensivistas, técnicos de enfermagem, farmacêuticos, nutricionistas e engenheiros clínicos compõem esse arranjo funcional, assumindo responsabilidades específicas em um modelo assistencial baseado na corresponsabilização e na interdisciplinaridade. A figura 1 ilustra a composição dessa equipe no

contexto operacional da UTI. A efetividade desse ambiente está condicionada à comunicação técnica precisa, à capacidade de tomada de decisão em tempo real e à adaptabilidade frente à complexidade clínica dos pacientes, assegurando intervenções seguras, oportunas e alinhadas às melhores práticas assistenciais.(GONÇALVES et al., 2021).

No manejo de tecnologias críticas, como os ventiladores mecânicos, a equipe da (UTI) exerce função estratégica desde a indicação do suporte ventilatório até o monitoramento contínuo e a calibração dos parâmetros respiratórios. Médicos intensivistas e fisioterapeutas são responsáveis pela definição das estratégias ventilatórias com base em protocolos clínicos e indicadores fisiológicos, enquanto enfermeiros e técnicos de enfermagem asseguram a execução segura da ventilação, realizando verificações de alarmes, manutenção de circuitos e observação sistemática de sinais clínicos. A atuação da engenharia clínica complementa esse processo por meio da gestão técnica dos dispositivos, com foco em ações de manutenção preventiva e corretiva, garantindo a operacionalidade e a confiabilidade dos equipamentos. Essa dinâmica colaborativa entre diferentes áreas do conhecimento técnico-científico é essencial para a eficácia terapêutica, evidenciando que o cuidado intensivo depende de uma atuação integrada, sistematizada e orientada por competências complementares.(SANTOS et al., 2022).



Figura 1 – A Equipe de Saúde

Imagen gerada pelo ChatGPT e adaptada por(MONTE et al., 2024)

2.2.3 O Sistema de Ventilação Mecânica

O processo operacional de implantação da ventilação mecânica em (UTI) compreende etapas padronizadas que visam assegurar a eficácia e segurança do suporte ventilatório. Inicialmente, realiza-se a avaliação clínica do paciente e a preparação das vias aéreas, seguida pela checagem funcional do ventilador mecânico e a instalação dos dispositivos auxiliares. A seguir, procede-se à configuração do equipamento com parâmetros individualizados, como Volume Corrente Volume Corrente (VC), Frequência Respiratória Frequência Respiratória (FR), e pressão expiratória final positiva Pressão Expiratória Final Positiva (PEEP), conforme o quadro clínico e as necessidades fisiológicas do paciente. Essas etapas são conduzidas de acordo com protocolos estabelecidos, garantindo a estabilidade ventilatória e a adequada troca gássica.(BROCHARD; SLUTSKY; PESENTI, 2017).

O sistema de ventilação mecânica é composto por um conjunto de componentes interdependentes incluindo sensores, módulos de controle e interfaces de monitoramento que operam de forma sincronizada para fornecer ventilação invasiva ou assistida, com parâmetros ajustáveis às condições fisiológicas do paciente (PHAM; BROCHARD; SLUTSKY, 2017). O processo de retirada gradual do suporte ventilatório, denominado desmame, é realizado pelo Teste de Respiração Espontânea Teste de Respiração Espontânea (TRE), com base em critérios clínicos e respiratórios, por meio da redução progressiva das configurações do respirador. Quando o paciente demonstra capacidade ventilatória suficiente e estabilidade hemodinâmica, procede-se à extubação, caracterizada pela remoção do tubo endotraqueal e transição para respiração espontânea (AZOULAY et al., 2013).

Considerando a complexidade funcional e a relevância clínica da ventilação mecânica no ambiente hospitalar, justifica-se a inclusão de uma seção específica nesta dissertação dedicada à análise dos respiradores mecânicos. Esses dispositivos constituem elementos centrais nas Unidades de (UTIs), sendo indispensáveis à manutenção da ventilação em pacientes com insuficiência respiratória aguda ou crônica descompensada. A presença de subsistemas interconectados e a necessidade de ajustes individualizados reforçam a complexidade operacional desses equipamentos, evidenciando a importância de estudos voltados à sua disponibilidade, confiabilidade e impacto nos desfechos assistenciais. A figura 2 ilustra o ciclo clínico de suporte ventilatório: desde a instalação do respirador em pacientes com insuficiência respiratória até a retirada do suporte, realizada com base em protocolos de avaliação da respiração espontânea conduzidos pela equipe multiprofissional.

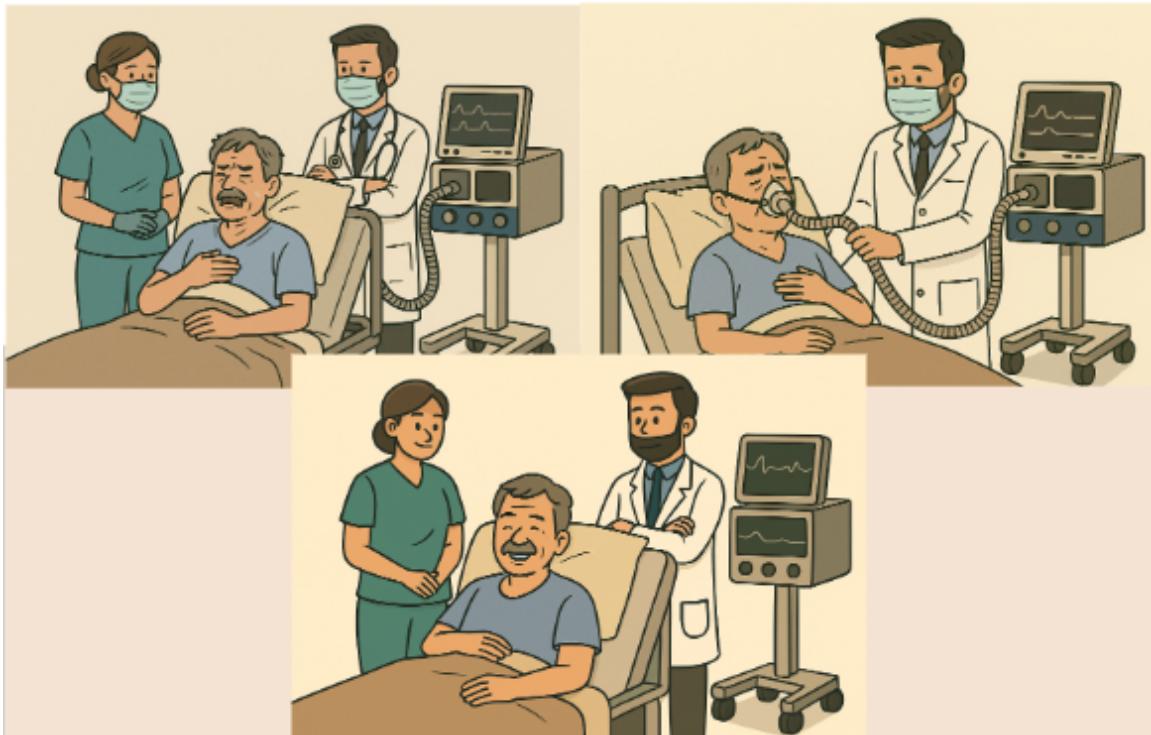


Figura 2 – O Paciente e a Ventilação Mecânica

Imagen gerada pelo ChatGPT e adaptada por (MONTE et al., 2024)

2.2.4 O Impacto na Saúde com o Mau Funcionamento de Equipamentos Médicos

Os impactos de equipamentos médicos quebrados ou defeitos nos índices de mortalidade são uma preocupação significativa no ambiente hospitalar. Equipamentos como ventiladores mecânicos, monitores multiparamétricos, desfibriladores e bombas de infusão desempenham funções fundamentais no apoio à vida e na vigilância constante de pacientes em estado crítico. Quando esses dispositivos apresentam defeitos ou não estão disponíveis devido a problemas, a habilidade dos profissionais de saúde é prejudicada, aumentando o risco de atrasos no diagnóstico e tratamento, o que pode ser prejudicial (PEREIRA; CASTRO; PRAXEDES, 2023).

As falhas nos equipamentos utilizados para procedimentos médicos, como hemodiálise e cirurgias de alta complexidade, podem resultar em interrupções nos tratamentos cruciais. Estudos demonstram que a falta de equipamentos essenciais está diretamente ligada ao aumento da mortalidade em unidades como UTIs e prontos-socorros, especialmente em situações de grande demanda, como surtos de doenças ou pandemias (POSSOLI et al., 2021).

Portanto, a manutenção regular, preventiva e corretiva dos equipamentos médicos, aliada a políticas de gestão tecnológica eficientes, é fundamental para reduzir os índices de mortalidade

e garantir a qualidade e a segurança no atendimento hospitalar (SOUZA; MENDES, 2019).

Esta seção estabeleceu os conceitos essenciais que fundamentam o estudo, incluindo disponibilidade, modelagem estocástica e o ambiente hospitalar. Esses fundamentos servem como base para o desenvolvimento dos modelo proposto e para a análise crítica dos resultados, permitindo a aplicação prática no gerenciamento de equipamentos médicos-hospitalares.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

A seção de trabalhos relacionados situa o presente estudo no contexto das pesquisas sobre o tema. Para isso, são discutidos trabalhos que exploram metodologias semelhantes, abordagens teóricas e práticas relevantes, bem como os principais resultados que contribuíram para o avanço do conhecimento na área. A análise desses estudos visa identificar tendências, convergências e lacunas na literatura, permitindo posicionar a pesquisa atual de forma clara e fundamentada. Dessa forma, esta sessão destaca tanto as contribuições relevantes quanto os pontos ainda pouco explorados, que motivam a realização deste trabalho.

A utilização de modelagem hierárquica para aumentar a disponibilidade tem sido extensivamente investigada ao longo dos anos. Nesta seção, consolidamos uma seleção de trabalhos relevantes com foco em modelagem e avaliação de desempenho em tecnologia hospitalar.

No estudo de Blakeman, Robinson e Branson (2010) os colaboradores analisaram a duração das baterias internas de quatro modelos de ventiladores utilizados em unidades de terapia intensiva. A pesquisa incluiu duas avaliações distintas: na primeira, os autores mediram o impacto de diferentes configurações de ventilação (modo de controle de volume e pressão, e diferentes níveis de PEEP) sobre a duração da bateria, utilizando um pulmão de teste e ventiladores previamente carregados conforme as especificações dos fabricantes. Os autores mediram o desempenho das baterias em quatro respiradores com ventilação controlada por volume e pressão, com pressão final variando de 0 a 20 cm H₂O. Os resultados demonstraram que as baterias duraram o mesmo tempo, mesmo com diferentes níveis de pressão. As durações observadas da bateria variaram de 5 a 69 minutos, com um período médio \pm desvio padrão de 80,4 \pm 49,3.

Na segunda avaliação, foram testadas múltiplas unidades dos modelos para identificar variações na duração da bateria entre dispositivos do mesmo modelo. Os autores concluíram que a utilização de um compressor diminui a duração da bateria e nenhuma correlação foi encontrada entre a idade da bateria e o tempo de operação. Eles enfatizam a importância da comunidade médica estar ciente dessas diferenças em cenários envolvendo falhas de energia. O estudo destacou a importância de compreender as limitações e variações nas baterias de ventiladores, especialmente em situações de falha de energia, para garantir a segurança dos pacientes ventilados.

Eles analisaram a disponibilidade de ventiladores mecânicos em situações críticas, assim

como o presente estudo, focando na avaliação experimental da duração da bateria de quatro modelos de ventiladores intensivos, analisando o impacto de diferentes configurações, como modos de ventilação e níveis de PEEP, na autonomia da bateria. Encontraram uma grande variação na duração, influenciada pelo uso de compressores internos. Ambas as pesquisas exploram a relevância da bateria nos ventiladores, porém adotam abordagens distintas. O estudo em questão utiliza uma modelagem matemática para avaliar a disponibilidade de respiradores em UTIs, considerando não somente o tempo de carga e descarga das baterias, mas também a redundância do sistema de alimentação elétrica e os tempos de manutenção. Embora sejam abordagens distintas, ambos os estudos enfatizam a importância da confiabilidade das baterias para assegurar a ventilação mecânica e reduzir os riscos aos pacientes em condições críticas.

Criticamente, a abordagem é puramente experimental; ela se limita a medir o desempenho em um ambiente controlado, sem utilizar modelos preditivos estocásticos (como o SPN) para simular o comportamento a longo prazo, otimizar estratégias de manutenção ou quantificar a disponibilidade operacional do sistema completo (rede elétrica, gerador, falha do ventilador, manutenção, etc.). O trabalho de Blakeman informa sobre as limitações, mas não propõe uma solução de gestão de risco preditiva baseada em probabilidade.

Neste estudo, Araujo et al. (2020) realizaram uma análise de confiabilidade de monitores multiparamétricos utilizados em (UTIs), equipamentos críticos no suporte ao monitoramento contínuo de pacientes em estado grave. A pesquisa envolveu a elicitação de requisitos baseada em entrevistas com profissionais experientes em manutenção hospitalar, análise de sistemas existentes e revisão sistemática da literatura. Utilizou-se a linguagem de modelagem CHESS-ML para definir um modelo detalhado desses sistemas, que posteriormente foi submetido à análise de confiabilidade por meio do plugin CHESS-SBA. Cenários distintos foram simulados, considerando variações nos intervalos de manutenção preventiva. Entre os principais resultados, identificou-se que os sistemas de alimentação, incluindo fonte de energia principal e bateria, têm maior impacto na confiabilidade geral do sistema, especialmente em situações de falha.

Com base nas análises realizadas, concluiu-se que estratégias de manutenção preventiva com intervalos reduzidos durante períodos críticos podem aumentar significativamente a confiabilidade do sistema, reduzindo o risco de falhas que comprometam a integridade física dos pacientes. O estudo também evidenciou a aplicabilidade da metodologia CHESS no domínio de sistemas médicos, destacando sua capacidade de modelar e prever o comportamento de sistemas críticos. As recomendações fornecidas auxiliam no gerenciamento de sistemas de monitoramento multiparamétrico, contribuindo para a melhoria da eficiência operacional e

segurança em UTIs, especialmente em cenários de alta demanda, como durante pandemias.

No entanto, a complexidade do modelo de ventilador mecânico aqui proposto, que envolve a dinâmica de falha e reparo de múltiplos subsistemas, energia, gerador, switch, baterias, circuito respiratório e o Cold Standby e o fluxo temporal de tokens para representar o uso e carregamento das baterias, exige a capacidade de representação gráfica e de estado das (SPN's).

O estudo de Sandelic, Sangwongwanich e Blaabjerg (2019) avaliou a confiabilidade de Sistemas Fotovoltaicos (PV) integrados com sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) em duas configurações distintas: acoplamento em Corrente Contínua (DC) e Corrente Alternada (AC). Foram analisados os impactos das cargas elétricas e térmicas nos conversores de energia dessas configurações, identificando componentes críticos e investigando a confiabilidade no nível de componente, conversor e sistema. O procedimento incluiu modelagem baseada em perfis de missão reais, utilizando dados de um local de instalação na Alemanha. Um estudo de caso foi conduzido com um sistema PV de 6 kW e uma bateria de 3 kW/7,5 kWh. Os resultados demonstraram que a configuração DC apresenta maior confiabilidade e vida útil, com uma falha acumulada de 15% (B15) ocorrendo 7 anos mais tarde em comparação à configuração AC. Essa diferença deve-se principalmente à menor complexidade da configuração DC, que reduz a exposição de seus componentes a estresses térmicos.

As conclusões apontam que a configuração DC é preferível, considerando a maior confiabilidade e uma relação custo-benefício superior, especialmente em cenários com requisitos de longa duração operacional. O estudo também demonstrou que, embora ambas as configurações tenham taxas de autoconsumo semelhantes, os sistemas AC apresentaram maior taxa de falhas devido à necessidade de um conversor adicional. Essa análise fornece um benchmark valioso para decisões de design e manutenção de sistemas PV-BESS, contribuindo para otimizar a durabilidade e eficiência desses sistemas em diferentes aplicações.

O trabalho de Sandelic e o atual estudo apresentam convergências no objetivo de analisar a confiabilidade de sistemas críticos de energia elétrica e no uso de modelagens avançadas para prever falhas e otimizar o desempenho. Ambos destacam a importância de componentes eletrônicos críticos, como conversores e baterias, e empregam metodologias baseadas em perfis de operação realistas para avaliar impactos de cargas térmicas e elétricas. No entanto, divergem quanto ao foco e ao contexto de aplicação: enquanto Sandelic se concentra em sistemas fotovoltaicos acoplados a baterias, comparando configurações em corrente contínua (DC) e corrente alternada (AC). Este estudo aborda respiradores mecânicos em UTIs, com ênfase

na disponibilidade e eficiência de baterias durante cargas e descargas. Além disso, os estudos utilizam ferramentas analíticas distintas, com Sandelic priorizando modelos de confiabilidade baseados em distribuição de Weibull e o presente estudo adotando redes de Petri estocásticas. Essas diferenças refletem a especificidade de cada aplicação, embora ambos busquem soluções para aumentar a eficiência e a confiabilidade de sistemas essenciais.

O estudo de Nguyen et al. (2021) propôs e implementou uma estrutura de modelagem hierárquica para quantificar a disponibilidade e segurança de infraestruturas de Internet das Coisas Internet das Coisas (IoT) num sistema de saúde, compostas pelos paradigmas integrados de computação em nuvem, névoa e borda. A metodologia foi organizada em três níveis: diagramas de blocos de confiabilidade Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD) no nível superior, árvores de falhas Árvores de Falhas (FT) no nível intermediário e (CTMC) no nível inferior. A estrutura foi aplicada a um estudo de caso envolvendo uma fábrica inteligente baseada em IoT, avaliando componentes críticos como servidores na nuvem, gateways de névoa e dispositivos IoT. A análise incluiu métricas como disponibilidade em estado estacionário, sensibilidade em relação ao tempo médio entre falhas e recuperação, e impactos de ataques cibernéticos na segurança. Os resultados demonstraram que falhas frequentes nos servidores de nuvem impactam severamente a disponibilidade geral, enquanto recuperações rápidas nos componentes de borda aumentam a resiliência do sistema.

As conclusões destacam que a integração eficiente entre os paradigmas de nuvem, névoa e borda é essencial para maximizar a disponibilidade e minimizar vulnerabilidades de segurança em sistemas IoT. Além disso, os componentes de software, como sistemas operacionais e máquinas virtuais, mostraram-se mais suscetíveis a ataques cibernéticos, exigindo medidas de mitigação eficazes. O estudo demonstrou a viabilidade da abordagem hierárquica para prever trade-offs entre disponibilidade e segurança, fornecendo uma base robusta para decisões de design e operação em ambientes críticos de IoT. Essas descobertas são particularmente relevantes para a implementação de fábricas inteligentes e outros cenários de IoT com alta dependência de tempo de atividade e confiabilidade.

O estudo de Nguyen e o presente estudo têm em comum o uso de modelagens avançadas para avaliar a confiabilidade e a disponibilidade de sistemas críticos, bem como na consideração de falhas e estratégias de recuperação como fatores determinantes. Ambos aplicam suas metodologias em sistemas distribuídos e interconectados, com Nguyen focando em infraestruturas IoT compostas por nuvem, névoa e borda, enquanto o presente estudo investiga respiradores mecânicos em UTIs. As divergências estão no escopo e nas métricas analisadas:

Nguyen abrange a integração de paradigmas computacionais e enfatiza o impacto de ataques cibernéticos na segurança, enquanto este estudo avalia a eficiência de baterias em cenários hospitalares, priorizando a disponibilidade operacional em situações críticas. Além disso, Nguyen utiliza uma abordagem hierárquica com RBD, FT e CTMC, enquanto este estudo emprega CTMC e redes de Petri estocásticas para modelagem. Apesar das diferenças de aplicação e enfoque, ambos contribuem para aprimorar a confiabilidade de sistemas essenciais em seus respectivos contextos.

Embora use CTMC, o modelo de Nguyen não se aprofunda na representação de mecanismos de comutação de energia ou nos estados de Cold Standby de equipamentos, nem na dinâmica de carregamento/descarregamento, que são cruciais para a disponibilidade do ventilador e são nativamente representados pela estrutura do SPN.

Reis et al. (2014) criou uma metodologia para administrar (EMAs) na fase de uso, seguindo as diretrizes da Engenharia Clínica e o ciclo de vida das tecnologias em saúde. A proposta contempla um modelo estrutural composto por três módulos: coleta de dados, análise estatística e apoio à tomada de decisões. Para validar a metodologia, foi realizado um estudo de caso em sete estabelecimentos de saúde, incluindo a aplicação de questionários com profissionais da área e a implementação do modelo proposto.

Os resultados evidenciaram a importância de treinamentos periódicos e da padronização das informações nos serviços de saúde. A análise estatística, baseada em modelos de probabilidade paramétricos, especialmente a distribuição de Weibull, demonstrou ser eficaz na definição de intervalos e políticas de manutenção conforme as taxas de falha dos equipamentos.

Como conclusão, o modelo desenvolvido se mostra como uma ferramenta prática e eficaz para apoiar gestores de saúde na melhoria da confiabilidade, disponibilidade e redução de custos operacionais dos EMAs.

Silva et al. (2024) desenvolveu um projeto de sistema de armazenamento de energia para hospitais, com foco na manutenção do funcionamento de setores críticos em situações de falha no fornecimento de energia elétrica. O estudo propôs a utilização de inversores fotovoltaicos híbridos, integrando energia solar como fonte renovável e limpa, aliando sustentabilidade ambiental e economia de energia.

A solução proposta mostrou-se eficaz ao garantir fornecimento confiável de eletricidade de reserva, essencial para evitar consequências graves como a interrupção de cirurgias, falhas em equipamentos médicos e perda de medicamentos refrigerados. Além disso, o sistema permite reduzir a dependência da rede elétrica convencional, promovendo economia financeira e maior

autonomia energética.

Em síntese, o estudo evidenciou que a implementação de sistemas de armazenamento de energia com suporte de fontes renováveis melhora a resiliência hospitalar, fortalece a sustentabilidade das instituições de saúde e contribui para a excelência no atendimento aos pacientes.

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados

Autor(es)	Ano	Objetivo Principal	Metodologia
ARAUJO et al.	2022	Analisar a confiabilidade de monitores multiparâmetros	CHESS-ML e CHESS-SBA
BLAKEMAN; ROBINSON; BRANSON	2010	Analisar a duração das baterias internas de ventiladores em UTIs sob diferentes configurações de ventilação	Teste com pulmão artificial e ventiladores previamente carregados; medição da duração da bateria em diferentes configurações
NGUYEN et al.	2020	Avaliar a disponibilidade e segurança de infraestruturas IoT	Modelagem hierárquica com RBD, FT e CTMC
SANDELIC; SANGWONGWANICH; BLAABJERG	2021	Comparar configurações DC e AC em sistemas PV-BESS	Análise baseada em perfis de missão
REIS et al.	2014	Aplicar a ISO 14971 combinada com a técnica FMECA para especificar a segurança de um equipamento médico (EGG)	Estudo de caso com aplicação de FMECA e modelagem em Redes de Petri Coloridas
SILVA et al.	2024	Implementar sistema de armazenamento de energia com inversores fotovoltaicos híbridos para garantir o funcionamento de setores críticos hospitalares	Aplicação de sistema fotovoltaico híbrido em ambiente hospitalar, com análise de eficiência energética e impacto na continuidade dos serviços

A Tabela 1 apresenta uma análise comparativa de estudos relacionados, destacando os principais objetivos, metodologias e contribuições de cada trabalho. Araujo et al. (2020) estudou a confiabilidade de monitores multiparamétricos em UTIs, usando modelagem em CHESS-ML e CHESS-SBA. Blakeman, Robinson e Branson (2010) investigaram a duração das baterias internas de ventiladores sob diferentes configurações de ventilação em unidades de terapia intensiva, usando testes experimentais com pulmão artificial e ventiladores previamente carregados. Nguyen, Min e Choi (2020) propuseram uma abordagem hierárquica para avaliar a disponibilidade e segurança de infraestruturas IoT, utilizando modelos baseados em RBD, FT e CTMC. Por fim, Sandelic, Sangwongwanich e Blaabjerg (2019) compararam configurações de (DC) e (AC) em sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia, destacando a análise de confiabilidade com base em perfis de missão. A tabela ilustra como cada estudo contribui de maneira única para o entendimento e aprimoramento de sistemas críticos em seus respectivos contextos de aplicação.

A análise dos trabalhos relacionados confirma que o gerenciamento de equipamentos críticos e a avaliação da confiabilidade energética são temas de alta relevância, com o uso crescente

de modelagem matemática e estocástica. Contudo, persiste uma lacuna significativa na aplicação de modelos analíticos que unam, integradamente, a dinâmica de falha e reparo dos múltiplos subsistemas: respirador, circuito, energia, gerador, switch. Com a simulação de estratégias de redundância energética detalhadas e a redundância de equipamentos, tudo em um único modelo formal baseado em Redes de Petri Estocásticas SPN. É exatamente nesta intersecção de complexidade de modelagem e relevância clínica que o presente trabalho se insere, propondo um modelo robusto e viável para auxiliar a tomada de decisão no gerenciamento de ventiladores mecânicos em UTIs, o que será detalhado nos capítulos subsequentes.

4 SISTEMA DO RESPIRADOR

A presente seção procura descrever a estrutura e o funcionamento dos ventiladores mecânicos utilizados em (UTIs), detalhando seus principais componentes físicos, bem como seu papel na manutenção da ventilação assistida em pacientes críticos. Serão apresentados os elementos que compõem o sistema respiratório artificial, como tubos, sensores, alarmes e baterias, contextualizando sua importância clínica e operacional. Essa caracterização técnica é essencial para fundamentar os modelos estocásticos propostos nos capítulos seguintes, permitindo uma representação fiel do comportamento dos equipamentos em diferentes cenários de falha e manutenção.

4.1 A VENTILAÇÃO MECÂNICA

A ventilação mecânica é uma tecnologia essencial no suporte à vida de pacientes críticos, desempenhando um papel vital na manutenção da oxigenação e na remoção do dióxido de carbono quando a função respiratória está comprometida. Seu uso é indispensável em situações como insuficiência respiratória aguda, complicações pós-operatórias e doenças neuromusculares que afetam a capacidade de ventilação espontânea. Além de sua função primária de garantir trocas gasosas adequadas, a ventilação mecânica também permite que os profissionais de saúde ajustem parâmetros específicos para otimizar o suporte respiratório conforme a evolução clínica do paciente. Assim, sua aplicação requer um planejamento cuidadoso, pois tanto a ventilação inadequada quanto sua manutenção prolongada podem gerar complicações, como barotrauma, atelectasia e infecções associadas à ventilação prolongada (BARBAS et al., 2014).

Diante de sua complexidade, a ventilação mecânica envolve um processo dinâmico de monitoramento e ajustes contínuos, a fim de garantir que o suporte ventilatório atenda às necessidades individuais de cada paciente. A escolha entre modos ventilatórios invasivos ou não invasivos, bem como a definição de parâmetros como oxigênio, (PEEP) e (VC), deve considerar não apenas a condição pulmonar do paciente, mas também sua capacidade de adaptação ao suporte mecânico. Além disso, estratégias de ventilação protetora, que minimizam a lesão pulmonar induzida pelo ventilador, são cada vez mais aplicadas, visando reduzir o impacto da ventilação mecânica a longo prazo. A introdução de tecnologias avançadas, como sistemas de inteligência artificial para monitoramento ventilatório e ventiladores mecânicos de última ge-

ração, aprimora a personalização do suporte respiratório, aumentando a segurança e a eficácia do tratamento em UTIs (SEIBERLICH et al., 2011).

Outro aspecto crucial da ventilação mecânica é a transição para a respiração espontânea, conhecida como desmame ventilatório. Esse processo deve ser conduzido com cautela para evitar falhas na extubação (pacientes retirados do tubo, mas que ainda não estavam prontos para manter uma respiração espontânea) e a necessidade de reintubação, que pode resultar em maiores taxas de morbidade e mortalidade (SOUZA; POLTRONIERI et al., 2021). Protocolos baseados em testes de respiração espontânea e avaliação da força muscular respiratória ajudam a determinar o momento ideal para reduzir gradativamente o suporte ventilatório, promovendo uma recuperação segura e eficiente (RANGEL, 2024). A ventilação mecânica, portanto, não é apenas um meio de fornecer suporte respiratório temporário, mas uma intervenção altamente complexa que exige conhecimento técnico especializado, monitoramento constante e estratégias individualizadas para garantir os melhores resultados clínicos.

4.2 ELEMENTOS DO RESPIRADOR

O respirador ou ventilador mecânico é um dispositivo médico projetado para fornecer suporte respiratório a pacientes que não conseguem manter uma ventilação espontânea eficaz. Ele atua promovendo a troca gasosa por meio da insuflação e exsuflação de ar ou mistura gasosa nos pulmões, sendo essencial em situações de insuficiência respiratória, anestesia geral ou em pacientes críticos internados em (UTIs). O funcionamento do ventilador baseia-se na geração de pressões controladas que simulam o processo respiratório natural, podendo operar em modos invasivos ou não invasivos, ajustando parâmetros como volume corrente, frequência respiratória e pressão expiratória final positiva (GOMES; JUNIOR, 2024).

Os elementos podem ser definidos como:

Tubo endotraqueal estabelece uma via aérea segura para pacientes de UTI que necessitam de ventilação mecânica. Os pacientes geralmente têm um tubo endotraqueal (inserido pela boca) ou um tubo de traqueostomia (inserido por uma abertura criada cirurgicamente no pescoço). Esses tubos fornecem gases do ventilador diretamente para os pulmões do paciente, contornando obstruções das vias aéreas superiores ou outras limitações respiratórias (AHMED; BOYER, 2019).

Sistema de monitoramento avalia a eficácia da ventilação. Monitores de saturação de oxigênio (oxímetros de pulso) medem continuamente os níveis de oxigênio no sangue do

paciente. Em contraste, os monitores de CO₂ expirado final fornecem monitoramento em tempo real dos níveis de dióxido de carbono exalado, permitindo uma avaliação precisa da adequação da ventilação. Sensores de pressão e volume integrados ao circuito respiratório monitoram as pressões aplicadas e os volumes correntes fornecidos, auxiliando os profissionais de saúde a otimizar as configurações do ventilador e detectar problemas potenciais prontamente (BERTONI; SPADARO; GOLIGHER, 2020).

Alarmes e recursos de segurança alertam os profissionais de saúde em caso de anormalidades ou emergências. Alarmes de alta ou baixa pressão notificam os cuidadores sobre mudanças significativas na mecânica pulmonar do paciente, enquanto alarmes de desconexão os alertam sobre quaisquer desconexões não intencionais entre o paciente e o ventilador. Além disso, alarmes de apneia podem detectar a falta de esforços respiratórios espontâneos, acionando intervenção imediata (SRINIVASAN et al., 2020).

Painel de controle e a **Interface do usuário** permitem que os profissionais de saúde ajustem os parâmetros de ventilação, monitorem os parâmetros do paciente e revisem tendências. Essas interfaces são projetadas para serem intuitivas e fáceis de usar, fornecendo exibições visuais de informações vitais, como frequência respiratória, volume corrente e saturação de oxigênio. Por meio do painel de controle, os profissionais de saúde podem fazer ajustes precisos nas configurações de ventilação, garantindo o fornecimento de suporte respiratório ideal (NG et al., 2021).

O sistema do respirador discutido neste trabalho fornece ventilação mecânica para pacientes em unidades de terapia intensiva. O sistema consiste em vários componentes que facilitam a respiração de pacientes gravemente enfermos, conforme mostrado na Figura 3. Apresentamos uma visão geral detalhada da estrutura do sistema, incluindo o sistema de alimentação de energia, módulos de bateria e circuito respiratório. Além disso, fornecemos propostas para aumentar a disponibilidade do sistema, o que pode melhorar os resultados dos pacientes e reduzir os custos de saúde.

O sistema de alimentação de energia de um ventilador pulmonar é um componente vital para garantir a continuidade do suporte respiratório, especialmente em emergências. A imagem ilustra de maneira clara os elementos essenciais que compõem essa estrutura.

Utilizamos a cor vermelha na descrição da torre de transmissão que representa a rede elétrica convencional, sendo a principal fonte de energia do sistema. A energia fornecida por essa rede é encaminhada a um módulo de controle e distribuição de energia, que coordena o fornecimento para o ventilador mecânico.

Com a descrição roxa **O Switch** (ou chave de comutação automática), representado na conexão entre as fontes de energia e o ventilador, é um componente responsável pelo chaveamento instantâneo entre as diferentes fontes de energia, garantindo que a alimentação do ventilador não seja interrompida. Quando há queda de energia, o switch detecta a falha e redireciona automaticamente a carga para a fonte de backup (baterias ou gerador), sem necessidade de intervenção manual.

Com a descrição verde destacam-se as **Baterias**, um sistema de gerenciamento energético, com um conjunto de baterias e geradores de reserva. Esses dispositivos são mantidos em espera ativa, ou seja, prontos para entrar em operação automaticamente caso ocorra uma falha na fonte principal de energia.

Com a descrição azul **O ventilador mecânico**, ligado ao paciente por meio de um circuito respiratório, representa o destino desse sistema. Sua operação contínua é assegurada pela arquitetura de redundância energética, com múltiplas camadas de proteção e comutação automática.

Esse arranjo robusto garante que o paciente receba ventilação adequada mesmo durante algumas falhas elétricas, transições de energia ou emergências críticas, reforçando a segurança e a confiabilidade do suporte à vida (RODRIGUES et al., 2012).

A descrição técnica do respirador mecânico permitiu compreender seus principais componentes, funcionalidades e vulnerabilidades. Esse entendimento é essencial para a construção de modelos precisos e para a proposição de estratégias de manutenção e fornecimento energético que garantam a continuidade do suporte ventilatório.

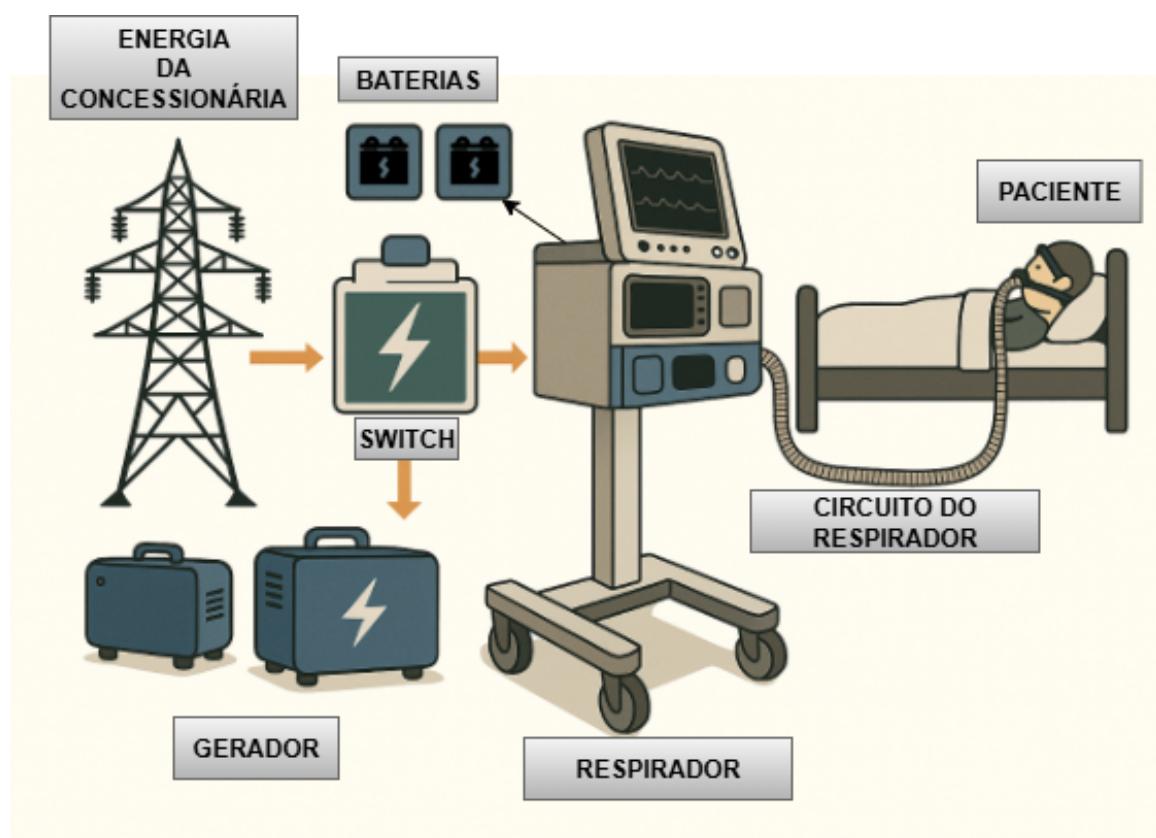


Figura 3 – Infraestrutura do sistema

Imagen gerada pelo ChatGPT e adaptada por (MONTE et al., 2024)

5 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia usada para avaliar o modelo fornecido com base em trabalhos anteriores de (LEE, 1989; MELO et al., 2021). A metodologia proposta apresentada na Figura 4 possui cinco fases divididas em Compreensão do sistema, onde será realizada uma análise detalhada dos componentes individuais que constituem o respirador mecânico; aquisição dos parâmetros é a obtenção dos valores específicos das partes do sistema do ventilador; construção do modelo, com a implementação de parâmetros visando desenvolver um modelo de disponibilidade que represente o sistema do ventilador mecânico de forma mais abrangente, avaliação do modelo e, finalmente, análise dos resultados e recomendações, que apresenta os resultados das avaliações analisadas para identificar potenciais melhorias, e medidas como modificações de design, procedimentos operacionais e implementações de redundância e em cada uma das fases mencionadas serão detalhadas nos subcapítulos subsequentes.

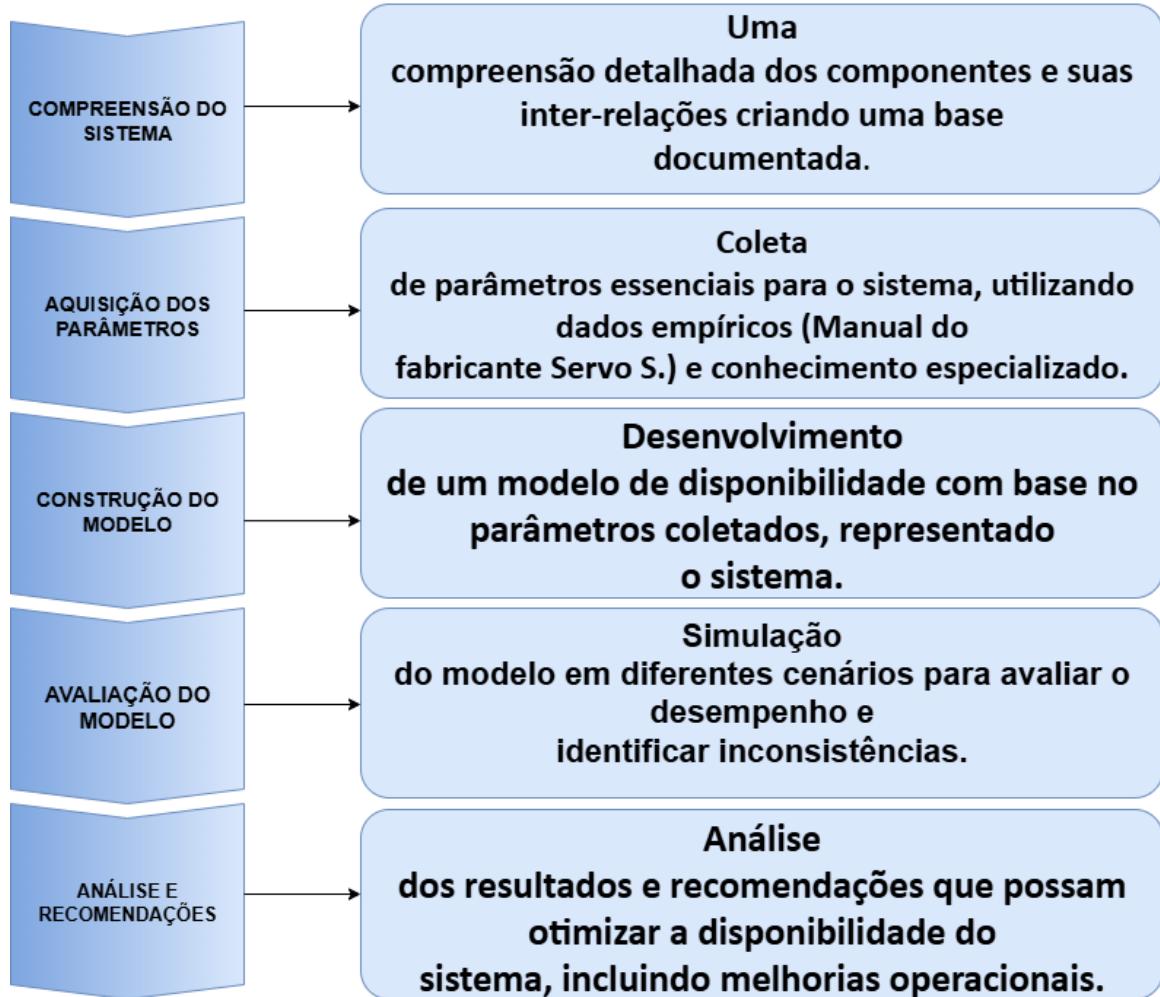


Figura 4 – Fluxograma da Metodologia

5.1 COMPREENSÃO DO SISTEMA

Ao projetar um sistema de ventilação mecânica, é essencial realizar uma análise detalhada de seus componentes. Isso inclui compreender as características, funcionalidades e propriedades de cada elemento que compõe o ventilador mecânico. Essa investigação profunda permite identificar o papel específico de cada componente no sistema, além de suas contribuições individuais para o desempenho geral do equipamento.

Paralelamente, é igualmente importante examinar as inter-relações entre esses componentes. As conexões e interações entre as partes formam a base para entender a dinâmica do sistema todo, abrangendo desde os circuitos de ventilação até as baterias e sistemas de fornecimento de energia. Documentar essa análise em detalhes não só cria um registro valioso para

futuras avaliações, como também estabelece os fundamentos para uma avaliação precisa da eficácia e confiabilidade do sistema de ventilação mecânica.

Entrada: Análise detalhada dos componentes e inter-relações do sistema de ventilação mecânica, incluindo características, funcionalidades, conexões e sistemas de fornecimento de energia.

Saída: Registro documentado das características e inter-relações dos componentes, estabelecendo a base para avaliação da eficácia, confiabilidade e desempenho do sistema de ventilação mecânica.

5.2 AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS

A obtenção dos parâmetros é uma etapa essencial na avaliação de sistemas de ventilação mecânica, uma vez que envolve a identificação de valores específicos associados aos componentes que integram o sistema. Essa fase pode ser realizada por meio de diferentes métodos, como experimentação prática, coleta de dados empíricos ou consulta a especialistas na área. A precisão desses valores é determinante, ao influenciar diretamente o comportamento e o desempenho do modelo desenvolvido, tornando-o uma representação fiel do sistema real.

Para garantir a confiabilidade do modelo, é importante que a abordagem de coleta de parâmetros seja cuidadosamente planejada. Testes práticos e medições realizadas no sistema em operação podem fornecer dados reais e relevantes, enquanto a coleta de informações em ambientes operacionais reais oferece uma perspectiva mais ampla sobre o desempenho do sistema em condições práticas. Adicionalmente, a consulta a especialistas pode complementar as informações com percepções técnicas e específicas. Independentemente do método adotado, a obtenção de parâmetros precisos assegura que o modelo reflita a realidade que as avaliações subsequentes sejam fundamentadas e úteis para decisões bem-informadas.

Entrada: Coleta de parâmetros específicos do sistema de ventilação mecânica, obtidos por experimentação prática, dados empíricos ou consulta a especialistas.

Saída: Parâmetros precisos e confiáveis, fundamentais para a construção de um modelo representativo e para avaliações subsequentes do desempenho do sistema de ventilação mecânica.

5.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Após a etapa de obtenção dos parâmetros, inicia-se a fase de construção do modelo, na qual um modelo de disponibilidade é desenvolvido com base nas informações coletadas anteriormente. Este modelo é fundamental para representar de forma abrangente o sistema de ventilação mecânica, capturando suas principais características e comportamentos. A construção exige a seleção de uma técnica de modelagem adequada, considerando a complexidade do sistema, e a definição clara de seus limites, especificando quais componentes serão incluídos ou excluídos. Além disso, é crucial estabelecer as inter-relações entre os elementos, garantindo que o modelo seja uma representação fiel e funcional da estrutura do sistema.

A avaliação do modelo é conduzida a partir de simulações que consideram diferentes cenários de operação, incluindo condições normais, influências externas e falhas potenciais. Essa abordagem permite analisar o desempenho, a confiabilidade e a disponibilidade do sistema em uma variedade de situações. Os resultados obtidos são úteis para identificar áreas de melhoria, otimizar configurações e embasar decisões relacionadas à implementação prática. Assim, essa fase traduz os dados coletados em uma ferramenta analítica robusta, capaz de prever o comportamento do sistema em condições reais e apoiar ações estratégicas para sua melhoria e eficiência.

Entrada: Parâmetros coletados e informações prévias sobre o sistema de ventilação mecânica, incluindo limites do sistema e relações entre os componentes.

Saída: Modelo de disponibilidade desenvolvido, representando o sistema de ventilação mecânica, com avaliação de desempenho, confiabilidade e áreas de melhoria.

5.4 AVALIAÇÃO DO MODELO

A etapa de Avaliação do Modelo é um momento crítico no processo de desenvolvimento, ao envolver a análise detalhada da funcionalidade e precisão do modelo criado. Nesse estágio, diferentes cenários são simulados para verificar como o modelo responde a condições variadas, incluindo situações normais de operação, falhas de componentes e fatores externos que podem afetar o desempenho. Essas simulações ajudam a testar a capacidade do modelo de refletir o comportamento real do sistema de ventilação mecânica, validando sua representatividade e sua utilidade como ferramenta de análise.

A avaliação do modelo permite identificar possíveis discrepâncias ou inconsistências entre

a simulação e o comportamento esperado do sistema real. Com base nos resultados obtidos, ajustes podem ser realizados no modelo para corrigir falhas ou melhorar sua precisão. Essa fase também é essencial para avaliar a robustez do sistema em diferentes condições e identificar áreas que necessitam de otimização. Ao final dessa etapa, o modelo avaliado oferece uma base confiável para tomada de decisões e para o planejamento de melhorias no sistema analisado.

Entrada: Modelo desenvolvido e cenários definidos para simulações, incluindo condições operacionais normais, falhas e influências externas.

Saída: Resultados das simulações, identificando desempenho, inconsistências, robustez e áreas de melhoria no modelo avaliado.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES

A etapa final do processo consiste em analisar os resultados e fornecer recomendações para melhorar a disponibilidade do sistema de ventilação mecânica. Essa fase começa com uma análise detalhada dos resultados da avaliação, identificando lacunas e áreas com potencial para aprimoramento. Com base nas deficiências observadas, são elaboradas propostas específicas, que podem incluir ajustes no design do sistema para corrigir aspectos críticos que afetam sua disponibilidade. Além disso, podem ser sugeridas modificações nos procedimentos operacionais, visando tornar a operação do sistema mais eficiente e estável em diferentes condições de uso.

Outra estratégia importante envolve a introdução de medidas de redundância, como a inclusão de componentes redundantes ou sistemas de backup. Essas ações ajudam a reduzir o impacto de falhas inesperadas, assegurando maior confiabilidade e continuidade operacional. O objetivo central dessas recomendações é otimizar o desempenho e a confiabilidade do sistema, alinhando-o às demandas operacionais e minimizando riscos potenciais. Com essas melhorias, busca-se garantir que o sistema esteja preparado para atender às necessidades de maneira consistente e eficaz.

Entrada: Resultados da avaliação do modelo, incluindo identificação de lacunas, deficiências e áreas com potencial de melhoria no sistema.

Saída: Recomendações para otimizar a disponibilidade, incluindo ajustes no design, melhorias operacionais e implementação de redundâncias para maior confiabilidade.

A metodologia proposta foi estruturada para garantir a fidelidade entre os modelos matemáticos e o comportamento real dos ventiladores mecânicos. Cada etapa foi pensada para assegurar rigor técnico, replicabilidade e aplicabilidade dos resultados em ambientes hospita-

lares reais.

6 MODELOS

Nesta seção, abordaremos a modelagem matemática em (SPN) como ferramenta de apoio para tomada de decisão, aplicada a diversos contextos para resolver problemas complexos. Essa abordagem foi escolhida em detrimento de outros formalismos como as (CTMC), que, embora adequadas para modelar sistemas estocásticos, podem resultar em uma explosão no número de estados quando aplicadas a sistemas com múltiplos estados e comportamentos concorrentes, tornando a análise computacionalmente inviável. (MACIEL, 2023c; MACIEL, 2023b).

A modelagem matemática é uma abordagem analítica que se baseia em conceitos, técnicas e métodos matemáticos para representar e compreender o comportamento de sistemas reais. Podemos simular cenários, prever resultados e avaliar estratégias sem a necessidade de experimentação direta.

O modelo proposto baseia-se em pressupostos fundamentais para a aplicação da modelagem estocástica, assumindo que (MTTF) (MTTR) seguem distribuições exponenciais. Essa escolha implica que falhas e reparos ocorrem de forma aleatória, com taxa constante e sem memória, conforme os princípios dos processos de Poisson uma abordagem compatível com cadeias de Markov e Redes de Petri Estocásticas. Além disso, considera-se que os equipamentos operam de forma independente e que o sistema está em regime permanente, com dispositivos tecnicamente idênticos e disponibilidade tratada de forma binária (funcional ou com falha).

Outro conjunto de hipóteses relevantes inclui a suposição de que os processos de manutenção corretiva se iniciam imediatamente após a ocorrência de falhas, sem restrições logísticas ou operacionais, como filas ou indisponibilidade de recursos. Essas simplificações visam facilitar a construção e análise do modelo, embora não representem todas as nuances dos ambientes hospitalares reais. Tais limitações são reconhecidas no estudo e indicam a necessidade de futuros aprimoramentos com dados empíricos mais robustos e estruturas probabilísticas mais realistas.

6.1 MODELO DE DISPONIBILIDADE COM DINÂMICA DE BATERIAS - SPN

O modelo correspondente à Fonte de Alimentação de Energia é composto por: Concessionária (UT) (Utility), representado por NUT, que pode ser up (UTU) ou down (UTD); Gerador (G) (Gerador), que pode estar up (GU) ou down; ou off-line (GO); e o Switch (SW) (Switch)

que pode estar up (SWU) ou down (SWD). Apenas a guarda correspondente à UTU possui tipo de serviço **ISS** (semântica de serviço infinita). As demais guardas do sistema fonte de energia possuem tipo de serviço **SSS** (semântica de serviço único).

O modelo correspondente ao Respirador Lung Respirador Lung (RL) é composto pelos seguintes componentes:

- Dois módulos de Bateria Módulos de Baterias (BT) representados por NB, que podem estar: Descarregadas (BAUC); Em carregamento (BALI) e assumimos que a partir desta fase, pode apresentar defeitos e ir para o estado Down (BALID); Carregado (BAC) e Baixo (BACD); e disponível para uso (BAU) ou Down (BAD);
- O RL, representado por NR, pode estar up (RLU) ou down (RLD) quando há defeitos por manutenção da máquina, ou pode estar down por falha na fonte de energia (RLED);
- E o Circuito Respiratório (BC) (Circuito Respiratório), circuito de silicone que conecta o paciente ao Respirador, pode estar up (BCU) ou down (BCD). Todas as transições do sistema do respirador possuem tipo de serviço Infinity Server ISS. Todas as transições têm a mesma prioridade 1.

Na Figura 5 apresentamos um modelo representando a melhoria inicialmente sugerida para o sistema em estudo. Essa melhoria foi identificada após avaliações de cenário para identificar o gargalo. Posteriormente, aumentamos com sucesso a disponibilidade do sistema através da implementação de um respirador Cold-Standby (AZARON et al., 2006).

A imagem na Figura 6 ilustra de forma simplificada a arquitetura do sistema de alimentação elétrica de um respirador mecânico, conforme descrito no modelo de performabilidade discutido anteriormente. À esquerda, observa-se a fonte primária de energia (Utility), conectada a um sistema de chaveamento automático (Switch), que também é vinculado a um gerador auxiliar (G). Esse comutador garante que, em caso de falha na rede elétrica principal, a energia proveniente do gerador seja automaticamente direcionada ao sistema. Os módulos de baterias, representados ao centro, funcionam como reserva energética para manter a operação contínua do respirador em situações de falha. À direita da imagem, encontram-se o respirador padrão e um respirador de backup, ambos dependem do fornecimento estável de energia para assegurar o suporte ventilatório ao paciente. Esta representação gráfica sintetiza a lógica do modelo teórico e destaca a importância da redundância energética e da comutação automática na manutenção da disponibilidade do sistema em ambientes hospitalares.

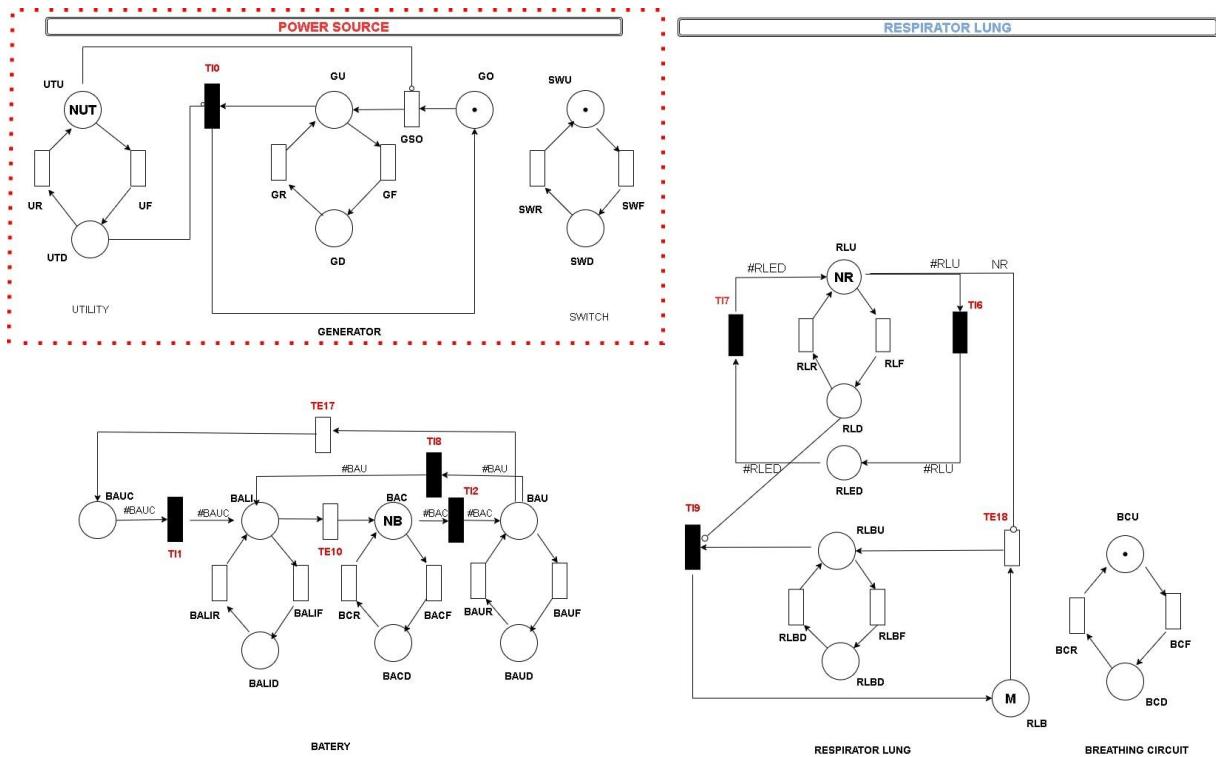


Figura 5 – Modelo de Performabilidade

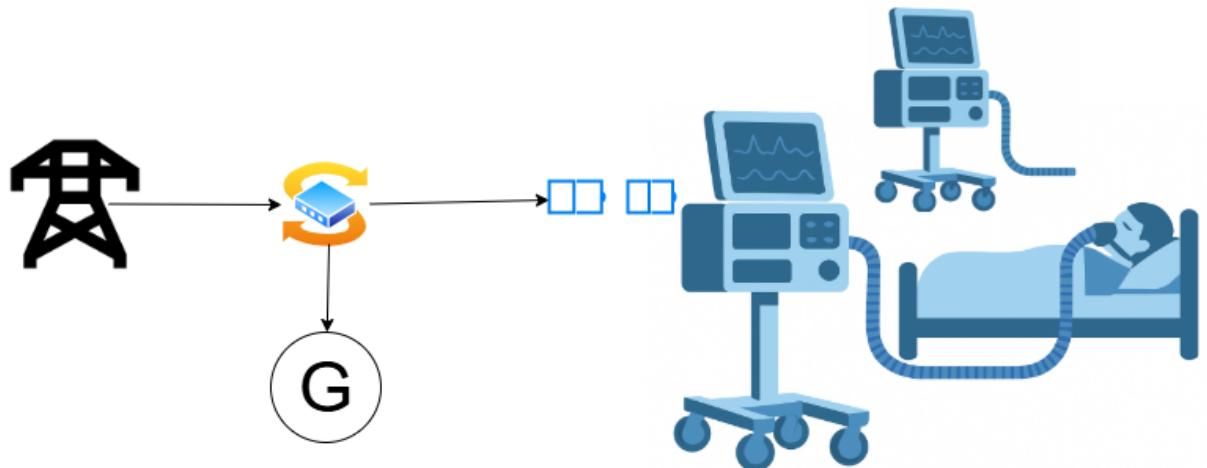


Figura 6 – Arquitetura Simplificada

Como resultado, podemos observar um aumento na disponibilidade e uma redução no tempo de inatividade. Quando o sistema identifica um RL indisponível por falha de manutenção, o RL backup assume o Respirador Lung Backup (RLB) (Respirator Lung Backup) representado por **M** sem paralisar o serviço de ventilação mecânica na UTI. Para isso, sugerimos 1 RLB ($M=1$) para cada 10 RLs. Recomendamos também aumentar o número de módulos de bateria para otimizar o atendimento em casos de indisponibilidade do RL por problemas na fonte de alimentação; neste sentido, sugerimos para cada 1 RL, 2 RN, totalizando 20 baterias para 10 Respiradores pulmonares. Utilizamos uma variável representada por **N** para determinar o número mínimo de respiradores em operação. A Tabela 2 apresenta a guarda das transições.

O SPN comprehende 22 lugares: UTU; UTD; GU; GD; GO; SWU; SWD; BCU; BCD; BAUC; BALI; BAC; BAU; RLU; RLD; RLED; RLBU; RLBD e RLB; 22 transições temporizadas e sete transições imediatas. As transições temporizadas GR; GF; GSO; SR; SF; BCR; BCF e TE18 possuem semântica Single Server (SSS), enquanto todas as transições imediatas têm prioridade 1.

No modelo estocástico, os arcos estabelecem as conexões funcionais e lógicas entre os componentes do sistema, descrevendo tanto o fluxo físico como a energia proveniente da concessionária de energia, do gerador e das baterias, bem como o fluxo ventilatório entre respiradores, circuito respiratório, fluxo de informações e condições operacionais. Os arcos normais transportam efetivamente recursos, deslocando tokens que representam a disponibilidade ou o uso desses elementos no sistema. Os arcos de multiplicidade indicam quantos tokens são consumidos ou gerados em determinados locais. No caso de arcos inibidores, indica quantos tokens um local deve ter para que uma transição não seja ativada. Todos os arcos que tiverem multiplicidade representados por número de tokens de lugares específicos, ex: #UC, #C, irão consumir todos os tokens desses lugares a cada disparo das transições.

Um token no local UTU indica que uma fonte de alimentação está disponível. O disparo da transição UF representa a falha de uma concessionária de energia. O disparo desta transição remove um token do local UTU e armazena um token no local UTD. Este novo token ativa a transição TI6 e seu disparo adiciona dez tokens à transição RLED. A transição RLED indica que o respirador não está funcionando devido a uma falha no sistema de energia. Este local permite a transição do TI2, e seu disparo armazena vinte tokens no local BAU. O local BAU indica que os módulos de bateria estão em modo de uso. Portanto, a transição TI7 é habilitada e, quando a transição TI7 é acionada, dez tokens retornam ao local RLU. O local RLU indica que o respirador está disponível.

Tabela 2 – Transições e Guardas Modelo

Nome	Transições	Guardas
T11	Transição Imediata	$(UTU > 0) \vee (GU > 0) \wedge (SWU = 1) \wedge (UC > 0)$
T12	Transição Imediata	$(UTU = 0) \wedge (GU = 0) \vee (SWU = 0) \wedge (C > 0)$
T16	Transição Imediata	$(UTU = 0) \wedge (GU = 0) \vee (SWU = 0) \wedge (U = 0) \wedge (RLU > 0)$
T17	Transição Imediata	$(UTU > 0) \vee (GU > 0) \wedge (SWU = 1) \vee (U > (NR) \wedge (RLED > 0))$
T18	Transição Imediata	$(UTU > 0) \vee (GU > 0) \wedge (SWU = 1) \wedge (U > 0)$
T10	Transição Temporisada	$(UTU > 0) \vee (GU > 0) \wedge (SWU = 1)$
RLR	Transição Temporisada	$(UTU > 0) \wedge (GU > 0) \vee (SWU = 1) \wedge (BAU > 0)$

Além disso, quando ocorre uma falha na rede elétrica, o respirador pode retomar a operação através do gerador de energia. O local GO indica que o gerador está offline, enquanto o local GU indica que o gerador está disponível. A transição do GSO entre os locais GO e GU representa o momento de acionamento do gerador.

Quando o sistema de energia retoma a operação, um token retorna ao local UTU. Com o retorno da concessionária de energia, a transição TI8 é habilitada. Ao habilitar a transição TI8, os 20 tokens anteriormente na posição BAU retornam à posição BALI indicando que as baterias estão em modo de carregamento. Com os tokens na posição BALI, a transição TE10 é habilitada, e quando disparada, os tokens da posição BALI para a posição BAC que indica que as baterias estão carregadas, individualmente até o total de 20 tokens. O disparo da transição RLF representa a falha de um respirador devido a problemas relacionados ao uso. O disparo desta transição remove um token do local RLU e armazena um token no local RLD. Este novo token habilita a transição TE18; seu disparo remove um token do local RLB e adiciona um no local RLBU. O local RLB representa o respirador de reserva em Cold Standby. O local RLBU representa o respirador de reserva disponível.

Um token no local da BCU indica que um circuito respiratório está disponível. O disparo da transição BCF representa a falha de um circuito respiratório. Iniciar a transição BCF adiciona um token no local BCD. Mais uma vez, este local habilita a transição RLF, que, ao ser acionada, adiciona um token no local RLD, pois o respirador só fica disponível quando o circuito respiratório está disponível. Este local habilita novamente a transição TE18, que, quando disparada, adiciona um token no local RLBU. A transição TI9 retorna o token do local RLBU para o local RLB.

A expressão 6.1 se refere à disponibilidade do sistema. A expressão mostra que o sistema estará disponível quando a probabilidade do RLU do respirador padrão mais o RLBU do respirador reserva for maior ou igual a N, E o circuito respiratório maior que zero.

$$A = P((RLU + RLBU) \geq N) \wedge (BCU > 0)) \quad (6.1)$$

A expressão 6.2 se refere ao tempo que o sistema passa inativo. Usamos (1-) probabilidade de que o RLU do respirador padrão mais o RLBU do respirador reserva seja maior ou igual a N, o circuito respiratório seja maior que zero, vezes o tempo (h).

$$DTyh = (1 - P(((RLU + RLBU) \geq N) \wedge (BCU > 0))) \times T \quad (6.2)$$

A expressão 6.3 se refere ao número de “9” contido no cálculo de disponibilidade do sistema. Esta expressão começa com o logaritmo negativo, $1 - (a \text{ probabilidade de disponibilidade do sistema})$, incluído na expressão 6.1.

$$N9s = -LOG(1 - P(((RLU + RLU) \geq N) \wedge (BCU > 0))) \quad (6.3)$$

Com base na modelagem desenvolvida e nas definições formais apresentadas, torna-se possível realizar simulações que representam o comportamento operacional dos ventiladores mecânicos em diferentes contextos de uso e falha. A estrutura do modelo permite avaliar o impacto de estratégias de redundância, falhas em componentes críticos e tempos de reparo na disponibilidade do sistema como um todo. No capítulo seguinte, são apresentados estudos de caso que aplicam este modelo a diferentes cenários operacionais, possibilitando uma análise comparativa dos resultados e a identificação de configurações mais eficientes para garantir a continuidade do suporte ventilatório em ambientes hospitalares de alta criticidade.

7 ESTUDO DE CASOS

Nesta sessão, podemos analisar oito cenários distintos utilizando o modelo de disponibilidade de respiradores com base nas dinâmicas das baterias. Os valores dos componentes do sistema *Respirator Lung* foram retirados do documento (JASPER, 2022), um manual operacional Servo S, onde foram obtidos os parâmetros adotados. Conforme o manual, calcula-se que um tempo normal de funcionamento no espaço de um ano corresponde a cerca de 5000 horas de funcionamento. A partir disto, assumimos valores como MTTF e MTTR dos ventiladores. Além disso, o documento também especifica que: as baterias assumem automaticamente o funcionamento do ventilador quando a energia é interrompida. O tempo de funcionamento das baterias é de meia hora cada módulo, e as baterias descarregadas precisam de 3h de carga cada módulo.

Os cenários foram gerados pela análise estacionária .Utilizamos a ferramenta Mercury para o processo (MACIEL et al., 2017). A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados para alimentar o modelo proposto.

Tabela 3 – Metricas e Parâmetros

Componentes	Métricas	Valores (h)
Tempo	T	8760
Energia	MTTF UT	687.24
	MTTR UT	4
Gerador	MTTF G	1500
	MTTR G	8
Switch	MTTF SW	8000
	MTTR SW	4
Baterias	MTTF BAT	1600
	MTTR BAT	168
	TTDCBA	0.5
	TTLBA	3
Respirador	MTTF RL	5000
	MTTR RL	168
	MTSO RLB	0.5
Circuito	MTTF BC	8000
	MTTR BC	4

7.1 1º CENÁRIO

Este cenário descreve o sistema de linha de base correspondente ao modelo usual que consiste em uma concessionária, um gerador, um switch, dois módulos de bateria, um respirador pulmonar e um circuito respiratório. O modelo se torna uma linha de base com os seguintes parâmetros: $NR=1$, $NB=2$ e $M=0$. Cada módulo de bateria leva 3 horas para carregar ($TTLB = 3$) e tem meia hora de operação ($TTDCB = 0,5$). As baterias assumem o controle quando não há fornecimento de energia da concessionária e do gerador, o switch não está funcionando e os módulos de bateria estão carregados. Neste cenário consideramos o tempo de reparo do respirador $MTTRRL = 168hs$. A notação correspondente é expressa na Eq. 7.1.

$$(UTU > 0) \wedge (GU > 0) \vee (SWU = 1) \wedge (BAU > 0) \quad (7.1)$$

Nesta perspectiva, sempre que a energia for restaurada, os componentes retornam automaticamente ao modo de carregamento (BAUC). Assim, a Disponibilidade é de $A = 0,9665821$ e o tempo de inatividade de $DTyh = 292,740$.

7.2 2º CENÁRIO

Neste cenário, o sistema funciona com os mesmos componentes: um utilitário, um gerador, um switch, dois módulos de bateria, um respirador e um circuito respiratório. Foi proposto um diminuição no tempo de reparo do RL MTTRRL de 168 h para 24 h, o que promoveu um aumento na disponibilidade em $A = 0,9942876$ e uma redução no tempo de inatividade em $DTyh = 50,040569$.

A redução do MTTR pode ser obtida por meio de um sistema de manutenção preventiva, um serviço de reparo eficiente e um estoque adequado de peças de reposição. Isso significa que o respirador poderá funcionar por mais tempo com menos interrupções no serviço.

7.3 3º CENÁRIO

Este cenário apresenta a proposta de um **RL** adicional, trabalhando como um **RLB** backup em um sistema cold standby, ou seja, o **RLB** só estará disponível assumindo ventilação mecânica uma vez que uma falha do padrão **RL** seja identificada. Queremos dizer 1 **RLB** para cada 10 **RL's** representados por **NR**. Usamos a variável **N** para representar o número mínimo de respiradores em operação. Assim, num ambiente de UTI de 20 leitos com um **RLB**, pode-se reduzir o tempo de inatividade do serviço. Com este cenário, apresentamos um aumento na disponibilidade do sistema para $A = 0,9989537$ e, consequentemente, uma redução no tempo de inatividade para $DTyh = 9,164914$.

O gráfico comparativo 7 aborda de forma ilustrativa as alterações em porcentagem na disponibilidade e no Downtime do sistema com as recomendações a cerca da otimização no tempo de reparo do respirador, e redundância.

As notações correspondentes são expressas em Eq. 6.1, 6.2, e 6.3.

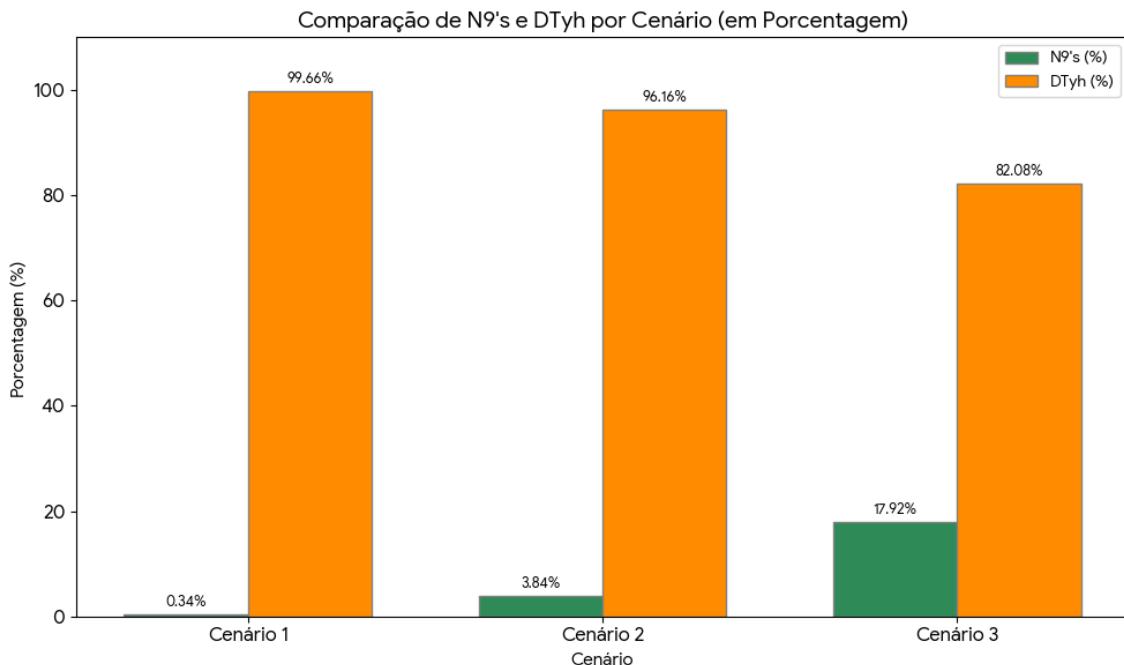


Figura 7 – Disponibilidade-DTyh Cenários 1,2 e 3

7.4 4º CENÁRIO

Este cenário descreve a proposta de até 5 respiradores funcionando simultaneamente representados por **N**, sem o respirador reserva, e pudemos observar que quanto maior a necessidade de funcionamento simultânea, a disponibilidade vai diminuir e o tempo de inatividade aumentar, com o pior cenário se apresentando quando há necessidade de 5 respiradores funcionando, onde o tempo de inatividade pode chegar a mais de 215 horas por ano. Os resultados de disponibilidade são mostrados na Tabela 4.

Na Figura 8 é possível observar que a partir do quarto respirador há uma diminuição de N9s. Essa redução está diretamente relacionada ao aumento do RL, resultando em menor disponibilidade. Além disso, é importante destacar que quanto maior o número de equipamentos, maior a probabilidade de falhas. Nesse contexto, simulações estocásticas desempenham um papel crucial, permitindo uma análise de desenvolvimento com menor custo econômico. Dessa forma, é possível perceber que artigos futuros podem se beneficiar dessa modelagem para criar novos ambientes de teste.

Tabela 4 – Cenário 4

N	Disponibilidade	Inatividade/a/h	N9's
1	0,9990602	8,232355	3
2	0,9990601	8,233194	3
3	0,9990589	8,243681	3
4	0,9988340	10,21371	2
5	0,9754237	215,2880	1

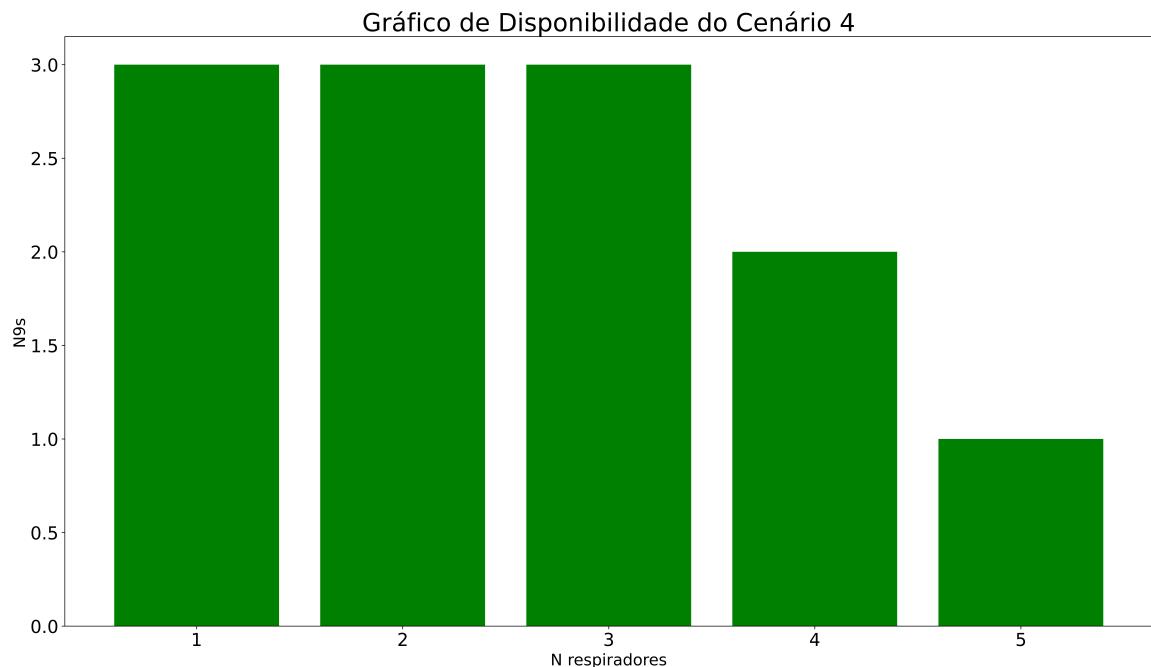


Figura 8 – Disponibilidade — Cenário 4

7.5 5º CENÁRIO

Este cenário descreve um experimento de até 5 respiradores funcionando simultaneamente representados por **N**; porém, desta vez **com** o respirador reserva funcionando. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5. Na Figura 9 é possível observar que a partir do quinto respirador, há uma diminuição de N9s, no entanto, se comparado com o 4º Cenário, a Disponibilidade Downtime para os 5 respiradores funcionando é de quase 200 horas a menos do que sem o respirador reserva, o que impacta diretamente na sobrevivência das pessoas.

Tabela 5 – Cenário 5

N	Disponibilidade	Inatividade/a/h	N9'S
1	0,9990705	8,141904	3
2	0,9990601	8,233395	3
3	0,9990599	8,234620	3
4	0,9990578	8,253454	3
5	0,9983005	14,88758	2

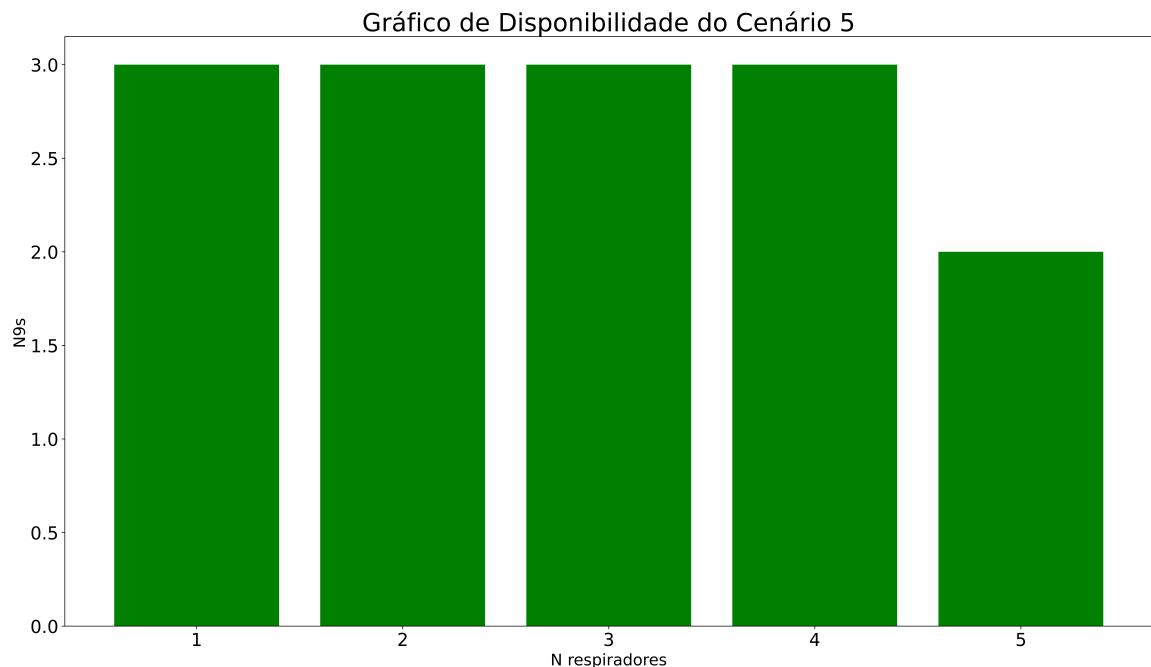


Figura 9 – Disponibilidade - Cenário 5

O gráfico a seguir 10 faz uma comparação entre os respiradores que estão funcionando simultaneamente nos cenários 4 e 5. Sendo o cenário 4 representado pela barra verde, sem um respirador reserva, e o cenário 7 representado pela barra laranja, com o respirador reserva. Dessa forma observamos um aumento na disponibilidade do sistema com o respirador reserva.

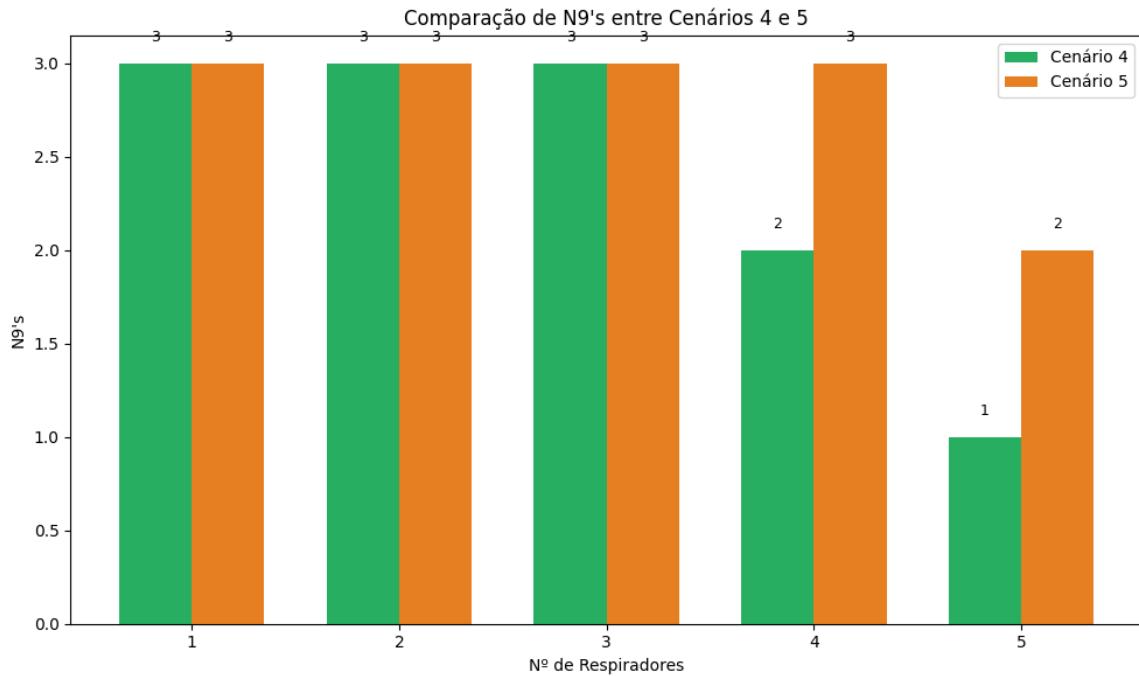


Figura 10 – Cenário 4 e 5

7.6 6º CENÁRIO

Este cenário descreve um experimento de até 10 respiradores funcionando simultaneamente, representados por **N**, com pelo menos 7 em operação. O Respirador reserva não é utilizado. Os resultados são apresentados na Tabela 6. Na Figura 11 é possível observar que quando se tem a necessidade mais de 9 respiradores simultâneos, há uma diminuição de N9s, com um disponibilidade menor e, consequentemente, um Tempo de Inatividade maior, chegando a mais de 400 horas por ano de inoperação, que quando avaliado sob a perspectivas que são equipamentos que mantém pessoas vivas, é um impacto bastante considerável.

Tabela 6 – Cenário 6

N	Disponibilidade	Inatividade/a/h	N9'S
7	0,9990598	8,236012	3
8	0,9990470	8,347778	3
9	0,9980594	16,99878	2
10	0,9523467	417,4428	1

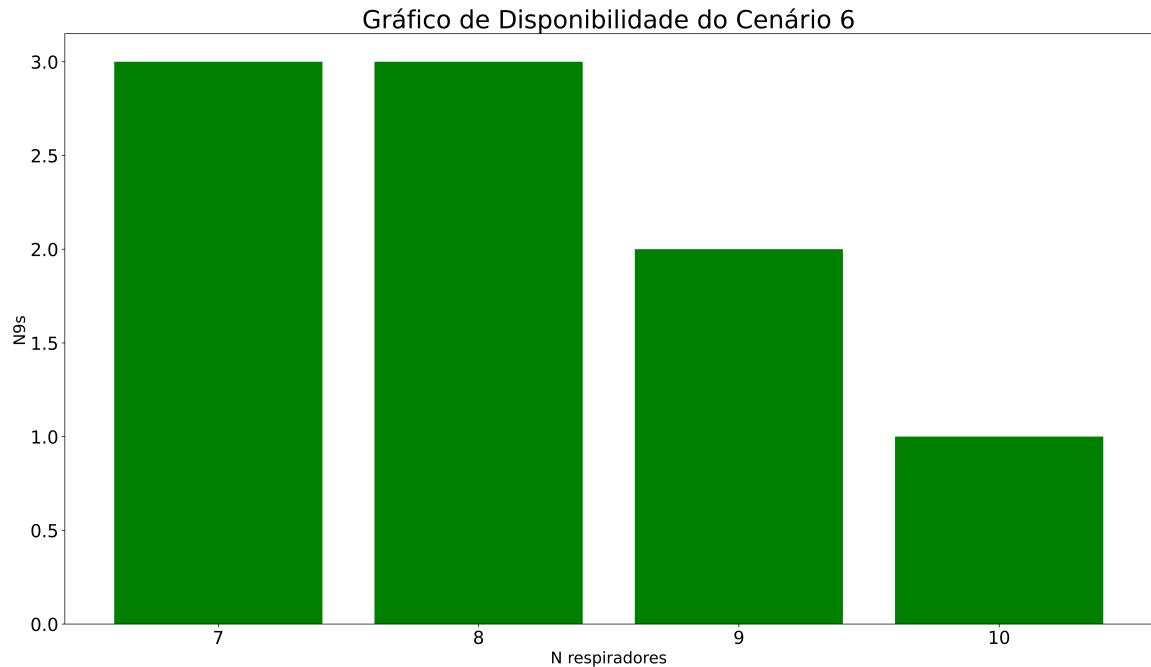


Figura 11 – Disponibilidade — Cenário 6

7.7 7º CENÁRIO

Este cenário descreve um experimento de até 10 respiradores funcionando simultaneamente, representados por **N** com pelo menos 7 deles trabalhando variando até a necessidade de ter 10 funcionando simultaneamente **com** o uso do Respirador reserva. Os resultados são mostrados na Tabela 7 e Figura 12, é possível observar que a partir da necessidade dos 10 respiradores funcionando simultaneamente, há uma diminuição de N9s. Destaca-se, também, que quando comparado ao Cenário 6 a melhora no tempo de Inatividade é expressiva, indo de uma indisponibilidade de 417horas, sem o reserva, para 26horas quando se tem um respirador reserva.

Tabela 7 – Cenário 7

N	Disponibilidade	Inatividade/a/h	N9's
7	0,9990595	8,238470	3
8	0,9990591	8,241582	3
9	0,9990423	8,388913	3
10	0,9970161	26,13872	2

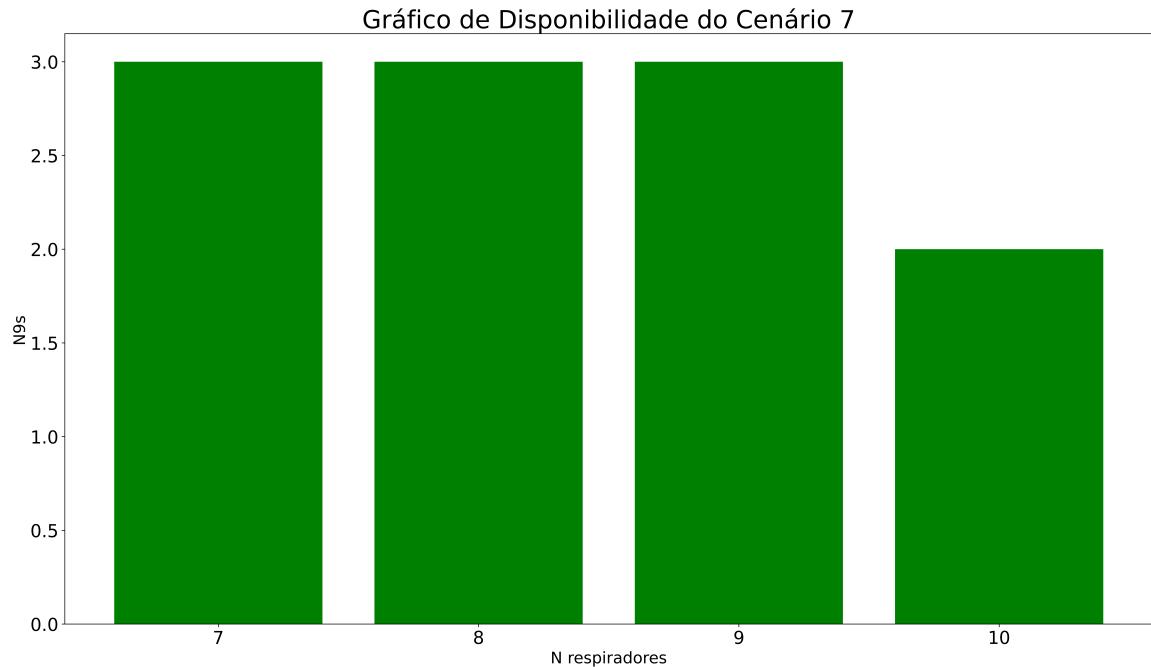


Figura 12 – Disponibilidade — Cenário 7

O gráfico 13 faz uma comparação entre os respiradores que estão funcionando simultaneamente nos cenários 6 e 7. Sendo o cenário 6 representado pela barra verde, ou seja, sem um respirador reserva, e o cenário 7 representado pela barra laranja, com o respirador reserva. Observamos um aumento na disponibilidade do sistema com o respirador reserva.

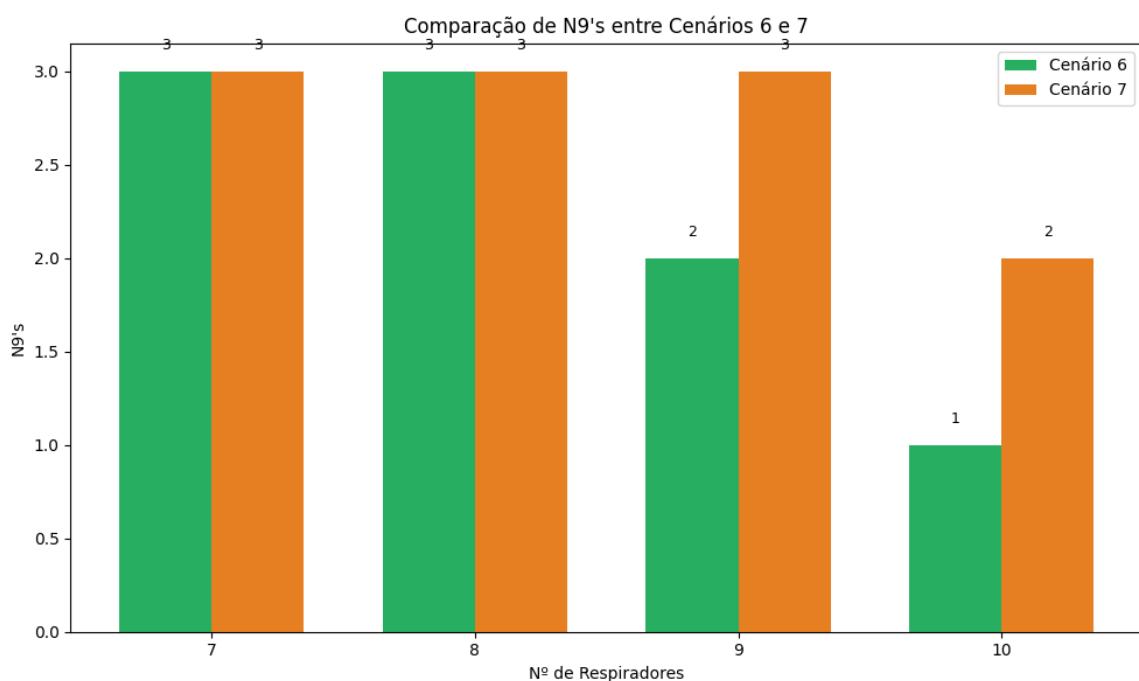


Figura 13 – Cenário 6 e 7

7.8 8º CENÁRIO

Este cenário descreve a mesma configuração do cenário 3 no entanto, sugerimos alterar os tempos do módulo de bateria, com um aumento no tempo de execução e uma diminuição no tempo de carga: TTTLB de 3,0 para 0,5 horas e TTDCB de 0,5 para 3,0 horas. Obtivemos um aumento na disponibilidade para $A = 0,9993363$ e uma redução no tempo de inatividade para $DTyh = 5,813390$

Entretanto, nesses oito cenários, observamos uma melhora gradual no desempenho do serviço oferecido pelo respirador. Começamos o primeiro cenário descrevendo o funcionamento usual do sistema RL. Sugerimos mudanças ao longo dos outros cenários em relação ao MT-TRRL, RLB e temporização dos módulos de bateria. Essas mudanças impactaram positivamente o desempenho do sistema RL, com aumento do tempo disponível e redução do tempo offline. Do primeiro ao oitavo cenário final, obtivemos aumento zero para três N9s. Do primeiro cenário ao último, obtivemos redução de mais de 286h. Os respiradores passam menos tempo indisponíveis, proporcionando um serviço hospitalar mais seguro, com menos interrupções durante a ventilação mecânica e maior probabilidade de sobrevivência do paciente.

A Tabela 8 apresenta o número de componentes em cada cenário, representados pelos valores de \mathbf{X} , e os parâmetros alterados durante as simulações. O gráfico de barras na Figura 14 mostra as disponibilidades de cada cenário. É possível perceber uma relação de melhora na disponibilidade com um aumento no número de respiradores.

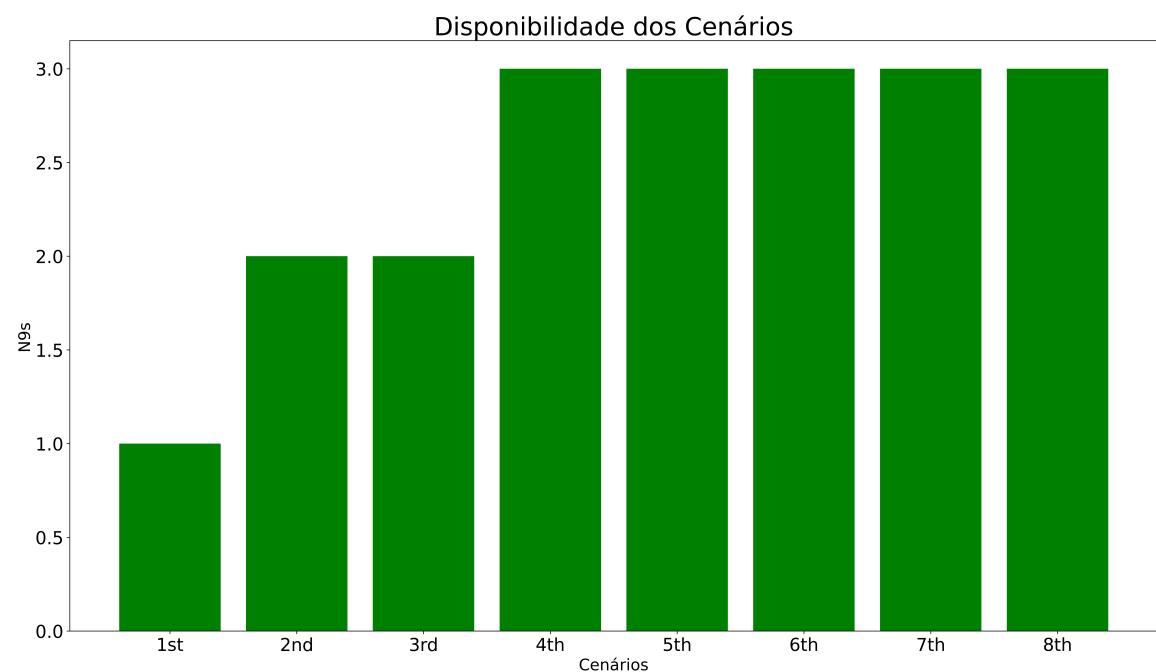


Figura 14 – Disponibilidade dos Cenários

Tabela 8 – Todos os Cenários

Cenários	Energia	Gerador	Switch	Baterias	TTDCBA (h)	TTLBA (h)	Respirador	MTTRRL (h)
1 st	X	X	X	XX	0.5	3.0	X	168.0
2 nd	X	X	X	XX	0.5	3.0	X	24.0
3 rd	X	X	X	XX	0.5	3.0	XX	24.0
4 th	X	X	X	XX	0.5	3.0	1/5	24.0
5 th	X	X	X	XX	0.5	3.0	1/5	24.0
6 th	X	X	X	XX	0.5	3.0	7/10	24.0
7 th	X	X	X	XX	0.5	3.0	7/10	24.0
8 th	X	X	X	XX	3.0	0.5	XX	24.0

A Tabela 9 oferece uma análise de sensibilidade dos componentes do sistema usando a técnica de diferenciação percentual descrita na Eq. 2.7. Apresentamos uma classificação de sensibilidade destacando o impacto de cada parâmetro na métrica de disponibilidade do sistema. Essas classificações orientam na identificação de componentes que exigem melhorias e informarão os estudos de caso a serem conduzidos.

Analizando a Tabela 9Ficou claro que o tempo necessário para reparos no ventilador, representado por MTTRR, impactou profundamente a acessibilidade geral e o tempo de atividade do sistema. À medida que nos aprofundamos nos cenários subsequentes, os efeitos em cascata desses ajustes estratégicos tornam-se cada vez mais pronunciados, ressaltando seu papel fundamental na otimização do desempenho do sistema e na garantia de sua eficiência operacional sustentada. Seguindo o ranking dos três dispositivos que mais impactaram na disponibilidade

Tabela 9 – Ranking de Sensibilidade

Parâmetros	Ranking	Sensitivity index
MTTRR	1 st	0.001051545684527313
MTTFBC	2 nd	6.66003495161826E-4
MTTFSW	3 rd	5.560367112183119E-4
MTTRBC	4 th	4.441375347201817E-4
MTTRSW	5 th	4.2970025997271716E-4
MTTFR	6 th	1.6000518210035488E-4
TTDCB	7 th	8.559621081971589E-5
MTSO	8 th	8.489200280144378E-5
MTTFUT	9 th	2.80561510854408E-5
MTTRUT	10 th	1.3448492559060387E-5
MTTFG	11 th	1.1775273075204157E-5
MTTRG	12 th	3.5025045371888093E-6
TTLB	13 th	1.7501734900155456E-6
MTTFBAT	14 th	1.3527315280625157E-6
MTTRBAT	15 th	1.0356301423500126E-6

do sistema, temos também a falha do circuito do respirador, representado por MTTFBC, e a falha do sistema de chaveamento da energia, o Swich, representado por MTTFSW.

A disponibilidade de estudos consolidados sobre a confiabilidade de equipamentos médicos representa um recurso estratégico para a gestão hospitalar, permitindo que decisões sejam tomadas com base em dados objetivos e previsíveis. Essa abordagem fundamentada promove impactos significativos em diferentes esferas da administração hospitalar, como a segurança do paciente, a eficiência operacional e a otimização de custos. Por meio de dados de confiabilidade, o gestor consegue antever possíveis falhas, planejar intervenções e garantir que os recursos tecnológicos estejam alinhados com as exigências clínicas e regulatórias.

A engenharia clínica atua diretamente na avaliação técnica, manutenção e monitoramento da vida útil dos dispositivos, enquanto o setor de análise de contratos assegura que os acordos firmados com fornecedores sejam vantajosos, transparentes e adequados às necessidades assistenciais da instituição. Essa integração entre setores é fundamental para garantir a disponibilidade dos recursos tecnológicos e para sustentar uma gestão hospitalar eficiente, segura e financeiramente equilibrada.

A Figura 15 retrata a dinâmica hospitalar composta por diferentes setores inter-relacionados, evidenciando aspectos cruciais da gestão de equipamentos médicos. À direita da cena, observa-se um leito hospitalar com um paciente em ventilação mecânica assistido por um profissional de saúde. Acima do leito, encontram-se monitores multiparamétricos conectados ao paciente, evidenciando a presença de tecnologias críticas para suporte à vida. Este cenário representa uma situação típica de internação (UTI), onde o funcionamento contínuo e confiável dos equipamentos é essencial para a segurança e recuperação do paciente.



Figura 15 – Dinâmica de Setores

Imagen gerada pelo ChatGPT e adaptada por(MONTE et al., 2024)

À esquerda, dois profissionais atuam em áreas administrativas e técnicas. O primeiro, sentado à mesa com um computador portátil, está alocado no setor de Análise de Contratos, responsável por revisar e assegurar que os contratos de aquisição, manutenção e operação dos equipamentos estejam conforme as exigências técnicas, legais e financeiras da instituição de saúde. Já o segundo, identificado como parte da Engenharia Clínica, desempenha um papel fundamental na avaliação do desempenho técnico dos dispositivos, no planejamento de manutenções preventivas e corretivas, e na análise da vida útil dos equipamentos. A atuação conjunta entre os setores de engenharia clínica e análise contratual é essencial para garantir a segurança do paciente, a eficiência operacional e o cumprimento das normas regulatórias vigentes. Essa integração entre as áreas técnica e administrativa reforça a importância de uma gestão hospitalar multidisciplinar e orientada por evidências.

Com essas informações, é possível realizar o planejamento estratégico e substituições de equipamentos, reduzindo riscos associados a falhas inesperadas em dispositivos críticos. Além disso, a confiabilidade técnica serve como critério para priorização de investimentos em tecnologias mais robustas e duráveis, contribuindo para um uso mais racional do orçamento hospitalar. Também fornece subsídios técnicos para justificar decisões de aquisição ou descontinuidade de contratos, fortalecendo a governança e a transparência institucional. O resultado direto é a redução do tempo de indisponibilidade de equipamentos, o aumento da capacidade assistencial da instituição e, sobretudo, a elevação da segurança do paciente, uma vez que se assegura a

disponibilidade de dispositivos confiáveis e em perfeito estado de funcionamento. Assim, o uso sistemático de dados de confiabilidade transforma-se em uma ferramenta essencial para uma gestão hospitalar moderna, eficiente e orientada a resultados.

Os experimentos dos cenários demonstraram a eficácia das estratégias de manutenção e redundância no aumento da disponibilidade dos equipamentos. Os resultados reforçam a aplicabilidade dos modelos propostos como ferramenta de apoio à tomada de decisão na engenharia clínica.

8 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma abordagem estruturada e aprofundada para a análise e otimização de sistemas de ventilação mecânica, com ênfase na avaliação da disponibilidade e confiabilidade desses equipamentos críticos. Por meio da modelagem baseada em (SPN) e da identificação de parâmetros operacionais-chave, foi possível representar com fidelidade o comportamento dinâmico dos ventiladores mecânicos em diferentes condições de uso e falha.

A análise dos resultados demonstrou que a aplicação de modelos matemáticos bem definidos permite não apenas simular cenários adversos, mas também antecipar intervenções de manutenção, aumentando significativamente a eficiência operacional. Estratégias como a inclusão de respiradores em modo de reserva (Cold Standby) e a ampliação da redundância energética por meio de baterias adicionais revelaram-se determinantes para elevar a disponibilidade do sistema e reduzir o risco de falhas em momentos críticos.

Além de contribuir para o avanço do conhecimento técnico na área de engenharia clínica e sistemas biomédicos, os achados deste estudo oferecem benefícios diretos à gestão hospitalar. A possibilidade de prever falhas e programar manutenções com base em dados reais favorece o planejamento mais eficiente de recursos humanos e materiais, reduz paradas inesperadas e promove maior continuidade na assistência ao paciente.

A integração entre modelagem matemática, análise preditiva e planejamento estratégico evidencia-se como um caminho promissor para o fortalecimento das práticas de manutenção em ambientes hospitalares. A simulação de cenários operacionais, aliada ao uso de dados empíricos, permitiu avaliar o impacto de variáveis críticas, como o tempo médio até a falha das baterias e o tempo de reparo dos equipamentos, oferecendo subsídios robustos à tomada de decisão.

A complexidade dos ambientes de saúde, marcada pela alta interdependência entre sistemas tecnológicos, demanda abordagens cada vez mais integradas e orientadas por dados. Neste contexto, a proposta deste trabalho reforça a importância de incorporar metodologias formais à gestão tecnológica, promovendo não apenas ganhos operacionais, mas também maior segurança ao paciente e sustentabilidade institucional.

A interdisciplinaridade presente nesta pesquisa abre espaço para futuras investigações voltadas à integração entre modelagem matemática, ciência de dados e inteligência computacional. Estudos futuros poderão explorar, por exemplo, a utilização de algoritmos de aprendizado de

máquina para atualização dinâmica dos parâmetros do modelo, bem como a validação empírica das estratégias de manutenção em ambientes clínicos reais.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a importância da adoção de estratégias de manutenção baseadas em dados probabilísticos para maximizar a disponibilidade dos respiradores mecânicos em unidades críticas. Para os gestores hospitalares e engenheiros clínicos, recomenda-se implementar sistemas de monitoramento que registrem falhas e tempos de reparo de forma sistemática, permitindo o ajuste contínuo dos planos de manutenção preventiva. Além disso, a alocação de recursos deve considerar os indicadores de performabilidade dos equipamentos, priorizando investimentos em dispositivos com maior confiabilidade e suporte técnico. A modelagem estocástica pode ser incorporada como ferramenta de apoio à decisão, permitindo simular cenários de indisponibilidade e avaliar o impacto de políticas alternativas, promovendo uma gestão mais eficiente, segura e orientada por evidências.

Por fim, é imprescindível reconhecer que a melhoria da disponibilidade dos equipamentos médico-hospitalares impacta diretamente na qualidade do cuidado prestado. Ao reduzir períodos de inatividade e antecipar falhas críticas, as instituições de saúde podem otimizar seus recursos, minimizar riscos clínicos e garantir a continuidade dos serviços. Portanto, este estudo fornece uma fundamentação robusta para a criação de políticas e práticas focadas na excelência na gestão tecnológica, auxiliando no desenvolvimento de uma cultura de inovação, resiliência e eficácia na saúde pública e privada. Contudo, apesar deste estudo ter adotado uma metodologia quantitativa rigorosa por meio de modelagem estocástica em SPN, algumas restrições devem ser consideradas.

A obtenção dos dados de confiabilidade e manutenção MTTF e MTTR baseou-se em valores extraídos de manuais operacionais, podendo não refletir com precisão o desempenho operacional em ambientes hospitalares específicos, sujeitos a variações de uso, protocolos de manutenção e contexto institucional. Além disso, o modelo proposto considerou cenários idealizados com distribuição exponencial de falhas e reparos, podendo não capturar integralmente o comportamento real dos equipamentos médicos-hospitalares. Futuras investigações podem integrar dados empíricos locais, bem como modelagens com distribuições mais realistas, para aprimorar a acurácia das previsões.

Como proposta de continuidade, sugere-se o aprofundamento da modelagem aplicada a estratégias combinadas de manutenção preventiva e corretiva em outros tipos de equipamentos críticos, ampliando o escopo da análise e fortalecendo a gestão da tecnologia em ambientes clínicos complexos.

REFERÊNCIAS

- AHMED, R. A.; BOYER, T. J. Endotracheal tube. 2019.
- AMORIM, A. S.; JUNIOR, V. L. P.; SHIMIZU, H. E. O desafio da gestão de equipamentos médico-hospitalares no sistema único de saúde. *Saúde em Debate*, SciELO Public Health, v. 39, p. 350–362, 2015.
- ARAUJO, M. S. d. et al. Análise de confiabilidade de monitores multiparamétricos utilizados em unidades de terapia intensiva. Universidade Federal de Alagoas, 2020.
- AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J.-C. Dependable computing: From concepts to design diversity. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 74, n. 5, p. 629–638, 1986.
- AZARON, A.; KATAGIRI, H.; KATO, K.; SAKAWA, M. Reliability evaluation of multi-component cold-standby redundant systems. *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier, v. 173, n. 1, p. 137–149, 2006.
- AZOULAY, É.; KOUATCHET, A.; JABER, S.; LAMBERT, J.; MEZIANI, F.; SCHMIDT, M.; SCHNELL, D.; MORTAZA, S.; CONSEIL, M.; TCHEMIO, X. et al. Noninvasive mechanical ventilation in patients having declined tracheal intubation. *Intensive care medicine*, Springer, v. 39, p. 292–301, 2013.
- BARBAS, C. S. V.; ÍSOLA, A. M.; FARIAS, A. M. d. C.; CAVALCANTI, A. B.; GAMA, A. M. C.; DUARTE, A. C. M.; VIANNA, A.; SERPA, A.; BRAVIM, B. d. A.; PINHEIRO, B. d. V. et al. Recomendações brasileiras de ventilação mecânica 2013. parte i. *Revista Brasileira de terapia intensiva*, SciELO Brasil, v. 26, n. 2, p. 89–121, 2014.
- BARBOSA, A. P. *Terapia intensiva neonatal e pediátrica no Brasil: o ideal, o real e o possível*. [S.I.]: SciELO Brasil, 2004. 437–438 p.
- BERTONI, M.; SPADARO, S.; GOLIGHER, E. C. Monitoring patient respiratory effort during mechanical ventilation: lung and diaphragm-protective ventilation. *Annual Update in Intensive Care and Emergency Medicine 2020*, Springer, p. 21–35, 2020.
- BLAKEMAN, T. C.; ROBINSON, B. R.; BRANSON, R. D. Battery performance of 4 intensive care ventilator models. *Respiratory Care*, Respiratory Care, v. 55, n. 3, p. 317–321, 2010.
- BROCHARD, L.; SLUTSKY, A.; PESENTI, A. Mechanical ventilation to minimize progression of lung injury in acute respiratory failure. *American journal of respiratory and critical care medicine*, American Thoracic Society, v. 195, n. 4, p. 438–442, 2017.
- CHANG, R.; ELHUSSEINY, K. M.; YEH, Y.-C.; SUN, W.-Z. Covid-19 icu and mechanical ventilation patient characteristics and outcomes—a systematic review and meta-analysis. *PloS one*, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 16, n. 2, p. e0246318, 2021.
- COFFEY, C. C.; CAMPBELL, D. L.; ZHUANG, Z. Simulated workplace performance of n95 respirators. *American Industrial Hygiene Association Journal*, Taylor & Francis, v. 60, n. 5, p. 618–624, 1999.
- DIAZ, J. M. Q. The merger of cryptography and finance-do cryptographic economic systems lead to the future of money and payments? *Available at SSRN 2536876*, 2014.

- DODSON, B.; NOLAN, D. *Reliability engineering handbook*. [S.I.]: Marcel Dekker New York, 1999.
- GERMAN, R. *Performance Analysis of Communication Systems with Non-Markovian Stochastic Petri Nets*. [S.I.]: John Wiley & Sons, Inc., Inc. New York, NY, USA, 2000. ISBN 0471492582.
- GIRAUT, C.; VALK, R. *Petri nets for systems engineering: a guide to modeling, verification, and applications*. [S.I.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- GOMES, D. S.; JUNIOR, M. E. Aquisição de respirador mecânico para unidade hospitalar:: uma abordagem multicritério à decisão. *Revista Científica da Faculdade de Medicina de Campos*, v. 19, n. 2, p. 2–12, 2024.
- GONÇALVES, M. A. de M.; HOLANDA, F. G. T. de; OLIVEIRA, M. A. C. de; HOLANDA, R. C. de. A importância da atuação do cirurgião-dentista na equipe multiprofissional em unidades de terapia intensiva (uti): revisão de literatura. *Revista Interdisciplinar em Saúde*, 2021.
- HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental monitoring and assessment*, Springer, v. 32, p. 135–154, 1994.
- JASPER, A. *Servos Users manual*. 2022. Available in: <https://www.academia.edu/41870952/Manual_Opera%C3%A3o_Servo_S?email_work_card=view-paper>. Accessed in: October 10, 2022.
- KARABÖCE, B. Inspection and testing of respirators and anaesthesia machines. *Inspection of Medical Devices: For Regulatory Purposes*, Springer, p. 181–201, 2018.
- KESZLER, M. Mechanical ventilation strategies. In: ELSEVIER. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*. [S.I.], 2017. v. 22, n. 4, p. 267–274.
- KNIGHT, J. *Fundamentals of Dependable Computing for Software Engineers*. [S.I.]: Chapman & Hall/CRC, 2012.
- KOREN, I.; KRISHNA, C. M. *Fault-tolerant systems*. [S.I.]: Morgan Kaufmann, 2020.
- KUO, W.; ZUO, M. J. *Optimal reliability modeling: principles and applications*. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2003.
- LAPRIE, J.-C. Dependability: Basic concepts and terminology. In: *Dependability: Basic Concepts and Terminology: In English, French, German, Italian and Japanese*. [S.I.]: Springer, 1992. p. 3–245.
- LEE, A. S. A scientific methodology for mis case studies. *MIS quarterly*, JSTOR, p. 33–50, 1989.
- LINDEMANN, C. *Performance Modelling with Deterministic and Stochastic Petri Nets*. [S.I.]: John Wiley & Sons, Inc., 1998. ISBN 0471976466.
- MACIEL, P.; MATOS, R.; SILVA, B.; FIGUEIREDO, J.; OLIVEIRA, D.; FÉ, I.; MACIEL, R.; DANTAS, J. Mercury: Performance and dependability evaluation of systems with exponential, expolynomial, and general distributions. In: IEEE. *2017 IEEE 22nd Pacific Rim international symposium on dependable computing (PRDC)*. [S.I.], 2017. p. 50–57.

- MACIEL, P. R.; LINS, R. D.; CUNHA, P. R. *Introdução às redes de Petri e aplicações*. [S.I.]: UNICAMP-Instituto de Computacao Sao Paulo, Brazil, 1996.
- MACIEL, P. R. M. *Performance, reliability, and availability evaluation of computational systems, Volume 2: Reliability, availability modeling, measuring, and data analysis*. [S.I.]: Chapman and Hall/CRC, 2023.
- MACIEL, P. R. M. *Performance, reliability, and availability evaluation of computational systems, Volume 2: Reliability, availability modeling, measuring, and data analysis*. [S.I.]: Chapman and Hall/CRC, 2023.
- MACIEL, P. R. M. *Performance, reliability, and availability evaluation of computational systems, volume I: performance and background*. [S.I.]: Chapman and Hall/CRC, 2023.
- MARSAN, M. A.; BALBO, G.; CONTE, G.; DONATELLI, S.; FRANCESCHINIS, G. *Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets*. 1st. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1994. ISBN 0471930598.
- MARSAN, M. A.; CHIOLA, G. On petri nets with deterministic and exponentially distributed firing times. In: *Advances in Petri Nets 1987, Covers the 7th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1986. p. 132–145. ISBN 3540180869.
- MARSAN, M. A.; CONTE, G.; BALBO, G. A class of generalized stochastic petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems. *ACM Trans. Comput. Syst.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 2, n. 2, p. 93–122, may 1984. ISSN 0734-2071. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/190.191>>.
- MELO, C.; DANTAS, J.; PEREIRA, P.; MACIEL, P. Distributed application provisioning over ethereum-based private and permissioned blockchain: availability modeling, capacity, and costs planning. *The Journal of Supercomputing*, Springer, v. 77, n. 9, p. 9615–9641, 2021.
- MOLLOY, M. K. On the integration of delay and throughput measures in distributed processing models. University of California, Los Angeles, 1981. AAI8201138.
- MONTE, A. d.; PESSOA, P.; SILVA, D.; LINS, L.; NASCIMENTO, D. C.; MACIEL, P. Assessing the impact of battery charging and discharging times on the availability of mechanical ventilation service. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, Springer, v. 10, n. 2, p. 137–150, 2024.
- MUPPALA, J.; CIARDO, G.; TRIVEDI, K. S. Stochastic reward nets for reliability prediction. *Communications in reliability, maintainability and serviceability*, v. 1, n. 2, p. 9–20, 1994.
- MURATA, T. Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989.
- NATKIN, S. Les reseaux de petri stochastiques et leur application a l'évaluation des systèmes informatiques. PhD thesis. CNAM. Paris, 1980.
- NG, Q. A.; CHIEW, Y. S.; WANG, X.; TAN, C. P.; NOR, M. B. M.; DAMANHURI, N. S.; CHASE, J. G. Network data acquisition and monitoring system for intensive care mechanical ventilation treatment. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 91859–91873, 2021.

- NGUYEN, T. A.; MIN, D.; CHOI, E. A hierarchical modeling and analysis framework for availability and security quantification of iot infrastructures. *Electronics*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 1, p. 155, 2020.
- NGUYEN, T. A.; MIN, D.; CHOI, E.; LEE, J.-W. Dependability and security quantification of an internet of medical things infrastructure based on cloud-fog-edge continuum for healthcare monitoring using hierarchical models. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 8, n. 21, p. 15704–15748, 2021.
- OLIVEIRA, A. N. de et al. A evolução da gestão hospitalar durante a covid-19: Um estudo comparativo entre instituições públicas e privadas. *Revista Tópicos*, v. 2, n. 7, p. 1–16, 2024.
- PADILHA, K. G.; SOUSA, R. M. C. d.; CRUZ, D. A.; MIYADAHIRA, A. M. K.; KIMURA, M. Estrutura física das unidades de terapia intensiva do município de são paulo. *Rev. bras. ter. intensiva*, p. 71–6, 1997.
- PEREIRA, D. N. d. S.; CASTRO, P. S. de; PRAXEDES, M. F. d. S. Cultura de segurança em ambiente hospitalar. In: EDITORA CIENTÍFICA DIGITAL. *CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE: INTEGRANDO SABERES EM DIFERENTES CONTEXTOS-VOLUME 4*. [S.I.], 2023. v. 4, p. 125–139.
- PERROCA, M. G.; JERICÓ, M. d. C.; CALIL, Â. S. G. Composição da equipe de enfermagem em unidades de terapia intensiva. *Acta Paulista de Enfermagem*, SciELO Brasil, v. 24, p. 199–205, 2011.
- PETRI, C. A. Kommunikation mit automaten. 1962.
- PHAM, T.; BROCHARD, L. J.; SLUTSKY, A. S. Mechanical ventilation: state of the art. In: ELSEVIER. *Mayo Clinic Proceedings*. [S.I.], 2017. v. 92, n. 9, p. 1382–1400.
- POSSOLI, L.; MACEDO, T. R.; NATAL, S.; CALVO, M. C. M. Segurança do paciente no ambiente hospitalar: uma revisão integrativa/patient safety in the hospital environment: an integrative review. *Brazilian Journal of Health Review*, [S. I.], v. 4, n. 4, p. 15962–15980, 2021.
- RANGEL, C. M. Índices preditivos utilizados para o desmame ventilatório. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 4, p. e4713445476–e4713445476, 2024.
- REIS, C. S. d. et al. Metodologia de análise de confiabilidade de equipamentos médico-assistenciais na fase de utilização. 2014.
- RODRIGUES, Y. C. S. J.; STUDART, R. M. B.; ANDRADE, Í. R. C.; CITÓ, M. d. C. d. O.; MELO, E. M.; BARBOSA, I. V. Ventilação mecânica: evidências para o cuidado de enfermagem. *Escola Anna Nery*, SciELO Brasil, v. 16, p. 789–795, 2012.
- SANDELIC, M.; SANGWONGWANICH, A.; BLAABJERG, F. Reliability evaluation of pv systems with integrated battery energy storage systems: Dc-coupled and ac-coupled configurations. *Electronics*, MDPI, v. 8, n. 9, p. 1059, 2019.
- SANTOS, R. S. dos; AMORIM, L. P.; SANTOS, L. L. dos; MONTEIRO, L. V.; DOURADO, G. K. da S. et al. Humanização no cuidado na uti adulto. *Enfermagem Brasil*, v. 21, n. 3, p. 318–332, 2022.

- SAVARY, D.; LESIMPLE, A.; BELONCLE, F.; MORIN, F.; TEMPLIER, F.; BROC, A.; BROCHARD, L.; RICHARD, J.-C.; MERCAT, A. Reliability and limits of transport-ventilators to safely ventilate severe patients in special surge situations. *Annals of intensive care*, Springer, v. 10, p. 1–10, 2020.
- SEIBERLICH, E.; SANTANA, J. A.; CHAVES, R. d. A.; SEIBERLICH, R. C. Ventilação mecânica protetora, por que utilizar? *Revista Brasileira de Anestesiologia*, SciELO Brasil, v. 61, p. 663–667, 2011.
- SILVA, E. P.; ANJOS, F. dos; LAMY, P.; SCHORDER, L. G. et al. Backup de energia elétrica em área hospitalar. *Revista Científica Doctum Multidisciplinar*, v. 1, n. 12, 2024.
- SMITH, R.; TRIVEDI, K. S.; RAMESH, A. Performability analysis: measures, an algorithm, and a case study. *IEEE Transactions on Computers*, IEEE, v. 37, n. 4, p. 406–417, 1988.
- SOUSA, P.; MENDES, W. *Segurança do paciente: criando organizações de saúde seguras*. [S.I.]: Editora Fiocruz, 2019.
- SOUZA, G. A. de; POLTRONIERI, G. P. et al. Desmame em ventilação mecânica: o papel do fisioterapeuta no processo de desmame na ventilação mecânica uma revisão de literatura. *Anais do fórum de iniciação científica do UNIFUNEC*, v. 12, n. 12, 2021.
- SRINIVASAN, S.; RAMADI, K. B.; VICARIO, F.; GWYNNE, D.; HAYWARD, A.; LANGER, R.; FRASSICA, J. J.; BARON, R. M.; TRAVERSO, G. Individualized system for augmenting ventilator efficacy (isave): a rapidly deployable system to expand ventilator capacity. *BioRxiv*, Cold Spring Harbor Laboratory, p. 2020–03, 2020.
- STILES, R. A.; MICK, S. S.; WISE, C. G. The logic of transaction cost economics in health care organization theory. *Health Care Management Review*, JSTOR, p. 85–92, 2001.
- SYMONS, F. J. W. Modelling and analysis of communication protocols using numerical petri nets. 1989.
- TRIVEDI, K. S.; MALHOTRA, M. Reliability and performability techniques and tools: A survey. In: SPRINGER. *Messung, Modellierung und Bewertung von Rechen-und Kommunikationssystemen: 7. ITG/GI-Fachtagung, Aachen, 21.–23. September 1993*. [S.I.], 1993. p. 27–48.
- WANG, D.; TRIVEDI, K. S. Computing steady-state mean time to failure for non-coherent repairable systems. *IEEE Transactions on reliability*, IEEE, v. 54, n. 3, p. 506–516, 2005.
- ZUÑIGA, Q. G. P.; DREYER, E.; COLOMBRINI, M.; NISHIMURA, M.; PATO, N. Ventilação mecânica básica para enfermagem. *São Paulo: Atheneu*, 2004.