



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

RAFAEL MORAES GADELHA

UM MODELO DE PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS
MÉDICO-HOSPITALARES

JOÃO PESSOA
2023

RAFAEL MORAES GADELHA

**UM MODELO DE PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS
MÉDICO-HOSPITALARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Sistemas de Produção

Linha de Pesquisa: Gestão Integrada de Sistemas de Produção

Orientador: Prof. Dr. Luciano Costa Santos

JOÃO PESSOA

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G124m Gadelha, Rafael Moraes.

Um modelo de priorização de manutenção de
equipamentos médico-hospitalares / Rafael Moraes
Gadelha. - João Pessoa, 2023.

114 f. : il.

Orientação: Luciano Costa Santos.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Equipamentos médico-hospitalares - Manutenção. 2.
Engenharia clínica. 3. Priorização de manutenção -
Modelos. I. Santos, Luciano Costa. II. Título.

UFPB/BC

CDU 615.47-049.3(043)

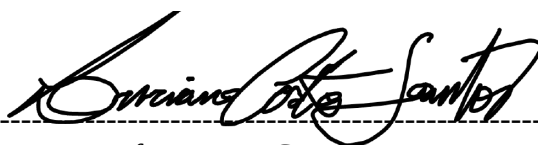
UM MODELO DE PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS MÉDICO-HOSPITALARES

RAFAEL MORAES GADELHA

Esta Dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa, 28 de agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
LUCIANO COSTA SANTOS
Data: 29/09/2023 10:30:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Luciano Costa Santos, Dr.
Orientador (UFPB)



Documento assinado digitalmente
HUGO HARRY FREDERICO RIBEIRO KRAMER
Data: 29/09/2023 19:52:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Hugo Harry Frederico Ribeiro Kramer, Dr.
Examinador Interno (UFPB)



Documento assinado digitalmente
JONATAS ARAÚJO DE ALMEIDA
Data: 29/09/2023 18:45:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Jônatas Araújo de Almeida, Dr.
Examinador Externo (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão a Deus por me proporcionar uma boa saúde, força e sabedoria necessárias para o desenvolvimento deste trabalho. Aos meus familiares, como o meu falecido pai, Silvio Gadelha de Sousa, agradeço por todos os ensinamentos sobre determinação e valores compartilhados comigo. Ele me ensinou a trabalhar duro e nunca desistir dos meus sonhos. À minha mãe, Rosilene de Oliveira Moraes, quero agradecer por seu amor incondicional e sempre enfatizar a importância da educação como a maior herança para mim. Às minhas duas avós, Terezinha de Sousa Gadelha e Irene Alves de Melo, registro minha profunda gratidão por sempre me apoiarem nos estudos e me ensinarem princípios para me tornar um bom cidadão. À minha esposa, Graziela Batista de Sousa, agradeço por todo apoio e incentivo durante a pesquisa. Ao meu orientador, professor Luciano Costa Santos, agradeço a constante dedicação e por apostar na nossa pesquisa. Ele é um professor incrível, exerce a profissão mais nobre de todas, de modo que o admiro muito. Aos professores Jônatas Araújo de Almeida, Cláudia Fabiana Gohr e Hugo Harry Frederico Ribeiro Kramer estendo minha gratidão pelas contribuições para a conclusão da pesquisa. Agradeço também aos engenheiros clínicos da rede hospitalar estudada, cujas contribuições foram fundamentais para a coleta e análise de dados. Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho. Sem o envolvimento de todos, este estudo não teria alcançado o objetivo pretendido.

Muito Obrigado,

Rafael Moraes Gadelha

RESUMO

Diferentes setores não industriais têm investido em procedimentos estruturados para aprimorar o gerenciamento da manutenção de equipamentos. Nos estabelecimentos assistenciais de saúde, esse aprimoramento da gestão da manutenção é motivado adicionalmente pelas considerações de risco à vida dos pacientes, elemento que eleva a complexidade da manutenção e incentiva a adoção de modelos de priorização. Tendo isso em mente, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um modelo de priorização de manutenção de equipamentos médico-hospitalares que fosse adequado à complexidade das instituições do setor hospitalar. Para tal, primeiramente realizou-se um levantamento da literatura sobre priorização de manutenção de equipamentos médico-hospitalares, de modo a identificar critérios e ferramentas de avaliação utilizados e propor um modelo baseado nas melhores práticas. O modelo proposto utiliza inicialmente metodologia qualitativa grupo focal para selecionar e classificar em ordem de importância os critérios de priorização mais apropriados para a organização estudada. Ademais, considerando os requisitos estabelecidos, o modelo propõe a aplicação do método PROMETHEE-ROC para estabelecer a ordem de prioridade de manutenção num grupo de equipamentos. Com a finalidade de testar sua aplicabilidade, o modelo foi parametrizado para uma rede hospitalar de grande porte e aplicado nos equipamentos pertencentes ao centro cirúrgico e à central de materiais esterilizados de uma unidade da rede. Os resultados se mostraram adequados diante das experiências da engenharia clínica e comparados ao cronograma de manutenção existente. Eles também indicaram que a unidade poderia realizar melhorias na priorização das manutenções programadas, especificamente quanto à compreensão da importância dos equipamentos de esterilização em detrimento dos equipamentos de monitoramento, por exemplo. Além disso, realizou-se uma análise de sensibilidade para alterações nos pesos dos critérios e um teste estatístico de correlação para observar a precisão da análise. A simulação se apresentou coerente e consistente com um nível de significância de 0,05%. Dessa forma, considerou-se o modelo proposto como adequado para priorizar a manutenção de equipamentos médico-hospitalares na rede hospitalar estudada. Além disso, a metodologia adotada para a construção do modelo de priorização apresentou viabilidade de replicação e adaptação para as particularidades de outras instituições, o que ressalta a contribuição científica da pesquisa.

Palavras-chave: Manutenção; Equipamentos médico-hospitalares; Priorização.

ABSTRACT

Different non-manufacturing sectors have invested in structured procedures to improve maintenance management. In healthcare facilities, this improvement in maintenance management is additionally motivated by considerations of life risk to the patients, an element that increases the complexity of maintenance and encourages the adoption of prioritization models. Bearing this in mind, this research aimed to develop a model for prioritizing the maintenance of medical devices that would be adequate to the complexity of institutions in the hospital sector. To this end, a literature survey on the prioritization of maintenance of medical devices was first carried out to identify criteria and evaluation tools used and propose a model based on best practices. The proposed model initially uses the qualitative focus group methodology to select and classify the most appropriate prioritization criteria for the studied organization in order of importance. Furthermore, considering the established requirements, the model proposes applying the PROMETHEE-ROC method to establish the maintenance priority order within a group of devices. In order to test its applicability, the model was parameterized for a large hospital chain and applied to devices belonging to the surgical center and the sterilized materials center of a unit. The results were considered adequate given the clinical engineering experiences and compared to the existing maintenance schedule. They also indicated that the hospital unit could improve prioritizing scheduled maintenance, specifically regarding understanding the importance of sterilization equipment to the detriment of monitoring equipment, for example. In addition, a sensitivity analysis was performed for changes in criteria weights, and a statistical correlation test was performed to observe the accuracy of the analysis. The simulation was coherent and consistent, with a significance level of 0.05%. Thus, the proposed model was considered adequate to prioritize the maintenance of medical devices in the studied hospital chain. In addition, the methodology adopted for constructing the prioritization model presented feasibility of replication and adaptation to the particularities of other institutions, which emphasizes the scientific contribution of the research.

Keywords: Maintenance; Medical Devices; Prioritization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DEFINIÇÃO DO TEMA E PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	JUSTIFICATIVA.....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	MANUTENÇÃO	21
2.1.1	Origem e evolução da manutenção.....	21
2.1.2	Classificação da manutenção	23
2.2	ENGENHARIA CLÍNICA.....	25
2.3	PLANO DE GERENCIAMENTO DE EQUIPAMENTOS MÉDICO-HOSPITALARES	26
3	MODELOS DE PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE EMHS.....	29
3.1	BUSCA E SELEÇÃO DE REFERÊNCIAS.....	29
3.2	VISÃO GERAL DO PORTFÓLIO	30
3.3	CRITÉRIOS DE PRIORIZAÇÃO	48
3.4	FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE PRIORIDADES.....	50
3.5	ESCOLHA DAS FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO	54
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	57
4.1	ETAPA I – LEVANTAMENTO DOS CRITÉRIOS E FERRAMENTAS.....	58
4.2	ETAPA II – SELEÇÃO DOS CRITÉRIOS E FERRAMENTAS	58
4.2.1	Seleção dos especialistas.....	59
4.2.2	Desenvolvimento do questionário semiestruturado	60
4.2.3	Condução do grupo focal	60
4.3	ETAPA III – PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO.....	62
4.3.1	Estruturação das relações de sobreclassificação	62
4.3.2	Exploração das relações de sobreclassificação	64
4.3.3	Elicitação dos pesos e seleção das funções de preferência.....	65
4.4	ETAPA IV – APLICAÇÃO DO MODELO	66
4.5	ETAPA V – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
5	RESULTADOS.....	68
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA INSTITUIÇÃO	68
5.2	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	69
5.2.1	Seleção dos especialistas.....	69
5.2.2	Seleção dos critérios de priorização	72
5.2.3	Características dos critérios selecionados	74
5.2.4	Estruturação das relações de sobreclassificação	77
5.2.5	Escolha das funções de preferências.....	79
5.2.6	Elicitação dos pesos	80
5.2.7	Aplicação do modelo	81
5.2.8	Análise de sensibilidade	84
5.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	88
6	CONCLUSÕES	90
6.1	ATENDIMENTO DOS AOS OBJETIVOS	90

6.2	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E PRÁTICAS	92
6.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
REFERÊNCIAS.....		95
APÊNDICE A – ROTEIRO DE CONDUÇÃO DO GRUPO FOCAL		100
APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO SEMIESTRUTURADO		102
APÊNDICE C – LISTA DAS ALTERNATIVAS DO MODELO PROPOSTO		112
APÊNDICE D – PLANILHA EXCEL DO SISTEMA PREENCHIDA.....		114

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da manutenção	22
Figura 2 - Desenvolvimento da manutenção	23
Figura 3 - Classificação da manutenção	24
Figura 4 - Fluxo do processo de busca e seleção.....	30
Figura 5 - Hierarquia de decisão para priorização de EMHs	35
Figura 6 - Fluxograma típico do sistema de pontuação de risco	36
Figura 7 - Diagrama de planejamento da manutenção	37
Figura 8 - Metodologia proposta para seleção da estratégia de manutenção	39
Figura 9 - Seleção de ferramentas de priorização baseada em fundamentos de avaliação.....	56
Figura 10 - Etapas de desenvolvimento do modelo.....	57
Figura 11 - Distribuição dos hospitais da rede estudada	69
Figura 12 - Estrutura lógica de aplicação do modelo no sistema	78
Figura 13 - Tela da matriz de avaliação	79
Figura 14 - Tela para escolher as funções de preferências	80
Figura 15 - Tela para escolher a importância dos critérios.....	81
Figura 16 - Tela com o resultado do problema.....	82
Figura 17 - Tela da análise de sensibilidade.....	85
Figura 18 - Tela do resultado da simulação.....	85
Figura 19 - Tela da análise de correlação	87
Figura 20 - Tela dos resultados da simulação.....	88
Figura 21 - Cronograma de manutenções planejadas da unidade analisada.....	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estrutura do trabalho de dissertação.....	20
Quadro 2 - Principais conceitos e definições do PGEMH.....	27
Quadro 3 - Visão geral do portfólio.....	42
Quadro 4 - Definições inequívocas dos critérios citados na literatura	48
Quadro 5 - Comparativo das principais ferramentas de avaliação identificadas na literatura..	55
Quadro 6 - Matriz de avaliação	63
Quadro 7 - Critérios gerais para o PROMETHEE	63
Quadro 8 - Matriz de diferenças para o critério j	64
Quadro 9 - Caracterização das unidades da rede estudada.....	70
Quadro 10 - Unidades com alto envolvimento em trabalhos da rede hospitalar	71
Quadro 11 - Unidades hospitalares selecionadas	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado do questionário	73
Tabela 2 - Escala de avaliação do critério função	75
Tabela 3 - Escala de avaliação do critério manutenção requerida.....	75
Tabela 4 - Escala de avaliação do critério calibração.....	75
Tabela 5 - Escala de avaliação do critério criticidade da missão	76
Tabela 6 - Escala de avaliação do critério criticidade da área.....	76
Tabela 7 - Escala de avaliação do critério risco físico	77
Tabela 8 - Pesos dos critérios obtidos com o método ROC	81
Tabela 9 - Resultado da priorização	83
Tabela 10 - Relatório das mudanças de prioridades	86

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AHP – *Analytic Hierarchy Process*

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ASHE – *American Society for Healthcare Engineering*

CBR – *Case-Based Reasoning*

CBM – *Condition-based maintenance*

CMMS – *Computerized maintenance management system*

EBSERH – Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares

ELECTRE – *Elimination Et Choix Traduisant La Realite*

EAS – Estabelecimento Assistencial de Saúde

ECRI – *Emergency Care Research Institute*

EM – *Equipment Management*

EMH – Equipamento Médico-Hospitalar

EMR – *Equipment Management Ranking*

FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*

FTA – *Fault Tree Analysis*

GRS – *Gradient Risk Sampling*

HUF – Hospitais Universitários Federais

IPM – *Inspection and Preventive Maintenance*

JCAHO – *The Joint Commission on Accreditation of Healthcare Organizations*

MACBETH – *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*

MEC – Ministério da Educação

MEMC – *Multi-Expert Multi-Criteria Decision Making*

MILP – *Mixed Integer Linear Programming*

MTBF – *Mean Time Between Failures*

MTTR – *Mean Time to Repair*

NBR – Norma Brasileira

PGEMH – Plano de Gerenciamento de Equipamentos Médico-Hospitalares

PGTS – Plano de Gerenciamento de Tecnologia em Saúde

PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*

PVST – *Performance Verification and Safety Testing*

QFD – *Quality Function Deployment*

RBM – *Risk-Based Maintenance*

RCM – *Reliability Centered Maintenance*

RDC – *Resolução de Diretoria Colegiada*

ROC – *Rank-Order Centroid*

RPI – *Risk Priority Index*

RPN – *risk priority number*

SMARTER – *Simple Multi-Attribute Rating Technique exploiting raking*

SPIs – *Periodic Safety and Performance Inspections*

TOPSIS – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*

WHO – *World Health Organization*

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve o tema delimitando a pesquisa dentro de um campo de ação viável. Adiante, o problema de pesquisa é apresentado juntamente com o objetivo geral e os objetivos específicos. Em seguida, as justificativas teóricas e práticas são descritas destacando a relevância do trabalho e as prováveis contribuições para o meio acadêmico e profissional. Na última parte, é apresentada a estrutura do trabalho organizada em capítulos.

1.1 Definição do tema e problema de pesquisa

Por muito tempo, a manutenção foi considerada um mal necessário para as organizações, restringindo-se a procedimentos corretivos executados em condições de emergência, como afirma Mostafa et al. (2015). Para Ng et al. (2017), isso ocorria devido aos procedimentos de manutenção estarem associados aos custos indiretos, não apresentando ganhos imediatos de lucro quando comparados com a produção. No entanto, à medida que as pressões competitivas se intensificaram sobre as organizações para serem mais eficientes e eficazes, a manutenção, que antes era considerada uma atividade secundária, passa a ganhar mais atenção dos gestores (FRASER, 2014).

Historicamente, o setor manufatureiro largou na frente em busca de melhorias no planejamento e controle da manutenção, objetivando a eliminação de falhas inesperadas, custos desnecessários e perdas na produção (ANTOSZ; PASKO; GOLLA, 2019). Em outras palavras, o setor manufatureiro percebeu previamente que, para conseguir produtos com alto padrão de qualidade, os ativos deveriam estar sempre em boas condições, evitando, assim, eventualidades no processo de produção (NG et al., 2017). Do mesmo modo, diante de fortes pressões para alcançar altos níveis de desempenho, organizações de diferentes setores concluíram que não poderiam mais realizar manutenções de modo aleatório devido aos altos custos relacionados (ABREU; CALADO; REQUEIJO, 2016).

Nessa tendência, em busca de procedimentos estruturados para aperfeiçoar o gerenciamento da manutenção, pesquisadores interessados no assunto desenvolveram trabalhos em diferentes tipos de organizações, a exemplo da aviação (WU; LIN; YOU, 2016), da indústria naval (GOOSSENS; BASTEN, 2015), da extração de petróleo (MARHAUG et al., 2017), da geração de energia (DURAN; CAPALDO; ACEVEDO, 2017), do tratamento de água potável (MARLOW; BEALE; MASHFORD, 2012), dos transportes urbanos (DENG et al., 2020), dos

equipamentos militares (QIANG; ZHU; LI, 2011) e dos Equipamentos Médico-Hospitalares (EMHs) (DOMÍNGUEZ; CARNERO, 2020).

Entre as áreas mencionadas, em virtude do risco à vida dos pacientes e dos operadores (usuários dos equipamentos), pois falhas inesperadas podem resultar em falso diagnóstico, comprometimento do tratamento ou, até mesmo, em morte, esta pesquisa será delimitada ao campo da manutenção de EMHs, sobretudo, em modelos de apoio a tomada de decisão para identificar e priorizar a manutenção de equipamentos críticos pertencentes a um Estabelecimento Assistencial de Saúde (EAS).

A relevância do tema é frequentemente levantada por órgãos nacionais e internacionais, como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a *World Health Organization* (WHO), o *Emergency Care Research Institute* (ECRI) e a *American Society for Healthcare Engineering* (ASHE) que chamam a atenção de gestores do mundo inteiro para a importância do bom funcionamento dos EMHs (GAAMANGWE et al., 2015). Ademais, Jamshidi et al. (2015) também destacam que manutenções inadequadas nesses equipamentos criam um risco inaceitável de lesão ao paciente. Ainda assim, a WHO estima que quase 50% (cinquenta por cento) dos EMHs de países em desenvolvimento não funcionam corretamente por ausência de políticas de gestão de manutenção eficazes (ABDO; WAHED; SHARAWI, 2014). Tal fato ficou evidenciado com o mapeamento realizado pelo Ministério da Economia quanto aos respiradores quebrados no Brasil no auge da pandemia da COVID-19 (FRAGA, 2020).

Na mesma linha de raciocínio, Taghipour, Banjevic e Jardine (2011a) afirmam que o crescente avanço tecnológico dos estabelecimentos assistenciais de saúde tornam a aplicação de um plano de gerenciamento de manutenção imprescindível. De acordo com eles, o plano de gerenciamento deve conter minimamente elementos como inspeção, manutenção preventiva e calibração, a fim de garantir a segurança e a operação dos equipamentos médicos em níveis adequados de desempenho. Adicionalmente, Jamshidi et al. (2014) afirmam que a evolução tecnológica vem promovendo um forte crescimento no quantitativo e na complexidade dos equipamentos médicos, o que resulta em maiores custos de manutenção

Corroborando com a ideia, Serrou, Khlie e Abouabdellah (2016) destacam que os gestores da saúde necessitam urgentemente melhorar seus processos de manutenção de EMHs, propondo, então, aplicar técnicas provenientes da indústria para mitigar os riscos relacionados

e criar ambientes de saúde mais seguros, eficientes e financeiramente enxutos. Ademais, enquanto em países desenvolvidos a maioria dos estabelecimentos assistenciais de saúde inclui todo o parque tecnológico no plano de manutenção, gerando custos desnecessários, a maioria dos países em desenvolvimento permanece com a capacidade de realizar manutenção reduzida (ABDO; WAHED; SHARAWI, 2014).

No contexto nacional, a ANVISA inicialmente publicou a Resolução de Diretoria Colegiada - RDC nº 2, de janeiro de 2010, logo em seguida a RDC nº 509, de 27 de maio de 2021, que obrigam a existência de um Plano de Gerenciamento de Tecnologia em Saúde (PGTS) para todas as organizações de saúde brasileiras. De acordo com ANVISA (2010) e ANVISA (2021), o PGTS deve conter um conjunto de procedimentos implementados a partir de bases científicas e técnicas, com o intuito de garantir a rastreabilidade, qualidade, eficácia, efetividade, segurança e o desempenho dos produtos utilizados na prestação dos serviços de saúde. Tais resoluções adotam o conceito de produto para saúde de forma ampla, incluindo equipamentos médicos, produtos de higiene e cosméticos, medicamentos e saneantes. A seção do documento que contempla os equipamentos médicos é denominada no meio profissional como Plano de Gerenciamento de Equipamentos Médico-Hospitalares (PGEMH).

De forma mais específica, a ABNT publicou a Norma Brasileira - NBR 15943 (2011), que define as diretrizes para o programa de gerenciamento de equipamentos de infraestrutura de serviços de saúde e de equipamentos para saúde. A norma apresenta os componentes mínimos estabelecidos pelo órgão normatizador para estruturar a documentação relacionada ao plano de gerenciamento, de modo a permitir a rastreabilidade dos equipamentos desde sua incorporação no serviço de saúde até seu descarte final. Além disso, a norma ainda propõe aspectos de análise de risco para auxiliar na priorização das manutenções, devendo os responsáveis levar em consideração critérios como função do equipamento, riscos ao paciente, requisitos de manutenção do fabricante e histórico de falhas, podendo os critérios de priorização serem alterados de acordo com as necessidades de cada estabelecimento de saúde.

Nesse contexto, considerando ainda o número elevado de equipamentos médicos dentro de um EAS, que pode até ultrapassar seis mil unidades, por exemplo, ter conhecimento do grau de criticidade de cada equipamento pode auxiliar os gestores da manutenção a elaborar um plano financeiramente viável para a instituição, dada a necessidade de potencializar recursos muitas vezes escassos, principalmente na rede pública de saúde. Diante desse cenário, pesqui-

sadores da área vem propondo e aprimorando modelos de priorização de manutenção de equipamentos médicos, de modo a auxiliar a tomada de decisão quanto à ordem de prioridade do PGEMH (ASHE/AHA, 1996; DOMÍNGUEZ; CARNERO, 2020; FENNIGKOH; SMITH, 1989; JAMSHIDI et al., 2015; RICE, 2007; TAGHIPOUR; BANJEVIC; JARDINE, 2011b; WANG; RICE, 2003; WHO, 2011).

Apesar da existência de modelos de priorização de manutenção de equipamentos médicos na literatura, a maioria deles são inadequados para ambientes específicos por negligenciar critérios e particularidades do ambiente de aplicação, criando uma lacuna entre a teoria e prática (MAHFOUD; BARKANY; BIYAALI, 2018). Além disso, Jamshidi et al. (2015) afirmam que os primeiros modelos calculam apenas a soma dos valores atribuídos aos critérios avaliados, sem considerar a importância relativa entre eles, tornando-os deficientes na priorização. Ademais, são pouco sensíveis às variações dos valores atribuídos e não consideram opiniões de múltiplos especialistas. Dessa forma, necessitam de aprimoramentos referentes à aplicação das ferramentas de avaliação. Com o mesmo pensamento, Parand et al. (2021) afirmaram mais recentemente que muitos programas de manutenção de EMHs não consideraram parâmetros funcionais importantes, como tipo do equipamento, fatores de risco e opiniões de especialistas.

Diante de todas as considerações supramencionadas, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo adaptativo de priorização de manutenção de EMHs, a fim de auxiliar os gestores dos estabelecimentos assistenciais de saúde em processos de tomada de decisão que sejam adequados à realidade da sua instituição. O problema de pesquisa originou-se da dificuldade de o autor em encontrar um modelo de priorização que representasse todas as particularidades do seu ambiente de trabalho, incluindo um número enxuto de critérios e classificando os equipamentos críticos em consonância com os comportamentos de preferência da instituição. Essa dificuldade prática do autor foi confirmada pela escassez de modelos com tais características na literatura. Assim, este trabalho busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: **Como priorizar equipamentos médico-hospitalares na elaboração de programas manutenção que sejam adequados às especificidades das instituições do setor hospitalar?**

A fim de encontrar a solução do problema de pesquisa, foi necessário inicialmente analisar o conteúdo dos principais trabalhos sobre o tema e identificar os motivos que levaram os autores a desenvolver os respectivos modelos de priorização. Essa etapa tanto auxiliou no direcionamento dos estudos como resultou em um capítulo com os principais critérios e ferramentas

de avaliação utilizados, ou seja, um ponto de partida para os gestores de manutenção escolherem os critérios de priorização e as ferramentas de avaliação mais adequados à realidade da sua instituição, sem a obrigatoriedade de realizar uma revisão de literatura.

Entre os modelos de priorização analisados, destacou-se neste trabalho os que utilizam ferramentas como: o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), pela capacidade de definir a importância relativa entre os critérios por meio de comparação par a par (DOMÍNGUEZ; CARNERO, 2020; HUTAGALUNG; HASIBUAN, 2019; MASMOUDI et al., 2016; TAGHIPOUR; BANJEVIC; JARDINE, 2011b); a lógica *fuzzy*, que normalmente se associa a outras ferramentas no intuito de reduzir ambiguidades, incertezas e imprecisões nas respostas dos especialistas (DOMÍNGUEZ; CARNERO, 2020; JAMSHIDI et al., 2015; TAWFIK; OUDA; SAMAD, 2013); e o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), pela possibilidade dos especialistas utilizarem uma racionalidade não compensatória sobre a avaliação das alternativas e por avaliar o comportamento de preferência para ordenar as prioridades de manutenção (ALMEIDA; COSTA, 2002; SAFARI et al., 2012).

1.2 Objetivos

Em convergência com o tema e a problemática de pesquisa, foram definidos os seguintes objetivos com a finalidade de direcionar este trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e aplicar um modelo de priorização de manutenção de EMHs alinhado com a realidade da instituição de interesse.

1.2.2 Objetivos específicos

- (i) Levantar os critérios de priorização e as ferramentas de avaliação utilizados nos modelos de priorização de manutenção de EMHs encontrados na literatura;
- (ii) Parametrizar o modelo com os critérios de priorização e as ferramentas de avaliação adequados à instituição de interesse;
- (iii) Aplicar o modelo proposto na instituição de interesse com o auxílio de uma ferramenta computacional;
- (iv) Interpretar os resultados da aplicação do modelo proposto;
- (v) Validar os resultados com os decisores da instituição de interesse.

1.3 Justificativa

De acordo com Shamayleh, Awad e Abdullah (2020), o crescimento no número e na complexidade dos EMHs forçam os hospitais a estabelecerem e regulamentarem programas de manutenções para garantir a segurança e a confiabilidade dos dispositivos médicos. Adicionalmente, estudos demonstram que os custos com a manutenção desses equipamentos variam entre 5% (cinco por cento) e 10% (dez por cento) do faturamento das instituições a qual pertencem (FORTE, 2017), o que poderia ser reduzido caso existissem políticas de gerenciamento adequadas (HAMDI et al., 2012).

Conforme Ridgway (2001), a maioria das agências de fiscalização exige dos estabelecimentos de saúde um programa de manutenção para os EMHs críticos. No entanto, não existe um consenso sobre quais equipamentos se enquadram nessa categoria. Para Van Horenbeek et al. (2010), os modelos de priorização de manutenção de equipamentos médicos disponíveis na literatura concentraram-se em um número limitado de critérios, podendo gerar uma lacuna entre a teoria e a prática, principalmente quando aplicados em ambientes com realidades distintas (BAHREINI; DOSHMANGIR; IMANI, 2018; DOMÍNGUEZ; CARNERO, 2020). Nesse sentido, é pouco provável que um único modelo de priorização com uma lista de critérios preestabelecido possa representar todas as realidades existentes no setor hospitalar.

Desse modo, nota-se que a modelagem da realidade do local de interesse é uma etapa importante no processo de priorização, pois, se definida de forma equivocada, pode comprometer ou distorcer os resultados. Assim, faz-se necessário um modelo adaptativo que descreva um caminho prático para os tomadores de decisão ajustarem as diferentes realidades com os critérios e as ferramentas que atendam às preferências de uma classificação de risco mais próxima de cada realidade. Dito isso, o modelo proposto envolve os tomadores de decisão desde a concepção do modelo até o resultado da priorização das manutenções, aproximando teoria e prática na instituição estudada.

Dessa forma, como a priorização da manutenção de EMHs é normalmente um problema de tomada de decisão em grupo e, a depender do nível de conhecimento dos especialistas envolvidos, inserem-se muitas incertezas no processo de avaliação, o problema deve ser bem estruturado e moldado (MAHFOUD; ABDELLAH; BIYAALI, 2018b). Assim, esta pesquisa pretende também apresentar um roteiro prático para modelar a realidade de diferentes ambientes de saúde, oferecendo, nas seções específicas, uma síntese dos principais critérios e ferramentas

de avaliação utilizados nos modelos existentes. Para evidenciar o caminho prático da metodologia, o modelo proposto foi aplicado na rede hospitalar que deu origem ao problema de pesquisa, conforme será apresentado nas seções a seguir.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Estrutura do trabalho de dissertação

Capítulo 1 Introdução	Capítulo 2 Fundamentação teórica	Capítulo 3 Modelos de priorização de manutenção de EMHs	Capítulo 4 Procedimentos metodológicos	Capítulo 5 Resultados	Capítulo 6 Conclusões
- Definição do tema e problema de pesquisa; - Objetivo geral e específicos da pesquisa; - Justificativa teórica e prática da pesquisa; - Estrutura do trabalho.	- Origem e evolução da manutenção; - Principais tipos de manutenção; - Principais conceitos da Engenharia Clínica; - PGEMH.	- Busca e seleção de referências; - Visão geral do portfólio com o resumo dos modelos de priorização encontrados. - Levantamento dos critérios de priorização utilizados no portfólio; - Levantamento das ferramentas de avaliação utilizadas no portfólio.	- Procedimento para o desenvolvimento do modelo proposto; - Procedimento para escolha das unidades que representam a instituição estudada; - Procedimentos para aplicação do modelo proposto.	- Descrição e análise dos resultados; - Discussão dos resultados.	- Atendimento aos objetivos; - Contribuições científicas e práticas; - Limitações da pesquisa.

Fonte: elaborado pelo autor

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manutenção

A ABNT define manutenção como “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida” (ABNT, 1994, p. 6). Adicionalmente, Mostafa et al. (2015) afirmam que a manutenção tem o objetivo de aumentar a confiabilidade, a segurança, a disponibilidade e a qualidade do ativo (por exemplo, na planta de produção, nos equipamentos ou no edifício) com custos econômicos aceitáveis.

De modo geral, a manutenção é o conjunto de técnicas para assegurar que os ativos (equipamentos, sistemas, instalações) continuem a fazer o que os usuários querem que eles façam (MOUBRAY, 1997). Do ponto de vista da saúde, a intervenção realizada para restabelecer o funcionamento do equipamento não pode provocar alterações que modifiquem o projeto de fabricação dos produtos sujeitos ao controle sanitário, ou seja, não se pode modificar componentes básicos, nome e demais elementos do objeto do registro sem a necessária autorização do órgão sanitário competente (ABNT, 2011). A seção seguinte detalha como a manutenção evoluiu ao longo do tempo.

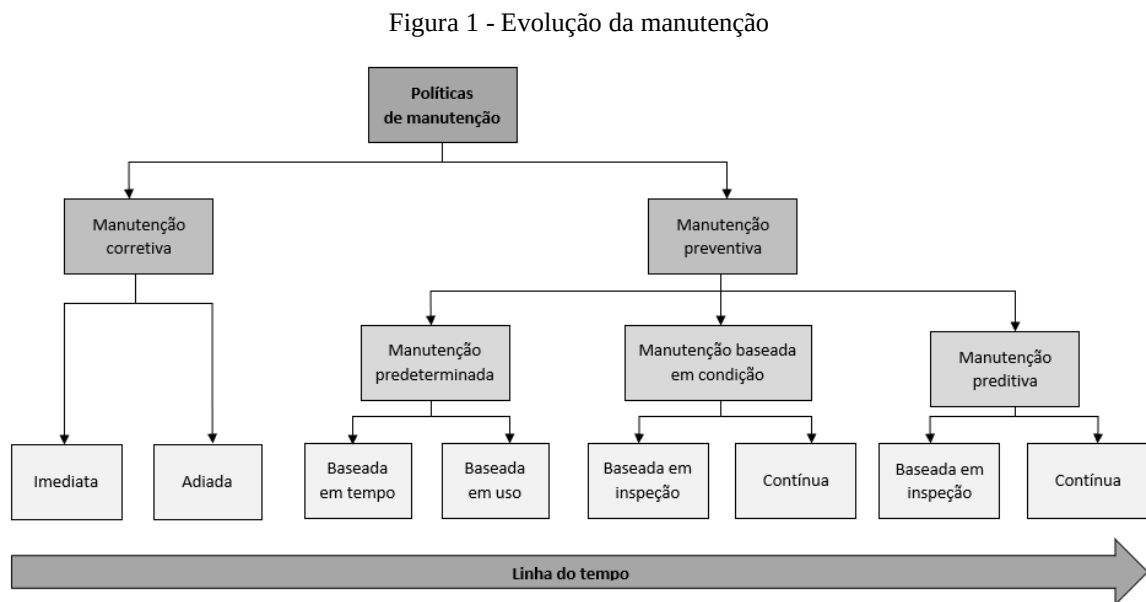
2.1.1 Origem e evolução da manutenção

As técnicas de gerenciamento de manutenção evoluíram de processos mais simples para outros mais complexos ao longo do tempo. A necessidade de melhoria da estratégia de manutenção se tornou imprescindível devido à maior complexidade dos novos processos de fabricação, da qualidade dos produtos, da redução de custos e do impacto no meio ambiente (MUTIA; MUKHONGO; CHEMWENO, 2018). Em virtude da crescente importância do gerenciamento da manutenção, o processo passou por sucessivas mudanças nas últimas décadas (MAHFOUD; BARKANY; BIYAALI, 2016a).

Inicialmente, na primeira geração, a indústria não era automatizada e os equipamentos, em sua maioria, eram simples e fáceis de reparar. Portanto, a estratégia adotada nesse período incluía basicamente manutenções corretivas, ou seja, intervir nos equipamentos apenas quando apresentam falhas. Além disso, nessa época não existia recursos disponíveis ou estudos prévios para se antecipar às falhas, sendo realizadas apenas manutenções posteriormente à quebra, ocasionando redução na produção (ARUNRAJ; MAITI, 2007).

Na segunda geração, a indústria se tornou mais automatizada, agregando confiabilidade ao sistema de modo que os conceitos de manutenção preventiva, manutenção baseada em tempo

e sistema de planejamento e controle do trabalho foram adotados pela indústria e se tornaram conhecidos mundialmente (MUTIA; MUKHONGO; CHEMWENO, 2018). Masmoudi et al. (2016) descrevem a manutenção preventiva como intervenções periódicas com o objetivo de reduzir a taxa de falha dos equipamentos. Por outro lado, os procedimentos preventivos requerem maiores investimentos financeiros e recursos humanos. A Figura 1 apresenta um diagrama com estratégias de manutenção desenvolvidas ao longo do tempo.

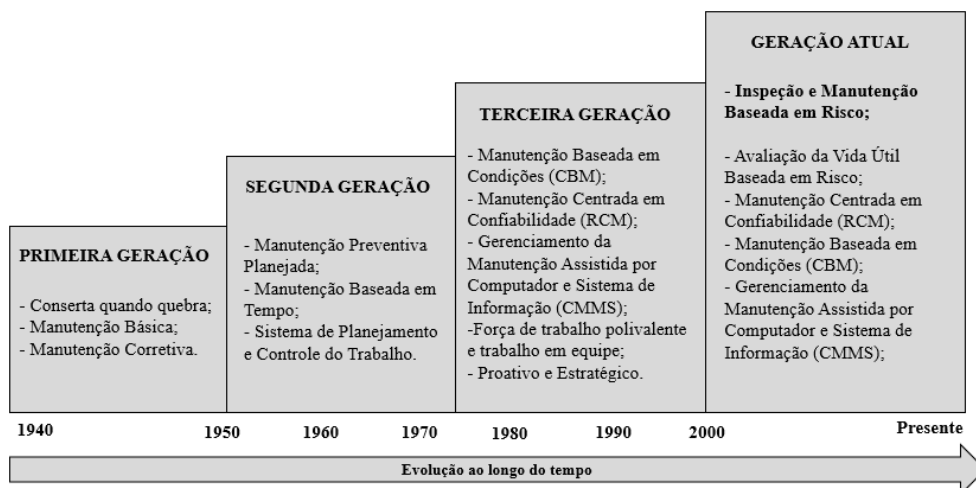


Fonte: adaptado de Mahfoud, Barkany e Biyaali (2016a)

Na terceira geração, a automação cresceu ainda mais, levando as organizações a implementarem estratégias de manutenção que incluíam: *Reliability Centered Maintenance* (RCM), *Condition-based maintenance* (CBM) e *Computerized maintenance management system* (CMMS). Tal geração buscava desencadear atividades apenas quando houvesse evidências de deterioração dos ativos, a fim de reduzir as ações desnecessárias (MAHFOUD; BARKANY; BIYAALI, 2016a). A Figura 2 classifica a evolução da manutenção em gerações ao longo do tempo.

Por fim, a geração atual da manutenção se inicia nos anos 2000 e tem como objetivo principal integrar as técnicas de manutenção com as políticas de segurança. Nesse sentido, a principal novidade da presente geração é a *Risk-Based Maintenance* (RBM), podendo ser combinada com a RCM e a CBM, não se limitando a uma única estratégia (ARUNRAJ; MAITI, 2007).

Figura 2 - Desenvolvimento da manutenção



Fonte: adaptado de Mutia et al. (2018)

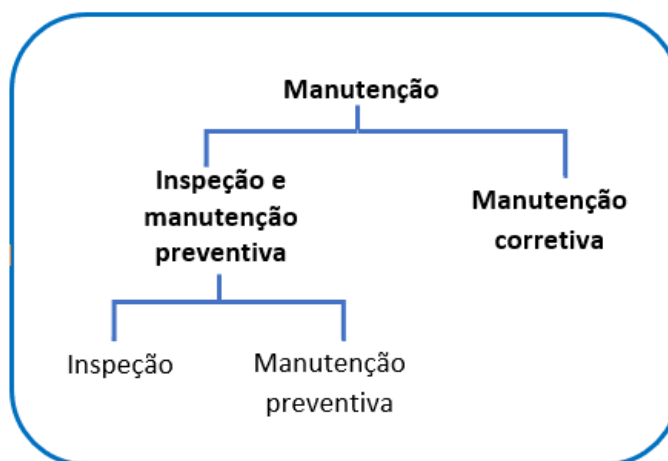
Nas organizações de saúde, a manutenção é uma atividade que requer altos investimentos, principalmente quando aplicada em um grande quantitativo de EMHs. Portanto, o planejamento da manutenção deve ser parte de um esforço amplo, com o objetivo de traçar uma estratégia adequada para cada equipamento médico (WHO, 2011). De acordo com Mahfoud, Barkany e Biyaali (2018b), elaborar um plano de manutenção adequado às necessidades de cada estabelecimento de saúde é um grande desafio para seus gestores, o que torna indispensável o conhecimento dos conceitos básicos apresentados nesta seção.

2.1.2 Classificação da manutenção

Para Kardec e Nascif (2001), as principais estratégias de manutenção são: corretiva não planejada, corretiva planejada, preventiva, preditiva e detectiva. A escolha por uma ou outra abordagem depende das particularidades do sistema no qual será aplicado o plano de manutenção. Ademais, observa-se que não há uma unanimidade entre os autores com relação à relevante variedade da terminologia atual (LUCATELLI, 2002).

De acordo com a WHO, a manutenção em estabelecimentos assistenciais de saúde está dividida em duas principais categorias. A primeira é a manutenção corretiva e a segunda é a *Inspection and Preventive Maintenance* (IPM). A manutenção corretiva tem o propósito de restaurar a função do equipamento quando ele falha, colocando-o novamente em operação. Em contrapartida, a IPM inclui todas as atividades programadas que garantem a funcionalidade do equipamento e reduzem as quebras ou panes (WHO, 2011). A Figura 3 mostra os principais tipos de manutenção empregados na saúde, consoante WHO (2011).

Figura 3 - Classificação da manutenção



Fonte: adaptado de WHO (2011)

2.1.2.1 Manutenção corretiva em EMHs

Para Taghipour, Banjevic e Jardine (2011b) e Jamshidi et al. (2015), a manutenção corretiva é executada apenas após a detecção da falha. Logo, o tempo de inatividade não planejado e o uso ineficiente da equipe técnica para reparar o equipamento podem gerar custos altos. Esse pensamento está alinhado com as definições da ABNT (1994), que estabelece manutenção corretiva como sendo a manutenção efetuada posteriormente à ocorrência de uma pane, destinada a repor o ativo em condições de executar uma função requerida. Conforme Masmoudi et al. (2016), essa estratégia de manutenção deve ser aplicada apenas em EMHs não críticos.

2.1.2.2 Manutenção preventiva em EMHs

De acordo com Hyman (2003), a realização da manutenção preventiva é papel fundamental da engenharia clínica, tendo como objetivo garantir a segurança e o desempenho contínuo dos EMHs, bem como preservar os investimentos por meio da melhoria da longevidade. De acordo com a ABNT (1994), essa é uma manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item. Na mesma direção, Wang et al. (2007) afirmam que é uma manutenção realizada antes que ocorra a falha do sistema, com o propósito de manter o equipamento médico nas condições preestabelecidas, realizando inspeções sistemáticas, detecção e prevenção de falhas. Para Jamshidi et al. (2015), essa estratégia de manutenção é recomendada para equipamentos médicos de baixa criticidade.

2.1.2.3 *Condition-based maintenance* em EMHs

Conforme Mahfoud, Barkany e Biyaali (2016b), essa estratégia usa dados em tempo real para prever falhas e otimizar as práticas de manutenção, sendo recomendada para equipamentos de alta criticidade. Pela definição da ABNT (1994), a CBM busca garantir uma qualidade para o serviço desejado com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva. Complementarmente, Masmoudi et al. (2016) afirmam que essa é uma estratégia que requer avaliação regular das condições do sistema e usa sensores especiais para medir as variáveis de predição. Além disso, necessita de um modelo estatístico para relacionar os dados com as condições desejadas para o equipamento analisado.

Diante do crescimento do quantitativo e da complexidade dos EMHs nos estabelecimentos assistenciais de saúde, faz-se necessário conhecer a área responsável por aplicar as estratégias de manutenção mencionadas (engenharia clínica), assim como os conceitos básicos do PGEMH.

2.2 Engenharia Clínica

Nos Estados Unidos, a partir do final dos anos sessenta, a preocupação com a segurança do paciente incentivou engenheiros de diferentes especialidades a buscar melhorias nos processos e nas tecnologias deste mercado. Mais tarde, esses profissionais foram denominados como engenheiros clínicos (BRONZINO, 2006). Durante a década de setenta, com a consolidação da engenharia clínica, houve uma grande demanda por profissionais para gerenciar e implementar novas tecnologias em hospitais americanos (BRONZINO, 2006). Ainda de acordo com Bronzino (2006), diante da inserção do profissional de engenharia clínica nos estabelecimentos assistenciais de saúde e a partir de inspeções rotineiras, foi verificada a existência de falhas na segurança elétrica dos equipamentos médicos, sobretudo, devido ao mal-uso e à inexistência de gestão da manutenção.

No Brasil, a importância do planejamento e gerenciamento dos EMHs passou a ser discutida pelas autoridades entre 1980 e 1990. A participação em reuniões internacionais e os intercâmbios de informações foram os primeiros passos na direção do entendimento de que a ausência de um profissional especializado em gerenciamento de manutenção de equipamentos

médicos era um problema crítico. Em 1992, o Ministério da Saúde publicou um documento que descreveu a relevância do técnico em equipamentos biomédicos, e propôs uma estratégia para qualificação desses profissionais no país. Desde então, universidades estaduais e federais brasileiras começaram seus programas para formar engenheiros clínicos (BRITO, 2004).

Em 2010, a ANVISA publicou a RDC nº 02, com o objetivo de estabelecer os critérios mínimos a serem adotados pelos estabelecimentos assistenciais de saúde acerca do gerenciamento do parque tecnológico. A resolução abriu caminho para garantir rastreabilidade, qualidade, eficácia, efetividade, segurança e desempenho dos EMHs no Brasil, desde a entrada no EAS até o descarte adequado, incluindo o planejamento dos recursos físicos, materiais e humanos, bem como a capacitação dos profissionais envolvidos. Esse planejamento é denominado, no meio profissional, como PGEMH.

Para a maior rede de hospitais públicos do Brasil, a Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (EBSERH), todos os procedimentos que envolvam EMHs são atribuídos ao engenheiro clínico. Esses procedimentos incluem a participação no planejamento da aquisição de novas tecnologias, o treinamento dos operadores, o gerenciamento da manutenção, o conhecimento e controle das instalações hidráulicas e elétricas, e a participação no gerenciamento de leitos do EAS (EBSERH, 2018).

Assim, fica clara a importância da engenharia clínica na elaboração do PGEMH, trabalhando de forma multidisciplinar com as outras áreas do EAS, colaborando nas tomadas de decisão durante todo o ciclo de vida da tecnologia médica. Além disso, a engenharia clínica tem a responsabilidade de atuar diretamente em assuntos regulatórios, de modo a garantir o atendimento à legislação vigente.

2.3 Plano de gerenciamento de equipamentos médico-hospitalares

O PGEMH consiste em um conjunto de procedimentos de gestão, planejados e implementados a partir de bases científicas e técnicas, com o objetivo de garantir a rastreabilidade, qualidade, eficácia, efetividade, segurança e o desempenho dos EMHs utilizados diretamente ou indiretamente nos cuidados dispensados ao paciente (ANVISA, 2010).

Como citado anteriormente, as políticas de gerenciamento de manutenção de EMHs ganharam força no Brasil com a publicação da RDC nº 02 (2010) e RDC nº 590 (2021) da ANVISA. Em complemento, a ABNT também estabeleceu a obrigatoriedade de um PGEMH com a publicação da NBR 15943 (2011). Essa norma estabelece os requisitos mínimos para um

programa de gerenciamento com o objetivo de minimizar os riscos associados aos equipamentos utilizados pelos serviços de saúde. Baseada na ABNT NBR 15943 (2011), na ANVISA RDC nº 02 (2010) e na ANVISA nº 509 (2021), a EBSEH, maior rede de hospitais públicos do Brasil, publicou uma norma operacional que define os requisitos mínimos para a elaboração do PGEMH. O Quadro 2 descreve os principais conceitos que compreendem o PGEHM.

Quadro 2 - Principais conceitos e definições do PGEMH

Conceito	Definição
Planejamento, Seleção e Aquisição	Estudo de necessidade que dá origem ao processo de incorporação de um EMH. Nesta etapa é estudada a demanda dos serviços assistenciais que justifique a aquisição. Para tal, também se faz necessário estudos econômicos sobre os custos de incorporação e operacionalização, além de verificar eventuais adequações da infraestrutura física e dimensionamento dos recursos humanos e técnicos necessários para a operação do equipamento a ser adquirido.
Instalação	Dispõe sobre os requisitos a serem atendidos para a instalação de EMHs em estabelecimentos assistenciais de saúde, são alguns deles: dimensões e características das áreas físicas, variações de temperatura e umidade, rota de acesso, energia, proteções radiológicas e energéticas, legislação vigente entre outros.
Treinamento	Dispõe sobre a capacitação das equipes envolvidas necessária para operar adequadamente o equipamento com segurança ao paciente.
Uso do Equipamento	Processo que compreende a utilização do EMH para a finalidade e modo de uso aprovados pela ANVISA e determinados pelo fabricante. Este procedimento visa assegurar a rastreabilidade do uso dos EMHs ao incluir os dados sobre o paciente que faz uso dele e de seus operadores.
Intervenção Técnica (Manutenções)	Dispõe sobre os requisitos necessários para intervir tecnicamente sobre um equipamento com o intuito de verificação, análise ou manutenção. Nesta etapa, elabora-se, dentre outros, procedimentos para inspeção, manutenção, calibração e teste de segurança elétrica dos EMH.
Registro Histórico	Tem por finalidade registrar todas as atividades pelas quais os EMHs foram submetidos ao longo do seu ciclo de vida.
Desativação	Uso de critérios técnicos para definir as condições em que os EMHs devem ser desativados.
Gerenciamento de Risco	Trata sobre a aplicação sistemática de políticas de gestão, procedimentos e práticas na análise, avaliação, controle e monitoramento de risco, com o objetivo de mitigar os riscos clínicos e não clínicos intrínsecos ao serviço.
Avaliação do Plano de Gerenciamento de Equipamentos	Ato periódico de valorar os resultados alcançados até o momento, as ações em andamento e aquelas que não tenham sido realizadas, para determinar se os objetivos estão sendo atingidos e para orientar a tomada de decisões.

Fonte: adaptado de EBSEH (2018)

Para a construção de um PGEMH convergente com as particularidades dos estabelecimentos assistenciais de saúde, é imprescindível que os elaboradores modelem o problema de priorização considerando as diferentes realidades e comportamento de preferência das instituições. Para melhor compreensão do tema, o próximo capítulo apresentará o processo de busca e seleção das referências estudadas e os principais conceitos dos modelos de priorização de manutenção de equipamentos médicos encontrados na literatura. Adicionalmente, o capítulo também revelará as principais deficiências desses trabalhos, de modo que o modelo proposto nesta pesquisa busque saná-las.

3 MODELOS DE PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DE EMHs

Após a descrição do processo de busca e seleção de referências, este capítulo apresenta uma visão geral do portfólio de artigos coletados para uma análise dos modelos de priorização de manutenção de equipamentos médicos disponíveis na literatura. Em seguida, os critérios de priorização utilizados pelos autores são apresentados de forma consolidada com as suas respectivas definições inequívocas. Por último, são apresentados os conceitos das principais ferramentas de avaliação utilizadas no portfólio, bem como um comparativo entre elas do ponto de vista dos seus atributos.

3.1 Busca e seleção de referências

Num primeiro momento, a necessidade desta pesquisa foi originada da prática, considerando que o autor vislumbrou a necessidade de adotar um modelo de priorização de manutenção de equipamentos para compor o PGEMH da rede hospitalar onde trabalha. Em buscas iniciais na literatura, foi possível observar que havia modelos de priorização disponíveis, mas sem diretrizes que pudessem esclarecer para quais situações eles eram adequados. A partir disso, buscou-se realizar um estudo mais detalhado dos modelos existentes.

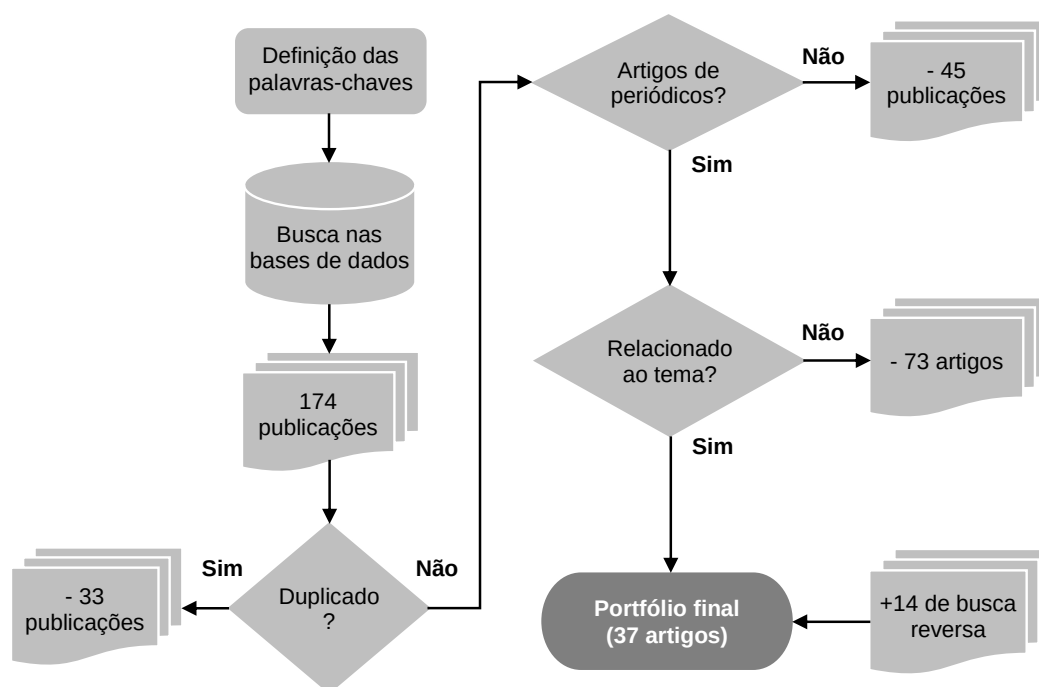
O primeiro passo na condução da busca e seleção dos trabalhos relacionados ao tema foi a pesquisa exploratória, uma vez que, por meio das leituras iniciais, foi possível ter um entendimento geral sobre o tema e assim poder estabelecer os termos de busca para a coleta nas bases de dados. Posteriormente à leitura de alguns trabalhos, foram escolhidos os termos de busca: “*maintenance**”, “*prioritization*”, “*medical device**” e “*medical equipment**”. Esses termos foram aplicados nas bases de dados: *Web of Science*, *Scopus*, *Emerald*, *Science Direct* e *Google Scholar*, com a busca nos campos “título”, “resumo” e “palavras-chave”. Tal procedimento resultou em 174 publicações com títulos alinhados ao tema.

Em seguida, foram excluídos os trabalhos repetidos pois eventualmente bases de dados diferentes traziam a mesma publicação. Posteriormente, buscou-se restringir o portfólio com publicações do tipo artigo de periódico científico, a fim de estabelecer um critério de qualidade por meio da revisão por pares. Feito isso, os resumos dos artigos remanescentes foram lidos de modo a selecionar somente aqueles que tratavam de pesquisa envolvendo modelos de priorização para a manutenção de EMHs. Assim, foram selecio-

nados 23 artigos publicados em periódicos, todos em língua inglesa. É importante mencionar que não foram colocadas restrições quanto ao início do ano de publicação, considerando os artigos publicados até dezembro de 2021.

Durante a leitura dos 23 artigos selecionados foi possível identificar modelos que não tinham sido capturados no portfólio inicial, alguns provenientes de fontes diferentes de periódicos científicos (normas, documentos de órgãos setoriais, entre outros), mas que passaram pelo crivo de relevância ao serem amplamente citados. Assim, optou-se por verificar as referências dos artigos do portfólio inicial, em um procedimento conhecido como busca reversa (WEBSTER, JANE; WATSON, 2002; XIAO; WATSON, 2019). A partir da busca reversa (*backward search*), foram adicionadas 14 publicações, totalizando um portfólio 37 trabalhos. A Figura 4 apresenta o fluxo realizado para buscar e selecionar os trabalhos relacionados ao tema, bem como os filtros aplicados em cada etapa.

Figura 4 - Fluxo do processo de busca e seleção



Fonte: elaborada pelo autor

3.2 Visão geral do portfólio

Notadamente, o primeiro método de tomada de decisão para priorizar a manutenção de equipamentos médicos foi desenvolvido por Fennigkoh e Smith (1989). Esse mé-

todo propõe uma avaliação de risco usando três critérios: Função, Risco Físico e Requisitos de Manutenção. A soma dos números atribuídos para cada critério (segundo a escala proposta pelo autor) recebeu o nome de *Equipment Management* (EM), conforme Equação (1).

$$EM = \text{função} + \text{risco físico} + \text{requisitos de manutenção} \quad (1)$$

No estudo supracitado, os autores propuseram que EMHs com EM acima do valor crítico (≥ 12) fossem inseridos no plano de manutenção preventiva. Apesar da simplicidade do modelo de Fennigkoh e Smith, ele foi de grande impacto para a prática atual da engenharia clínica, influenciando profissionais e órgãos de regulamentação da área, ao passo que estabeleceu parâmetros de priorização de manutenção para os equipamentos médicos, enfatizando o efeito coletivo de diferentes critérios (multicritério), algo incomum para a época que foi lançado.

No mesmo ano de lançamento do modelo pioneiro, a *The Joint Commission on Accreditation of Healthcare Organizations* (JCAHO) reafirmou a importância do método de Fennigkoh e Smith, e anos mais tarde o publicou no padrão EC6.10 (JCAHO, 2004). Entretanto, de acordo com Jamshidi et al. (2015), esse método não é apropriado para o gerenciamento de risco porque calcula apenas a soma dos valores de três critérios, atribuindo o mesmo peso para todos. Além disso, o método é pouco sensível às variações nos valores dos riscos, como também não considera a opinião de múltiplos especialistas, que geralmente são envolvidos nas situações práticas de priorização de equipamentos.

Em 1996, a ASHE propôs um modelo para classificar a prioridades dos EMHs de acordo com cinco critérios de risco: Função do Equipamento (E), Aplicação Clínica (A), Requisitos de Manutenção Preventiva (P), Probabilidade de Falha (F) e Uso Ambiental (U). Para a ASHE, a avaliação da criticidade de cada EMH deveria ser realizada pela Equação (2). É possível observar no estudo que, além da inserção de novos critérios, o novo método atribuiu pesos diferentes para as variáveis analisadas.

$$T = E + A + \left(\frac{P+F+U}{3} \right) \quad (2)$$

Em 2000, Wang e Levenson sugeriram substituir o critério Função proposto por

Fennigkoh e Smith (1989) pelo critério Criticidade da Missão e adicionar o subcritério Taxa de Utilização do Equipamento (UR) ao modelo. Para Wang e Levenson (2000), o *Equipment Management Ranking* (EMR) deve ser calculado pela Equação (3):

$$EMR = (\text{críticidade da missão} + 2 * \text{requisitos de manutenção}) * UR + 2 * \text{risco} \quad (3)$$

Avançando na linha do tempo, em 2001, Ridgway propôs uma abordagem analítica utilizando informações técnicas disponíveis ou que podem ser facilmente coletadas, a fim de caracterizar os EMHs de acordo com sua sensibilidade à manutenção. O método possibilitou analisar a sensibilidade de cada EMH à manutenção preventiva, dando um novo olhar para a priorização da manutenção. Por exemplo, um equipamento com alta criticidade, mas com baixa sensibilidade à manutenção preventiva, não necessariamente precisaria estar inserido no plano de manutenção do EAS. Embora o estudo tenha uma abordagem interessante, requer um histórico de registro de manutenção robusto para apoiar a tomada de decisão.

Ainda em 2001, a JCAHO extinguiu a exigência de manutenção preventiva com intervalo mínimo de um ano para todos os EMHs, possibilitando aos estabelecimentos assistenciais de saúde a adotar técnicas de gerenciamento da manutenção, sem a penalidade de realizar procedimentos de manutenção desnecessários (RICE, 2003). Nesse sentido, Rice (2003) propôs um método de otimização da manutenção por meio de uma amostragem multilogística baseada em risco, que inclui a perspectiva dos benefícios para a organização. O método utiliza uma versão simplificada da *Gradient Risk Sampling* (GRS), analisando os critérios função, manutenção requerida, taxa de utilização e histórico de manutenção dos EMHs, formando uma base de valores organizacionais para o plano de gerenciamento da manutenção.

Em seguida, Wang e Rice (2003) acrescentaram à versão simplificada de GRS de Rice a técnica de amostragem de atributos (aceitação). Para os autores, a vantagem do método se torna mais evidente quando combinado com a transferência de conhecimento sobre as *Periodic Safety and Performance Inspections* (SPIs) para os operadores dos equipamentos. Quanto às limitações, o método requer uma estatística robusta, além de uma vasta experiência dos especialistas e uma amostra com tamanho superior a 20 unidades.

Conforme Hyman (2003), o gerenciamento eficiente do plano de manutenção preventiva para EMHs não é uma tarefa fácil. Questões-chaves como os procedimentos e intervalos de manutenção surgem a todo tempo, por exemplo. Portanto, a análise deve estar baseada em dados reais, *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), risco relativo, eficácia da manutenção e incorporação da experiência de campo para controlar ou reduzir os custos, bem como para aumentar a eficácia da manutenção. Então, o estudo propõe não só a adoção da análise de criticidade para definir a priorização dos EMHs, como também um formulário de avaliação de falhas ocorridas após a realização da manutenção preventiva.

De acordo com Wang (2006), apesar do tremendo impacto do modelo apresentado por Fennigkoh e Smith (1989) no âmbito da manutenção de EMHs, em decorrência do tempo transcorrido desde a sua publicação, poucas pessoas leem o artigo original ou entendem completamente as motivações e os objetivos que levaram os autores a proporem o modelo, provocando interpretações e tomadas de decisões equivocadas. Então, em comemoração aos quinze anos do método, Wang publicou uma entrevista com os autores do modelo para esclarecer quais eram suas intenções na época. Na entrevista, é possível observar que os administradores hospitalares, além dos fatores de segurança do paciente, levantados em 1989, cada vez mais estão preocupados com a criticidade da missão dos equipamentos (impacto operacional).

Em 2007, Rice usou a *Fault Tree Analysis* (FTA) no estudo preliminar de aquisições de EMHs para identificar os riscos compostos e específicos, a fim de construir um plano de manutenções preventivas efetivo. No estudo, a composição total do risco (R) é calculado pela Equação (4), que avalia a probabilidade de cada evento acontecer, bem como o impacto do evento na missão do EAS. Como benefício, o autor cita a capacidade de identificar os riscos com poucos dados quantitativos. Por outro lado, a avaliação qualitativa dos especialistas gera incertezas no resultado.

$$R = (probabilidade1 * severidade1) + \dots + (probabilidadeN * severidadeN)(4)$$

Dois anos depois, Youssef e Hyman (2009) propuseram um modelo de avaliação do grau de complexidade dos EMHs para auxiliar a tomada de decisão quanto à aquisição, ao plano de manutenção preventiva e aos treinamentos operacionais. Os autores fornecem

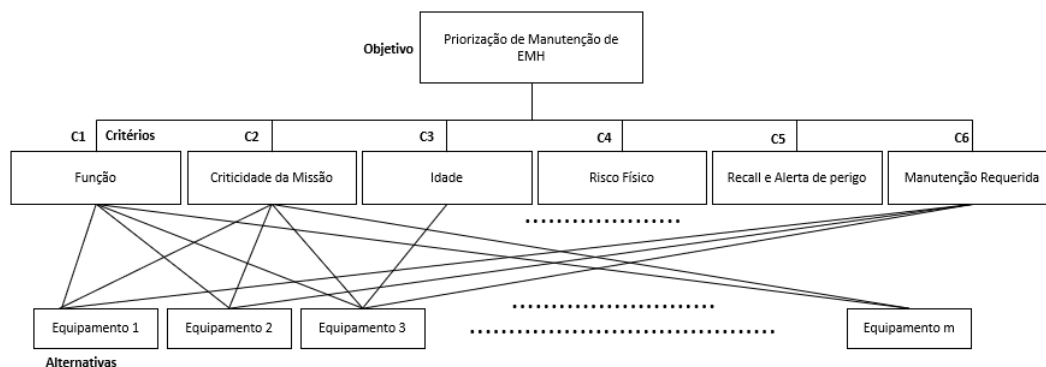
um protótipo de uma ferramenta para calcular o índice total de complexidade combinando duas medidas: complexidade técnica e complexidade de uso. Na aplicação, por meio das respostas dos entrevistados foi obtido o índice de complexidade do equipamento, o que auxiliou a tomada de decisão dos administradores hospitalares para a amostra.

Dando sequência à apresentação dos trabalhos sobre priorização de manutenção de EMHs levantados na literatura, em 2011, a WHO recomendou que o cronograma de manutenção preventiva estivesse alinhado com os recursos humanos e financeiros disponíveis no estabelecimento de saúde. Isto posto, a partir da versão modificada de Fennigkoh e Smith (1989), a WHO (2011) propôs um modelo de priorização de manutenção de EMHs calculado pela Equação (5). Em que pese a WHO (2011) ter acrescentado o critério histórico de falhas do EMH, o método permanece com as mesmas limitações do trabalho de Fennigkoh e Smith (1989): peso igual para todos os critérios e não consideração da opinião de diversos especialistas.

$$EM = Função + Aplicação + Manutenção Requerida + Histórico \quad (5)$$

Ainda em 2011, Taghipour, Banjevic e Jardine (2011b) apresentaram um método de tomada de decisão multicritério para priorizar a manutenção de EMHs a ferramenta AHP. De acordo com os autores, o método possibilita identificar os EMHs críticos, investigar os motivos da criticidade e tomar as devidas ações para reduzir os riscos. O peso de cada critério é determinado ao comparar sua importância relativa frente aos outros critérios avaliados. Portanto, se um novo critério for inserido, ou um existente for excluído da hierarquia, todos os critérios deverão ser reavaliados para encontrar os novos pesos. Embora Taghipour, Banjevic e Jardine (2011b) tenham preenchido algumas lacunas da literatura sobre o tema, o próprio autor sugere um aprimoramento do método a partir do uso da lógica fuzzy para reduzir a subjetividade das respostas dos especialistas. A Figura 5 mostra a hierarquia de decisão para priorizar a manutenção de EMHs.

Figura 5 - Hierarquia de decisão para priorização de EMHs



Fonte: adaptado de Taghipour, Banjevic e Jardine (2011b)

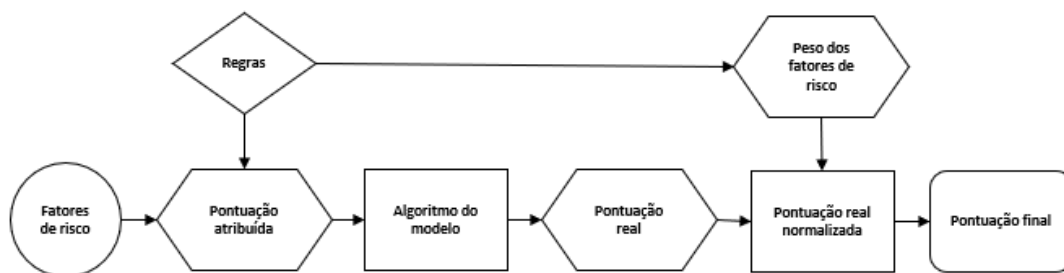
Ainda em 2012, Al-Bashir et al. propuseram a implantação do *Quality Function Deployment* (QFD) como uma ferramenta de melhoria no sistema de gerenciamento da manutenção, com o objetivo de encontrar as fragilidades técnicas da equipe de manutenção e, assim, definir os procedimentos adequados para alcançar a satisfação do cliente. Como resultado, os autores descobriram que o tempo de resposta às falhas, a segurança, a calibração e a disponibilidade de peças foram os aspectos mais importantes definidos pelos clientes.

Em 2013, Tawfik, Ouda e Samad propuseram um modelo de priorização usando de lógica *fuzzy* na mensuração de quatro critérios: Criticidade da Missão; Função do Equipamento; Requisitos de Manutenção e Riscos Físicos. Os resultados mostram que, em certos casos, o mesmo tipo de equipamento pode atingir diferentes pontuações de risco, a depender das condições de operação de cada um. As principais vantagens desse modelo consistem em gerar pontuações de risco variáveis e reduzir a subjetividade das respostas dos especialistas. No entanto, o método utiliza um número fechado de critérios que pode, eventualmente, não representar as especificidades de todos os estabelecimentos assistenciais de saúde com interesse na aplicação. Além disso, as importâncias relativas entre os critérios poderiam ser mais bem trabalhadas com o AHP, por exemplo.

De acordo com Gaamangwe et al. (2015), a garantia de desempenho é um componente essencial no gerenciamento dos EMHs. Por esse motivo, a comunidade de engenharia clínica vem investindo esforços para definir os critérios de priorização apropriados no desenvolvimento de modelos quantitativos baseados em risco para subsidiar a tomada

de decisão dos administradores hospitalares. Os referidos autores apresentam um *framework* que destaca o vínculo do sistema de qualidade com os principais processos de elaboração do plano de manutenção, com base nos riscos levantados na literatura. Além disso, os autores destacaram a necessidade de mais trabalhos relacionados à pontuação dos riscos. A Figura 6 apresenta um fluxograma típico para destacar os principais processos do sistema de pontuação de riscos.

Figura 6 - Fluxograma típico do sistema de pontuação de risco



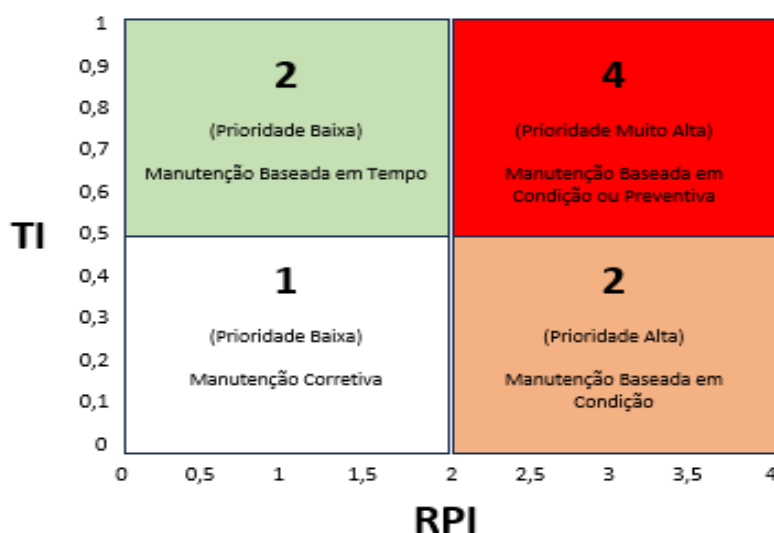
Fonte: adaptado de Gaamangwe et al. (2015)

Também em 2015, Saleh et al. desenvolveram um modelo de priorização usando o QFD como um novo conceito em manutenção de EMHs. O modelo foi estruturado com três domínios: Requisitos, Função e Conceitos. Os requisitos formam a casa da qualidade, a função está inserida na matriz e os conceitos geram um índice de priorização para o plano de manutenção, considerando os pesos dos critérios. O modelo foi testado em um hospital italiano e mostrou uma boa correlação com a lista de prioridades. No entanto, o modelo tem uma forte dependência do conhecimento acumulado dos especialistas.

Ainda em 2015, Jamshidi et al. propuseram um novo modelo de priorização de manutenção de EMHs baseado em risco. A primeira etapa do modelo consiste na aplicação da ferramenta *fuzzy FMEA* (FFMEA) para calcular o *Risk Priority Index* (RPI) de cada EMH. O FFMEA proposto considera três critérios: Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), mais oito subcritérios. Na segunda etapa do modelo, uma soma ponderada de sete dimensões diversas é aplicada para se obter o *Total Intensity* (TI). Dessa forma, são considerados outros aspectos além dos S, O e D. Para determinar o conjunto de pesos (W_d) que reflete a importância relativa de cada dimensão, foi utilizada a ferramenta de avaliação AHP. Por fim, foi proposto um diagrama de planejamento de manutenção com as pontuações produzidas pelo RPI e TI.

A Figura 7 apresenta uma matriz com quatro zonas de priorização: 1 - Baixa prioridade, TI e RPI com índices baixos; 2 - Baixa prioridade, altos índices de TI e baixos de RPI; 3 - Alta prioridade, altos índices de RPI e baixos de TI; e 4 - Prioridade muito alta, altos índices de RPI e TI. Entretanto, Jamshidi et al. (2015) não apresentaram embasamento para a definição dos pesos, o que sugere uma possível arbitrariedade e, portanto, fraqueza do trabalho.

Figura 7 - Diagrama de planejamento da manutenção



Fonte: adaptado de Jamshidi et al. (2015)

Em seguida, Mahfoud, Barkany e Biyaali (2016b) propuseram um modelo híbrido de priorização de manutenção de EMHs baseado em risco. Tal modelo usa a técnica de tomada de decisão por meio de *Multi-Expert Multi-Criteria Decision Making* (MEMC) para classificar os EMHs de acordo com oito critérios de priorização. Em seguida, as pontuações obtidas são usadas para estabelecer diretrizes de gerenciamento da manutenção. Foram utilizadas como ferramentas o AHP e o PROMETHEE. De acordo com os autores, a primeira ferramenta compensa a limitação da segunda na determinação dos pesos, e a segunda proporciona um entendimento mais confiável da variação de percepção entre os especialistas. Entretanto, o método ainda está sujeito a imprecisão do julgamento dos especialistas na determinação dos pesos, o que poderia ser reduzido integrando a ferramenta *fuzzy* ao método.

No mesmo ano, Sezdi (2016) recomendou duas estratégias diferentes de manutenção para os estabelecimentos assistenciais de saúde de países em desenvolvimento: manutenção preventiva para EMHs com tecnologias mais antigas e manutenção preditiva para EMHs novos com alta tecnologia embarcada. O estudo submeteu centenas de EMHs à *Performance Verification and Safety Testing* (PVST). O artigo relata que a PVTS ganha importância para desenvolver estratégias de manutenção para equipamentos sem as recomendações do fabricante.

De acordo com Masmoudi (2016), com o crescente aumento da complexidade e dos custos de aquisição dos EMHs, a reorganização dos departamentos de manutenção se tornou uma prioridade para os administradores hospitalares. Assim, o artigo propôs um modelo para auxiliar a tomada de decisão quanto à melhor estratégia de manutenção para cada equipamento do parque tecnológico, possibilitando a escolha entre uma manutenção interna, uma manutenção externa ou um contrato de manutenção específico para cada dispositivo com base em múltiplos critérios e avaliações de especialistas. Segundo o autor, o procedimento para escolha do melhor tipo de contrato pode ainda ser aprimorado.

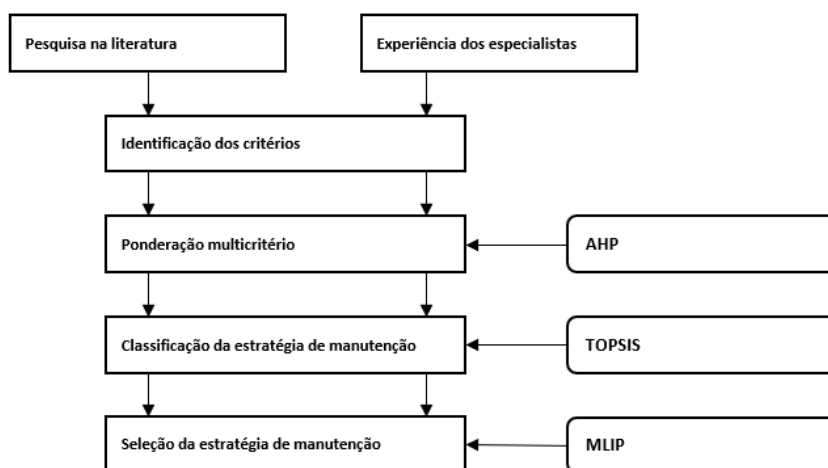
Ainda em 2016, Carnero e Gómez propuseram um modelo de tomada de decisão multicritério que integra cadeias de Markov com a *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* (MACBETH), a fim de facilitar a escolha da melhor estratégia de manutenção usando os julgamentos de um grupo multidisciplinar de especialistas. A proposta considera o nível de aceitação de uma determinada alternativa, bem como critérios relacionados ao custo, qualidade do atendimento e impacto da cobertura do atendimento. Os autores destacam que o modelo proposto deve ser atualizado regularmente, tendo em vista a evolução dos critérios de risco.

Em 2017, Kutor, Agede e Ali estudaram o comportamento do padrão das manutenções de equipamentos de diagnóstico e relacionaram as descobertas a índices para encontrar as causas exatas das falhas. Nesse estudo, os autores concluíram que as principais causas das falhas de equipamentos de diagnóstico são provenientes da falta de conhecimento técnico da equipe de manutenção, da deficiência na obtenção de informações técnicas a respeito dos equipamentos e da falta de manutenções preditivas. Como ferramenta de análise, foram utilizadas a FTA e a análise de Weibull.

Ainda em 2017, Mahfoud, Barkany e Biyaali apresentaram um *framework* conceitual para monitorar o desempenho da manutenção de EMHs com base em uma metodologia de análise funcional: estratégias de manutenção, critérios de confiabilidade, custos de manutenção e riscos físicos. Assim, segundo os autores, é possível redefinir e avaliar os critérios de priorização e direcionar a manutenção preventiva e/ou preditiva para setores sensíveis, encontrando um denominador comum para o desempenho, os riscos físicos e os custos da manutenção.

Conforme Houria et al. (2017), a escolha da melhor estratégia de manutenção para cada EMH é uma decisão gerencial importante para reduzir o tempo de inatividade do equipamento, aumentar a disponibilidade e reduzir os custos de manutenção. Para isso, os autores usaram uma abordagem integrada que inclui três ferramentas de avaliação, a saber: o AHP, a *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e a *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), sendo que esta última já não se destinava mais à priorização, mas à seleção da estratégia de manutenção. A Figura 8 mostra a metodologia proposta por esses autores.

Figura 8 - Metodologia proposta para seleção da estratégia de manutenção



Fonte: adaptado de Houria et al. (2017)

Em 2018, Vala et al. consideraram a complexidade na seleção da melhor estratégia de manutenção para os EMHs de países em desenvolvimento. Para isso, os autores propuseram uma abordagem de manutenção baseada em riscos. A abordagem proposta consiste em quatro etapas: (1) coleta e padronização de dados; (2) análise do modo de falha;

(3) análise da causa raiz e (4) formulação de estratégias de manutenção para mitigar os riscos de falha do equipamento. Para os autores, a abordagem apresenta algumas limitações relacionadas à necessidade de avaliar a eficácia das estratégias propostas, pois requer uma avaliação de dados reais para sua implantação.

Em seguida, Mahfoud, Barkany e Biyaali (2018b) publicaram uma revisão sistemática de literatura, no domínio das estratégias de manutenção de EMHs, categorizando os estudos publicados e sintetizando suas metodologias. O trabalho destaca as questões relevantes para a análise de confiabilidade, incluindo os critérios quantitativos e qualitativos, levando em consideração técnicas de coleta de dados e abordagens aplicadas para encontrar a melhor estratégia de manutenção para cada EMH. Os autores concluem que os modelos existentes ainda podem ser aprimorados, especialmente com relação à análise de confiabilidade dos dispositivos.

Para Hutagalung e Hashibuan (2019), a qualidade de um EAS pode ser avaliada pela confiabilidade e segurança oferecida por seus EMHs. Portanto, decidir o nível de prioridade na realização da manutenção de EMHs se torna um problema para os administradores hospitalares. Partindo desse ponto de vista, os autores propõem um método para determinar o nível de prioridade da manutenção com base no cálculo de criticidade dos EMHs. O índice de criticidade é obtido por meio da avaliação dos critérios e subcritérios a partir da ferramenta AHP.

Ainda em 2019, Jawwad e Saleem (2019) publicaram uma análise do nível de criticidade de EMHs instalados em um hospital do Oriente Médio. A análise levou em consideração o custo do equipamento, a pontuação de risco da ASHE, a confiabilidade e o custo de manutenção. Para os autores, os resultados mostraram que a pontuação de risco da ASHE é uma medida de criticidade deficiente, sendo demonstrado pela divergência com os cálculos realizados no estudo.

Em recente estudo, Hernández-López, Pimentel-Aguilar e Ortiz-Posadas (2020) desenvolveram um índice de prioridade dos EMHs. Tal índice leva em consideração sete fatores a respeito do equipamento: tipo; função; requisitos de manutenção; calibração; idade; localização e grau de perigo. O modelo proposto tem o objetivo de fornecer um guia para definir a prioridade e o número de rotinas de manutenção preventiva necessárias para cada equipamento médico/ano, por meio da Equação (6).

$$IPMEM = \frac{\sum_{i=1}^7 \rho_i * X_i}{432} \quad (6)$$

onde x_i é a variável a ser avaliada e ρ_i é o fator relevância de cada variável, $i = \{1, \dots, 7\}$.

Em seguida, Shamayleh, Awad e Abdullah (2020) propuseram um método baseado no uso da análise de crescimento de confiabilidade para identificar as oportunidades, seguida por um modo completo de FMEA para propor maneiras de reduzir a criticidade. O estudo mostra as deficiências da manutenção preventiva tradicional orientada pelo tempo. Assim, os autores concluem que uma abordagem sistemática da RCM é mais benéfica e mais econômica do que as práticas tradicionais de manutenção preventiva orientada pelo tempo.

Kamal, Taghaddos e Karimi (2021), por sua vez, apresentam o *Case-Based Reasoning* (CBR), levando em consideração um elemento importante na priorização de manutenção, que é a experiência da equipe técnica na manutenção anterior dos mesmos equipamentos. Com a aplicação do CBR, as ordens de serviço atuais são comparadas a um banco de dados de ordens anteriores, permitindo aperfeiçoar a priorização por meio da aprendizagem do sistema. Entretanto, embora o CBR permita a melhoria contínua do sistema, ele depende do julgamento subjetivo dos especialistas. Quando a equipe técnica muda, os resultados de priorização podem divergir. De qualquer forma, o registro do aprendizado anterior pode ajudar a orientar novos gerentes de manutenção na adaptação de seu julgamento à realidade de cada ambiente hospitalar.

No mesmo ano, Zamzam et al. (2021b) propuseram a técnica de agrupamento *k-means* para classificar EMHs em três níveis de prioridade: alta, média e baixa. Os autores utilizaram um conjunto de critérios que caracterizam a urgência e a criticidade para manutenção corretiva, manutenção preventiva e substituição de equipamentos. Com o uso do *k-means*, equipamentos com níveis de desempenho similares nos critérios de priorização são agrupados e classificados nas três faixas de prioridade, respeitando parâmetros mínimos e máximos para cada faixa. A desvantagem dessa ferramenta é que a divisão em três grupos de prioridade pode ser insuficiente quando se tem uma quantidade e uma variedade muito grande de equipamentos. Nesse caso, pode ser necessário uma estratificação mais detalhada, ou mesmo um ranqueamento comum encontrado em outras técnicas de priorização.

Diante da análise de conteúdo, identificou-se a necessidade de sintetizar as informações dos 37 trabalhos do portfólio no Quadro 3. Esse quadro os apresenta por autor, título, critérios de priorização e ferramentas de avaliação adotadas, elementos fundamentais de um modelo de priorização. Os trabalhos também foram organizados em ordem cronológica, de modo que se observa uma intensificação da pesquisa sobre o tema, mesmo considerando o número ainda escasso de publicações.

Quadro 3 - Visão geral do portfólio

Item	Autor	Título	Crítérios	Ferramentas de avaliação
01	Fennigkoh e Smith (1989)	<i>Clinical equipment management</i>	Função do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Requisitos de manutenção	—
02	ASHE (1996)	<i>Clinical equipment risk classification</i>	Função do equipamento Aplicação clínica Requisitos de manutenção Probabilidade de falha Críticidade de área	—
03	Wang e Levenson (2000)	<i>Equipment inclusion criteria: a new interpretation of JCAHO's medical equipment management standard</i>	Críticidade da missão Requisitos de manutenção Taxa de utilização Risco físico (pacientes e usuários)	—
04	Ridgway (2001)	<i>Classifying medical devices according to their maintenance sensitivity: a practical, risk-based approach to PM program management</i>	Sensibilidade à manutenção	—
05	Rice (2003)	<i>A gradient risk sampling method for performance inspection and preventive maintenance</i>	Função do equipamento Severidade Requisitos de manutenção Taxa de utilização Histórico de manutenção	GRS
06	Wang e Rice (2003)	<i>JCAHO's equipment inclusion criteria revisited – application of statistical sampling technique</i>	Críticidade da missão Requisitos de manutenção Taxa de utilização Risco físico (pacientes e usuários)	—
07	Hyman (2003)	<i>The theory and practice of preventive maintenance</i>	Severidade Frequência de falhas	FMEA
08	Wang (2006)	<i>Fennigkoh and Smith model for inclusion criteria: 15-year retrospective</i>	Função do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Requisitos de manutenção Críticidade da missão	—

Item	Autor	Título	Critérios	Ferramentas de avaliação
09	Rice (2007)	<i>Medical device risk based evaluation and maintenance using fault tree analysis</i>	Função do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Histórico de manutenção Requisitos de manutenção Custo de manutenção	FTA
10	Youssef e Hyman (2009)	<i>A medical device complexity model: a new approach to medical equipment management</i>	Complexidade técnica Complexidade de uso	—
11	Taghipour, Banjevic e Jardine (2011b)	<i>Prioritization of medical equipment for maintenance decisions</i>	Função do equipamento Criticidade da missão Idade do equipamento Recalls e alertas de perigo Requisitos de manutenção Taxa de utilização Disponibilidade de <i>backup</i> Frequência de falhas Detectabilidade Consequência das falhas Tempo de inatividade Custo de manutenção Segurança e ambiente	AHP
12	WHO (2011)	<i>Medical equipment maintenance programme overview</i>	Função do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Requisitos de manutenção Histórico de manutenção	—
13	Al-Bashir <i>et al.</i> (2012)	<i>Building medical devices maintenance system through quality function deployment</i>	Rapidez de resposta Confiabilidade Disponibilidade de <i>backup</i> Reprodutibilidade	QFD
14	Hamdi <i>et al.</i> (2012)	<i>An intelligent healthcare management system: a new approach in work-order prioritization for medical equipment maintenance requests</i>	Função do equipamento Localização (criticidade de área) Disponibilidade de <i>backup</i> Tempo de requisição de manutenção Distância até o equipamento Taxa de ocupação do hospital	—
15	Tawfik, Ouda e Samad (2013)	<i>A fuzzy logic model for medical equipment risk classification</i>	Criticidade da missão Função do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Requisitos de manutenção	Fuzzy logic

Item	Autor	Título	Critérios	Ferramentas de avaliação
16	Jamshidi et al. (2015)	<i>A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices</i>	Detectabilidade Probabilidade de falha <i>Mean Time Between Failures</i> (MTBF) Repetitividade (frequência de ocorrência da mesma falha) Visibilidade da falha Severidade Segurança do paciente Risco para o usuário (operador) <i>Mean Time to Repair</i> (MTTR) Custo de manutenção Custo associado à demora no tratamento Idade do equipamento Complexidade de uso Taxa de utilização Disponibilidade de <i>backup</i> <i>Recalls</i> e alertas de perigo Função do equipamento Requisitos de manutenção	Fuzzy logic FMEA AHP
17	Saleh et al. (2015)	<i>Preventive maintenance prioritization index of medical equipment using quality function deployment</i>	Função do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Requisitos de manutenção Taxa de utilização Críticidade de área Críticidade da missão Frequência de falhas Tempo remanescente de vida útil Complexidade técnica Manutenções não realizadas Tempo de inatividade	QFD
18	Gaamangwe et al. (2015)	<i>Medical device risk management for performance assurance optimization and prioritization</i>	Função do equipamento Consequência das falhas	—
19	Mahfoud, Barkany e Biyaali (2016b)	<i>A hybrid decision-making model for maintenance prioritization in health care systems</i>	Função do equipamento <i>Recalls</i> e alertas de perigo Taxa de utilização Disponibilidade de <i>backup</i> Idade do equipamento Obsolescência tecnológica Requisitos de manutenção Detectabilidade Probabilidade de falha Consequência das falhas	AHP PROMETHEE
20	Carnero e Gómez (2016)	<i>A multicriteria decision making approach applied to improving maintenance policies in healthcare organizations</i>	Custo de manutenção Qualidade do tratamento Grau de aceitação do mantenedor Impacto na capacidade de atendimento	MACBETH

Item	Autor	Título	Crerios	Ferramentas de avaliao
21	Sezdi (2016)	<i>Two different maintenance strategies in the hospital environment: preventive maintenance for older technology devices and predictive maintenance for newer high-tech devices</i>	Função do equipamento Risco para o paciente Requisitos de manutenção	—
22	Masmoudi et al. (2016)	<i>Decision support procedure for medical equipment maintenance management</i>	Complexidade técnica Função do equipamento Detectabilidade Tempo de inatividade Segurança (paciente e usuário) Frequência de falhas Críticidade da missão Idade do equipamento Custo de manutenção Carga de trabalho	—
23	Houria et al. (2016)	<i>Quantitative techniques for medical equipment maintenance management</i>	Complexidade técnica Função do equipamento Detectabilidade Frequência de falhas Tempo de inatividade Segurança (paciente e usuário) Custo de manutenção Críticidade da missão Taxa de utilização Idade do equipamento Disponibilidade de <i>backup</i> <i>Recalls</i> e erros do usuário Classe do equipamento	AHP TOPSIS
24	JCI (2017)	<i>Accreditation standards for hospitals</i>	Função do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Requisitos de manutenção	—
25	Mahfoud, Barkany e Biyaali (2017)	<i>Medical maintenance performance monitoring: a roadmap to efficient improvement</i>	Confiabilidade Custo de manutenção Segurança (paciente e usuário)	—
26	Kutor, Agedo e Ali (2017)	<i>Maintenance practice, causes of failure and risk assessment of diagnostic medical equipment</i>	Histórico de manutenção	FTA
27	Mahfoud, Barkany e Biyaali (2018)	<i>Dependability-based maintenance optimization in healthcare domain</i>	Função do equipamento Aplicação clínica Críticidade da missão Risco físico (pacientes e usuários) Requisitos de manutenção Taxa de utilização Probabilidade de falha Críticidade de área Consequência das falhas	—

Item	Autor	Título	Critérios	Ferramentas de avaliação
28	Vala <i>et al.</i> (2018)	<i>A risk-based maintenance approach for critical care medical devices: a case study application for a large hospital in a developing country</i>	Histórico de manutenção Frequência de falhas Tempo de inatividade	FMEA
29	Jawwad e Saleem (2019)	<i>Criticality analysis of medical equipment: a case study at King Hussein Cancer Center (KHCC) Amman-Jordan</i>	Custo do equipamento Custo de manutenção Confiabilidade Função do equipamento Aplicação clínica Requisitos de manutenção Probabilidade de falha Críticidade de área	—
30	Hutagalung e Hasibuan (2019)	<i>Determining the priority of medical equipment maintenance with analytical hierarchy process</i>	Complexidade técnica Função do equipamento Detectabilidade Frequência de falhas Tempo de inatividade Segurança (paciente e usuário) Custo de manutenção Críticidade da missão Taxa de utilização Idade do equipamento Disponibilidade de <i>backup</i> Recalls e erros do usuário Classe do equipamento	AHP
31	Hernández-López, Pimentel-Aguilar e Ortiz-Posadas (2020)	<i>An index to prioritize the preventive maintenance of medical equipment</i>	Tipo de equipamento Função do equipamento Requisitos de manutenção Calibração Idade do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Localização do equipamento	—
32	Shamayleh, Awad e Abdullah (2020)	<i>Criticality-based maintenance for healthcare</i>	Função do equipamento Risco físico (pacientes e usuários) Requisitos de manutenção Histórico de manutenção Severidade Probabilidade de falha Detectabilidade	—
33	Carnero e Gómez (2021)	<i>Optimisation of maintenance in delivery systems for cytostatic medicines</i>	Custo de manutenção Qualidade do tratamento Impacto na gestão hospitalar Impacto na capacidade de atendimento Capacidade da equipe técnica	Fuzzy logic TOPSIS
34	Kamal, Taghaddos e Karimi (2021)	<i>BIM-based maintenance management system for healthcare facilities</i>	Função do equipamento Localização do equipamento Segurança do paciente Disponibilidade de <i>backup</i> Responsável pelo reparo (interno/externo)	CBR

Item	Autor	Título	Critérios	Ferramentas de avaliação
35	Parand, Tavakoli-Golpaygani e Rezvani (2021)	<i>Medical device risk assessment based on ordered weighted averaging aggregation operator</i>	Severidade Segurança do paciente Risco para usuário e equipe técnica MTTR Detectabilidade Probabilidade de falha MTBF Repetitividade Visibilidade da falha	<i>Fuzzy logic</i>
36	Zamzam et al. (2021a)	<i>A systematic review of medical equipment reliability assessment in improving the quality of healthcare services</i>	Idade do equipamento Obsolescência tecnológica Função do equipamento Complexidade (técnica e de uso) Requisitos de manutenção Calibração Frequência de manutenção Tempo de reparo Frequência/probabilidade de falha Tempo de inatividade Tempo de vida útil Severidade Detectabilidade Recalls e alertas de perigo Segurança (paciente e usuário) Segurança e ambiente Disponibilidade de backup Criticidade (equipamento e serviço) Aceitabilidade clínica (mantenedor) Localização do equipamento Taxa de utilização Custo de manutenção	—
37	Zamzam et al. (2021b)	<i>Prioritisation assessment and robust predictive system for medical equipment: a comprehensive strategic maintenance management</i>	Idade do equipamento Obsolescência tecnológica Função do equipamento Condição do equipamento Status de manutenção preventiva Manutenções não realizadas Tempo de resposta Requisitos de manutenção Complexidade (técnica e de uso) Tempo de reparo Tempo de inatividade Frequência de falhas Disponibilidade de backup Taxa de utilização Custo de manutenção	Agrupamento <i>k-means</i>

Fonte: elaborado pelo autor

Nessa visão geral do portfólio, observa-se poucos sinais de consenso entre os autores, o que compromete a justificativa para a aplicação prática dos modelos propostos. Caminhando para uma síntese das contribuições deixadas pelos autores mencionados acima, as seções a seguir discutem os dois elementos fundamentais de um modelo de priorização de manutenção de equipamentos médicos: os critérios de priorização e as ferramentas avaliação adotados em cada trabalho.

3.3 Critérios de priorização

Durante a análise de conteúdo do portfólio, foi possível observar que os autores divergem em denominações para critérios que são, de fato, análogos. Além disso, alguns critérios são desdobrados em subcritérios, sob o risco da definição do critério se tornar imprecisa, uma vez que ele somente pode ser descrito pelo conjunto de subcritérios a ele subjacentes. Uma definição imprecisa, por consequência, dificulta a avaliação do grau de criticidade do critério, especialmente para critérios dependentes do julgamento humano.

Ademais, também foi possível observar que não existe um consenso para a atualização de um conjunto fechado de critérios, o que sugere ser uma variável dinâmica com o tempo e/ou com as necessidades particulares de cada EAS. Partindo dessas observações, procurou-se apresentar no Quadro 4 a definição inequívoca dos critérios de priorização, de forma a uniformizar a nomenclatura e o agrupamento por categorias, classificando-os por perspectivas de avaliação.

Quadro 4 - Definições inequívocas dos critérios citados na literatura

Perspectiva	Categoria	Critério	Definição inequívoca
Equipamento	Natureza do equipamento	Função	Propósito principal do equipamento. Por exemplo, suporte à vida, terapia, diagnóstico, análises, entre outras.
		Criticidade da missão	Define o quanto o equipamento é crucial para garantir a eficiência do fluxo de atendimento do paciente (impacto operacional).
		Criticidade de área	Criticidade da área de funcionamento do equipamento para os pacientes. Por exemplo, urgência, unidade de terapia intensiva, área de diagnóstico, entre outras.
	Requisitos de manutenção	Manutenção requerida	Frequência de manutenção indicada pelo fabricante ou pela experiência dos gestores de manutenção.
		Calibração	Necessidade de procedimentos de calibração indicados pelo fabricante do equipamento.

Perspectiva	Categoria	Critério	Definição inequívoca
	Condição do equipamento	<i>Recalls</i> e alertas de perigo	Número de alertas emitidos pelo fabricante ou pela agência sanitária para solucionar problemas de equipamentos que representam riscos à saúde.
		Idade	Tempo de vida útil do equipamento. Em geral, a expectativa de vida de um equipamento é de 10 anos.
		Tempo remanescente de vida útil	Relação da idade do equipamento com sua expectativa de vida.
		Obsolescência tecnológica	Falta de interconectividade ou incapacidade de se adaptar a novos padrões, como mudanças de <i>software</i> e <i>hardware</i> , que dificultam a atualização contínua de equipamentos.
		Disponibilidade de <i>backup</i>	Relação do número de equipamentos com a mesma função (redundância) com sua demanda por unidade de tempo.
	Histórico do equipamento	Taxa de utilização	Tempo em que um equipamento é usado em relação ao tempo disponível no estabelecimento de saúde.
		Manutenções não realizadas	Procedimentos de manutenção que não foram realizados no prazo recomendado.
		Tempo de inatividade	Tempo médio que um equipamento fica fora de uso por indisponibilidade.
		Frequência de falhas	Frequência de ocorrência de falhas no equipamento.
		Repetitividade	Frequência de ocorrência do mesmo tipo de falha no equipamento ou componente.
		<i>Mean Time Between Failures</i>	Tempo médio entre a ocorrência de falhas. Indicador geralmente associado à confiabilidade do equipamento e utilizado como medida complementar para isso.
		<i>Mean Time to Repair</i>	Tempo médio para reativar um determinado equipamento.
		Confiabilidade	Capacidade de um equipamento funcionar adequadamente durante um determinado período sob certas condições. Pode ser medida consultando os registros históricos do equipamento.
	Manutenibilidade	Complexidade técnica	Nível de dificuldade em termos de manutenibilidade, reparo, instalação e operação.
		Detectabilidade	Capacidade de detectar a falha antes que ela ocorra.
		Reprodutibilidade	Capacidade de verificar o equipamento após a manutenção e antes de entregá-lo ao operador.
		Sensibilidade à manutenção	Resposta do equipamento diante dos procedimentos de manutenção preventiva.
Operador	Impacto no operador	Complexidade de uso	Nível de dificuldade em operar o equipamento abrangendo requisitos de entrada de dados, configuração e usabilidade geral do equipamento.
Paciente	Impacto no paciente	Capacidade de atendimento	Impacto operacional causado pela quebra ou funcionamento inadequado do equipamento, expresso em termos de redução de capacidade. É importante considerar o número de pacientes que terão que esperar enquanto o dispositivo está inativo.
		Qualidade do tratamento	Efeito da quebra ou funcionamento inadequado do equipamento no tratamento do paciente.

Perspectiva	Categoria	Critério	Definição inequívoca
Equipe técnica	Capacidade da equipe	Carga de trabalho	Quantidade de horas trabalhadas na execução das manutenções preventivas.
		Rapidez de resposta	Tempo de resposta da equipe técnica quando ocorre uma falha.
	Competência da equipe	Grau de aceitação do mantenedor	Grau de confiança da equipe de manutenção em relação ao diagnóstico e às ações corretivas adotadas.
Mista (equipamento, usuário, paciente e equipe técnica)	Risco físico	Risco para o paciente	Consequência da falha do equipamento na segurança do paciente.
		Risco para o usuário	Consequência da falha do equipamento na segurança do operador.
		Risco para o ambiente	Consequência da falha do equipamento para o ambiente onde o mesmo está instalado.
	Custos	Custo de manutenção	Total dos custos com mão-de-obra, partes e peças necessárias aos procedimentos de manutenção do equipamento.
		Custo associado à demora no tratamento	Impacto financeiro causado pela indisponibilidade do equipamento (lucro cessante).
		Custo do equipamento	Custo associado à aquisição de um equipamento novo.

Fonte: elaborado pelo autor

A perspectiva do equipamento diz respeito aos critérios inerentes ao próprio objeto da manutenção, sendo composta de critérios alimentados pelos dados técnicos e registros históricos de cada equipamento. A perspectiva do usuário refere-se aos critérios de que são avaliados pelo ponto de vista do operador e que podem impactar na manutenção do equipamento. A perspectiva do paciente, por sua vez, adota a ótica do paciente para identificar os critérios que caracterizam prejuízo para o paciente em casos de uma manutenção deficiente. Os critérios também podem ser definidos pela perspectiva da equipe técnica que é responsável por planejar e executar a manutenção, uma vez que esses aspectos podem interferir na prioridade atribuída a cada equipamento.

3.4 Ferramentas de avaliação de prioridades

Todos os modelos apresentados no Quadro 3 possuem procedimentos para a determinação de prioridades, mas não necessariamente utilizando ferramentas quantitativas de avaliação (não registradas no Quadro 3, nesse caso). Grande parte dos modelos utilizam equações simples, ao invés de ferramentas mais sofisticadas, frequentemente com médias ponderadas que resultam em índices de priorização, como por exemplo, no modelo de Hernández-López, Pimentel-Aguilar e Ortiz-Posadas (2020). Embora em alguns

casos a simplicidade seja um fator importante para motivar a aplicação do modelo, a variedade e a complexidade tecnológica dos equipamentos médicos têm aumentado muito nos últimos anos, gerando um número cada vez maior de critérios priorização, alguns deles mensuráveis, outros dependentes da percepção dos gestores. Isso torna a priorização mais complexa e demanda ferramentas que sejam capazes de lidar com tal dificuldade. Em geral, essas ferramentas seguem a premissa de que os critérios têm graus diferentes de importância e que a preferência entre alternativas pode ser determinada a partir de um certo nível de elaboração matemática. Os próximos parágrafos descrevem as principais ferramentas extraídas da literatura sobre o tema.

Uma das ferramentas identificadas nesta revisão é a FMEA, que visa identificar os modos de falha de um equipamento e reconhecer suas causas e efeitos. No âmbito dos equipamentos médicos, a FMEA é usada para selecionar táticas de manutenção apropriadas usando a lógica da manutenção centrada em confiabilidade, especialmente quando existem muitos equipamentos e as consequências dos problemas não são óbvias (VALA *et al.*, 2018; TAGHIPOUR; BANJEVIC; JARDINE, 2011b). Nessa técnica, os modos de falha são priorizados com base no *risk priority number* (RPN), que multiplica os índices de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) de falhas. Nesse caso, o equipamento é priorizado pela incidência de falhas com alto RPN. No entanto, tendo em vista a subjetividade na atribuição dos valores de S, O e D, esta ferramenta possui uma fraqueza no que se refere à dependência do julgamento humano para a determinação do RPN. Além disso, a FMEA ignora outros fatores de criticidade do equipamento que não são relacionados às suas falhas.

Outra ferramenta de priorização que se baseia na ocorrência de falhas é a FTA. Trata-se de um método dedutivo no qual um estado indesejado de um sistema é analisado usando a lógica booleana para combinar uma série de eventos de nível inferior (KUTOR; AGEDE; ALI, 2017). Essa análise identifica e registra sistematicamente os caminhos lógicos de falha, de um efeito específico para as causas principais. Assim, a FTA ajuda a entender como o sistema pode falhar. Tomando como base a teoria das probabilidades, os equipamentos sujeitos a cadeias de eventos de falhas mais prováveis passam a ter prioridade quando se aplica a FTA. Por outro lado, por estar focada nas causas, e não nos efeitos das falhas, essa ferramenta ignora os critérios de priorização relacionados com a importância do equipamento para usuários e pacientes.

Com uma abordagem diferente, o AHP é uma ferramenta que dá suporte a decisões que envolvem múltiplos critérios (multicritério). Desenvolvida por Saaty (1980), o AHP tem como objetivo estabelecer a importância relativa entre os critérios analisados, baseada no julgamento dos tomadores de decisão. A atribuição do grau de importância dos critérios no AHP é sempre comparativa e acontece para cada equipamento avaliado, de forma que ao final é possível obter um ordenamento das alternativas por grau de prioridade (TAGHIPOUR; BANJEVIC; JARDINE, 2011b).

Da mesma forma que na determinação do RPN na FMEA, os resultados do AHP estão sujeitos à subjetividade do julgamento dos especialistas. Nesse sentido, com o intuito de reduzir tais ambiguidades e incertezas na elaboração do PGEMH, Jamshidi *et al.* (2015) propõem integrar a lógica *fuzzy* à ferramenta AHP. Em contraste à lógica booleana, a lógica *fuzzy* é um método de análise que se propõe a incorporar a incerteza em um modelo de decisão (AZADEGAN *et al.*, 2011), dando um tratamento matemático a termos linguísticos subjetivos, tais como “mais provável”, “aproximadamente”, “em torno de”, “pouco abaixo”, dentre outras variáveis inexatas. No contexto dos equipamentos médicos, a lógica *fuzzy* tem sido utilizada no apoio à tomada de decisão quanto ao grau de criticidade dos dispositivos médicos, de modo a personalizar a estratégia de manutenção (JAMSHIDI *et al.*, 2015; TAWFIK; OUDA; SAMAD, 2013), ou mesmo, para auxiliar na escolha de equipamentos com maior necessidade de substituição dentre os existentes no parque avaliado (DOMÍNGUEZ; CARNERO, 2020).

O QFD, é uma ferramenta tradicionalmente utilizada para a gestão da qualidade e o desenvolvimento de produtos. Ela também tem sido aplicada na priorização da manutenção de equipamentos médicos (AL-BASHIR *et al.*, 2012; SALEH *et al.*, 2015). O QFD usa um conjunto de matrizes para traduzir os requisitos do cliente em requisitos técnicos e, assim, determinar os requisitos a serem priorizados. Na aplicação em EMHs, a associação dos requisitos técnicos aos diferentes equipamentos determina as prioridades de manutenção. No entanto, embora incorpore o conceito de qualidade na manutenção de equipamentos médicos, o QFD não apresenta embasamento suficiente para definição dos pesos dos critérios, além de estar sujeito à já mencionada imprecisão do julgamento humano.

Além do AHP, a literatura apresenta outras ferramentas da abordagem multicritério para a priorização de manutenção de EMHs, tais como TOPSIS (HOURIA *et al.*,

2016), MACBETH (CARNERO; GÓMEZ, 2016) e PROMETHEE (MAHFOUD; BARKANY; BIYAALI, 2016b). A TOPSIS consiste em construir uma alternativa ideal dentre todas as alternativas disponíveis e então determinar qual é a alternativa mais próxima da solução ideal positiva e o mais distante quanto possível da solução ideal negativa (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2015). Por outro lado, a MACBETH quantifica a atratividade de diferentes alternativas com base em julgamentos qualitativos de especialistas sobre diferenças de atratividade entre critérios distintos. Essa abordagem usa um procedimento de questionamento iterativo que envolve comparações entre pares, incluindo verificações de consistência dos julgamentos para aumentar a confiabilidade dos resultados (CARNERO; GÓMEZ, 2016). Mais simples que os outros dois métodos, o PROMETHEE é adequado para resolver problemas classificados como *outranking*, gerando uma ordem de preferência entre alternativas não necessariamente comparáveis, ou mesmo, conflitantes (MAHFOUD; BARKANY; BIYAALI, 2016b). No entanto, o PROMETHEE não apresenta orientações específicas para determinar os pesos dos critérios avaliados, o que leva à necessidade de associá-lo a outras ferramentas com tal finalidade. Uma provável ferramenta para isso é o *Rank-Order Centroid* (ROC), que tem como principal característica estabelecer pesos a partir da ordenação de preferência dos critérios pelo decisor (DE ALMEIDA FILHO et al., 2018; MORAIS et al., 2015).

Também foram identificadas mais duas ferramentas que podem ser úteis para a priorização para a manutenção de equipamentos médicos: o CBR e a técnica de agrupamento *k-means*, a primeira baseada na experiência da equipe técnica e a segunda em grupos de similaridade. As vantagens e as limitações dessas ferramentas já foram discutidas anteriormente na discussão dos artigos que as propuseram.

É possível observar no portfólio que não existe um consenso entre autores quanto à melhor ferramenta de avaliação a ser utilizada na priorização de manutenção de EMHs. Além disso, em alguns trabalhos, as ferramentas são combinadas para superar as fraquezas umas das outras. Dessa forma, a seção a seguir descreve o processo de escolha das ferramentas de avaliação para o modelo proposto, considerando seus atributos e problemática da pesquisa.

3.5 Escolha das ferramentas de avaliação

Partindo dos trabalhos analisados, foi possível observar que os pesquisadores justificam a relevância das ferramentas de avaliação com argumentos que podem ser interpretados como requisitos de escolha. De acordo com esses argumentos, podem ser identificados cinco requisitos necessários para a escolha de uma ferramenta de priorização. Alguns defendem a necessidade de uma metodologia clara para a definição dos pesos dos critérios (AHP, por exemplo). Outros reconhecem a subjetividade envolvida no julgamento humano e, por isso, buscam ferramentas para a redução de seus efeitos (lógica *fuzzy*, por exemplo). Também é levada em consideração que nem todas as alternativas (*i.e.*, os diferentes equipamentos) são comparáveis, o que justifica o uso de ferramentas que permitam estabelecer prioridades por métodos não compensatórios (PROMETHEE, por exemplo). A simplicidade de aplicação (usabilidade) também é defendida, uma vez que nem sempre é fácil encontrar uma equipe técnica que tenha o treinamento necessário para utilizar ferramentas com maior sofisticação matemática. Por fim, é valorizada a capacidade para incorporar a experiência anterior como dado de entrada no processo de priorização, de forma a constituir um sistema capaz de aprender (CBR, por exemplo).

Diante de tais argumentos, é possível observar que não é adequada a afirmação de que existe uma ferramenta de avaliação superior a outra, pois o propósito e as premissas de cada uma (aqui chamados de fundamentos) são estabelecidos pelas características particulares de cada ambiente e pela forma que a equipe técnica enxerga as prioridades. Esses fundamentos guiam os requisitos para cada ferramenta, identificados no Quadro 5. De modo similar, a escolha do conjunto de critérios de priorização também depende das características intrínsecas do ambiente em que se apresenta o problema e da sua equipe técnica. Assim, a escolha das ferramentas de avaliação identificadas na literatura pode ser embasada por cinco fundamentos conforme apresentado na Figura 9.

Com base no comparativo do Quadro 5, nenhuma das ferramentas de avaliação apresenta todos os requisitos para responder o problema de pesquisa simultaneamente, ficando evidente a necessidade de combinar duas ou mais ferramentas para alcançar os objetivos da pesquisa. Isso corrobora com o raciocínio de autores como Jamshidi *et al.* (2015), Carnero e Gómez (2016), Mahfoud, Barkany e Biyaali (2016b), Houria *et al.* (2016), Mahfoud, Barkany e Biyaali (2017), Kutor, Agede e Ali (2017), Vala *et al.* (2018)

e Jawwad e Saleem (2019), que também apresentaram a necessidade de combinar ferramentas com o intuito de reduzir as limitações umas das outras na priorização de manutenção de EMHs.

Quadro 5 - Comparativo das principais ferramentas de avaliação identificadas na literatura

Requisitos Ferramentas	Metodologia clara para a definição dos pesos dos critérios	Redução dos efeitos da subjetividade no julgamento	Avalia alternativas indiferentes ou incomparáveis	Simplicidade na concepção e na aplicação	Aperfeiçoamento contínuo pela aprendizagem do sistema	Racionalidade não compensatória sobre a avaliação das alternativas
AHP	•			•		
FMEA				•		
QFD				•		
FTA				•		
FUZZY		•				
TOPSIS	•					
MACBETH	•					
PRO-METHEE			•	•		•
CBR			•		•	
K-MEANS			•	•		

LEGENDA:

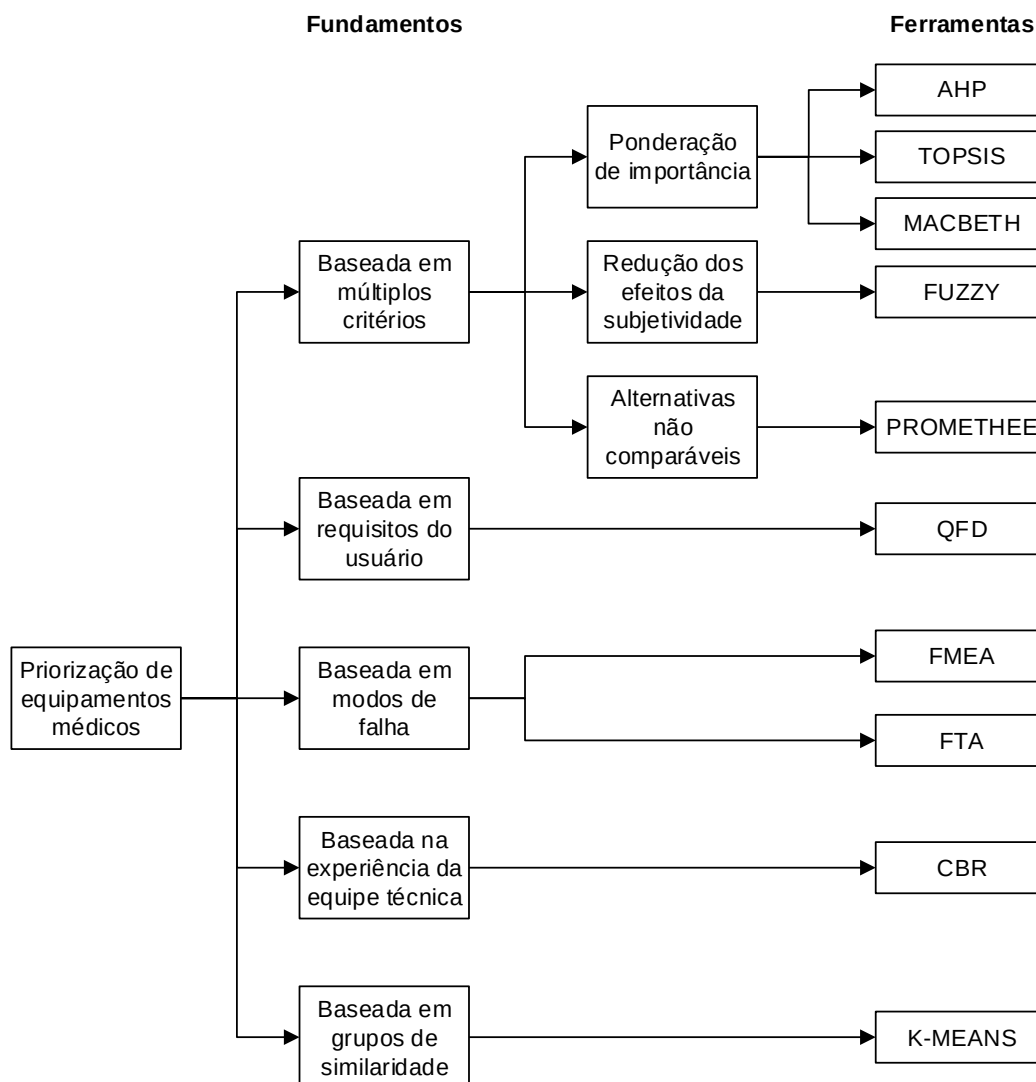
•	Atende ao requisito		Não atende ao requisito
---	---------------------	--	-------------------------

Fonte: elaborado pelo autor

Nesse cenário, devido à possibilidade de avaliar eventuais alternativas não comparáveis, à racionalidade não compensatória sobre a avaliação das alternativas e à simplicidade na concepção e na aplicação da ferramenta, adotou-se o PROMETHEE. Para compensar a limitação da referida ferramenta, especialmente, quanto à inexistência de metodologia clara para a elicitação dos pesos, adicionou-se a metodologia ROC. Além disso, a metodologia ROC oferece qualidade e simplicidade no processo de elicitação dos pesos. Assim, é amplamente recomendada para lidar com informações imprecisas sobre a importância dos critérios (MORAIS et al., 2015). Vale destacar que tal combinação de ferramentas de avaliação ainda não havia sido observada na literatura sobre os modelos de priorização de manutenção de EMHs, conforme Quadro 3. Em contraponto, outras ferramentas para a elicitação dos pesos poderiam ser associadas ao PROMETHEE (por exemplo, AHP, TOPSIS ou MACBETH). Contudo, estudos comparativos têm demonstrado

uma acurácia superior do ROC em problemas com características semelhantes às abordadas nesta pesquisa (AHN, 2011; ALMEIDA FILHO et al., 2018). Dessa forma, a implementação do PROMETHEE-ROC em modelos de priorização de manutenção de EMHs pode apresentar uma importante contribuição para literatura.

Figura 9 - Seleção de ferramentas de priorização baseada em fundamentos de avaliação



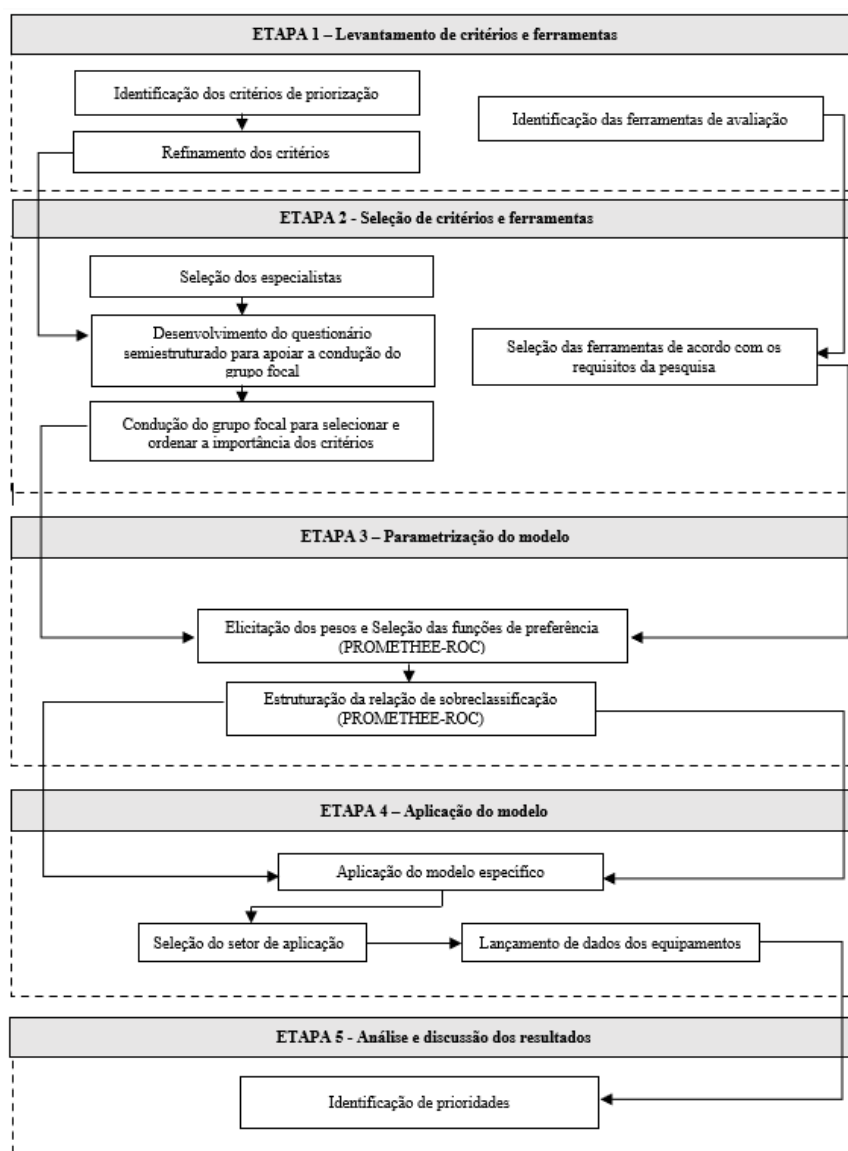
Fonte: elaborada pelo autor

Com a combinação das ferramentas mencionadas, a presente pesquisa pretende construir um modelo de priorização de manutenção de EMHs em consonância com as características intrínsecas da instituição estudada. Os procedimentos metodológicos para isso são apresentados no próximo capítulo.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa, tanto para o desenvolvimento do modelo proposto quanto para a coleta e análise dos dados para sua aplicação. O desenvolvimento do modelo incluiu a revisão de literatura para o levantamento dos critérios e ferramentas abordadas anteriormente, a condução de grupo focal para selecionar os critérios e ferramentas adequadas à instituição, a parametrização do modelo com a elicitación dos pesos e preferências, bem como a aplicação para testar sua factibilidade, identificar limitações e discutir aspectos a serem aperfeiçoados. Esse conjunto de procedimentos pode ser dividido em cinco etapas, ilustradas na Figura 10 e descritas a seguir.

Figura 10 - Etapas de desenvolvimento do modelo



Fonte: elaborada pelo autor

4.1 Etapa I – Levantamento dos critérios e ferramentas

O primeiro passo para o desenvolvimento do modelo foi levantar os critérios de priorização e ferramentas de avaliação da literatura, conforme descrito nas seções 3.3, 3.4 e 3.5 deste trabalho. As referidas seções apresentam um levantamento detalhado dos modelos de priorização propostos anteriormente, de forma a cumprir com essa etapa do desenvolvimento. Ao revisar os modelos priorização anteriores, verificou-se que não existe um consenso para a nomenclatura dos critérios que são de fato análogos. Partindo dessa observação, em seguida, procurou-se refinar a lista de critérios de priorização, de modo a uniformizar a nomenclatura e apresentar definições inequívocas para eles. Assim, a partir de uma lista geral, abre-se caminho para uma seleção adequada e de acordo com as preferências de cada instituição do setor de saúde. O Quadro 4 consolida os critérios de priorização levantados, podendo servir de ponto de partida para os futuros pesquisadores construir o seu modelo específico.

A revisão de literatura do Capítulo 3 também permitiu identificar as principais ferramentas de avaliação, apresentando seus respectivos atributos e um comparativo entre elas. Isso fundamentou a seleção das ferramentas que compõe o modelo proposto neste trabalho, como também pode servir de suporte para o desenvolvimento de modelos com finalidades semelhantes.

4.2 Etapa II – Seleção dos critérios e ferramentas

A segunda etapa busca selecionar os critérios e ferramentas de avaliação adequadas ao problema de pesquisa. Para selecionar as ferramentas, levou-se em consideração os requisitos estabelecidos na pesquisa, que foram extraídos das justificativas apresentadas na literatura para a adoção de determinadas ferramentas. Observou-se que as limitações existentes sugerem o uso conjunto de ferramentas distintas a fim de superar as limitações umas das outras. Por outro lado, é possível argumentar que nem sempre é necessário preencher todos os requisitos, pois a escolha da ferramenta é motivada por fatores específicos e depende dos fundamentos nos quais a avaliação se baseia.

A partir dessa análise, estabeleceu-se que o modelo proposto utilizaria a combinação PROMETHEE-ROC (conforme já comentado no Capítulo 3). Tal combinação bus-

cou atender os requisitos desta pesquisa quanto à possibilidade de avaliar eventuais alternativas não comparáveis, à racionalidade não compensatória sobre a avaliação das alternativas, à simplicidade na concepção e na aplicação da ferramenta, à metodologia clara para a elicitação dos pesos e a capacidade de lidar com informações imprecisas do decisor. No que se refere à possibilidade de aperfeiçoamento contínuo pela aprendizagem do sistema (requisito não atendido do Quadro 5), entende-se que a seleção adequada dos critérios e dos decisores, em certa medida, consegue suprir o requisito.

Para a seleção dos critérios, é necessário conhecer o ambiente de aplicação do modelo. Embora esta pesquisa tenha levantado 33 (trinta e três) critérios na literatura, um número muito grande de critérios pode tornar inviável a tarefa de priorização de EMHs. Além de ser necessária a redução para um número coeso de critérios, cada instituição do setor hospitalar deverá adotar um conjunto específico de critérios que faça sentido para a sua operação. Para isso, este trabalho propôs três atividades: seleção dos especialistas, construção do questionário semiestruturado, e a condução de grupo focal para selecionar e ordenar a importância dos critérios de priorização. A maneira que essas três atividades foram conduzidas na presente pesquisa é descrita a seguir.

4.2.1 Seleção dos especialistas

O modelo proposto foi aplicado em um hospital pertencente a uma rede hospitalar que possui quarenta e uma unidades. Como a intenção é futuramente introduzir o modelo no sistema de gerenciamento de manutenção da rede, os decisores deveriam ser selecionados de modo que representassem a rede como um todo e, portanto, deveriam advir de unidades hospitalares distintas. Para viabilizar operacionalmente a pesquisa, estabeleceu-se um número máximo de dez unidades hospitalares a fim de representar toda a rede considerando seus diferentes aspectos (estrutura organizacional, localidade, tamanho do parque e histórico de participação de trabalhos em rede).

Nessa perspectiva, a seleção das unidades ocorreu da seguinte forma: filtrar as unidades com histórico de envolvimento em trabalhos em rede de forma a garantir o engajamento na pesquisa; selecionar as unidades proporcionalmente por região geográfica tendo em vista as dificuldades logística de serviços especializados fora dos grandes centros; selecionar as unidades proporcionalmente por estrutura organizacional mediante os

diferentes tipos de serviços assistenciais oferecidos; e selecionar as unidades proporcionalmente em relação ao tamanho do parque tecnológico. Esse último requisito teve o intuito de contemplar experiências de avaliadores com diferentes tamanhos de parque (pequeno, médio, grande).

Feito isso, a seleção dos especialistas teve como norteador a modelagem das particularidades da rede e o conhecimento sobre a matéria a ser discutida. Selecionar decisores com baixa familiaridade no assunto poderia inserir muitas incertezas ao resultado da pesquisa. Sendo assim, decidiu-se limitar o grupo entrevistado apenas com profissionais de engenharia clínica. Como eventualmente há mais de um engenheiro clínico por unidade hospitalar, foi selecionado apenas o engenheiro clínico com maior tempo de experiência dentro da unidade hospitalar escolhida, totalizando um grupo de dez decisores para compor o grupo focal.

4.2.2 Desenvolvimento do questionário semiestruturado

Para auxiliar a condução do grupo focal, além do roteiro de entrevista foi desenvolvido também um questionário semiestruturado com perguntas para que os especialistas avaliassem previamente o nível de aplicação dos critérios na sua unidade. As respostas se deram através de termos linguísticos pré-fixados, representados por uma escala de 1 a 5, em que 1 representa a discordância total quanto à aplicação do critério de priorização na unidade hospitalar e 5 representa a concordância total quanto à aplicação do critério na unidade hospitalar.

Esse exercício foi feito para todos os critérios de priorização extraídos da literatura, consolidados no Quadro 4. Os critérios com maior nível de aplicação mediante as repostas dos especialistas foram listados em ordem decrescente de acordo com a pontuação obtida. Em seguida, foram mais uma vez discutidos em reunião com o grupo focal. O Apêndice B apresenta o questionário utilizado. Ele é considerado como semiestruturado devido à possibilidade dos especialistas, na última pergunta, poderem introduzir novos critérios de priorização que eventualmente não estejam nas perguntas realizadas.

4.2.3 Condução do grupo focal

Para a discussão dos critérios que mais representam a realidade da instituição estudada, adotou-se a metodologia qualitativa grupo focal, que, de acordo com Lervolino e

Pelicioni (2001), é uma técnica de diagnóstico rápida e de baixo custo, utilizada para completar informações, conhecer atitudes, opiniões, percepções e comportamentos dos participantes relativos à matéria. O Apêndice A descreve o roteiro da entrevista com o grupo focal desta pesquisa.

Posteriormente à definição dos participantes do grupo focal (seleção dos especialistas), foi agendada uma reunião na modalidade *on-line* para apresentar o objetivo, metodologia e principais conceitos da pesquisa. A fim de promover maior engajamento dos participantes, o mediador/autor informou que o resultado desta pesquisa poderia orientar um algoritmo de priorização de manutenção no sistema de gerenciamento da rede, de modo a gerar propostas de planos de manutenção em convergência com as particularidades da instituição. Durante a condução do grupo focal, também foi realizada uma explanação dos critérios levantados na etapa anterior e como os participantes deveriam responder o questionário semiestruturado, pontuando os critérios de acordo com o grau de aplicação na sua unidade hospitalar. Na ocasião, foi proposto o prazo de uma semana para responder o questionário e agendada uma nova reunião para discussão dos resultados.

A segunda reunião teve como objetivo discutir os resultados do questionário semiestruturado, debatendo em grupo a aderência dos critérios com maior pontuação. Nessa reunião, alguns participantes do grupo focal propuseram um número limitado de cinco critérios para o modelo em desenvolvimento. O motivo apresentado pelos especialistas foi o elevado número de alternativas (equipamentos) que, multiplicado por muitos critérios, tornaria o modelo impraticável, mesmo com o apoio do sistema de gerenciamento.

Diante da lista, o grupo confirmou a ordem de importância estabelecida com as respostas do questionário e observou que deveria incluir no modelo proposto o critério posicionado em sexto lugar dado a sua relevância. Assim, foram selecionados os seis primeiros critérios de priorização que configuraram quase como unanimidade entre os participantes. Encerradas as discussões a respeito da definição dos critérios, o grupo focal foi informado que eventualmente seria necessário novo encontro para definir os pesos dos critérios e/ou complementar as informações obtidas. O procedimento de determinação dos pesos dos critérios será detalhado a seguir.

4.3 Etapa III – Parametrização do modelo

Essa etapa é essencial para a modelagem da realidade da instituição estudada. Por conseguinte, foram necessárias: a definição dos pesos dos critérios por meio de uma abordagem capaz de calcular sua importância apenas com a informação ordinal entre eles (metodologia ROC); a seleção das funções de preferências (PROMETHEE); e a estruturação das relações de sobreclassificação (PROMETHEE). A parametrização envolveu a escolha do algoritmo de tomada de decisão mais adequado ao problema considerando a realidade da instituição estudada.

De forma mais pormenorizada, a parametrização do modelo conteve as seguintes atividades: inserir os critérios relevantes para a instituição (descrito anteriormente); definir a escala de avaliação para os critérios selecionados (extraído do portfólio de artigos revisados); capturar a preferência dos especialistas quanto à ordem de importância dos critérios selecionados (descrito anteriormente); elicitar os pesos relativos para os critérios selecionados (metodologia ROC); selecionar as funções de preferências dos critérios selecionados (devido à natureza qualitativa dos critérios, esse procedimento não foi necessário); e estruturar as relações de sobreclassificação (PROMETHEE). A parametrização do modelo foi um processo iterativo, com envolvimento dos especialistas por meio do grupo focal e aplicação anterior do questionário descrito no Apêndice B.

4.3.1 Estruturação das relações de sobreclassificação

A relação de sobreclassificação é estabelecida mediante à comparação paritária das alternativas de acordo com os critérios selecionados e indica se uma alternativa é preferível, indiferente ou inferior em relação a outra alternativa. Para melhor entendimento dessa estruturação, é oportuno descrever resumidamente os procedimentos do método PROMETHEE. Este método permite que o comportamento de preferência do decisor seja levado em consideração e modelado por funções distintas para cada critério (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). O ponto de partida do método é construir a matriz de avaliação das alternativas de acordo com os critérios selecionados (GOMES; GOMES, 2019), conforme representado no Quadro 6.

Na matriz de avaliação, o decisor insere as intensidades de preferência das alternativas em relação a cada critério, sendo $g_j(a_n)$ a avaliação da alternativa (a_n) no critério j . O próximo passo é construir as matrizes de diferenças para cada critério. Nesse intuito,

utiliza-se as funções de preferência do Quadro 7. Onde $F_i(a,b)$ é a diferença $[g_i(a) - g_i(b)]$ entre o desempenho da alternativas a em relação a alternativa b para cada critério j . Em virtude da natureza dos critérios selecionados neste trabalho, a $F_i(a,b)$ assumiu a forma da função de preferência para critério usual. Dessa forma, $F_i(a,b) = 1$, quando $g_i(a) - g_i(b) > 0$, e $F_i(a,b) = 0$, quando $g_i(a) - g_i(b) \leq 0$.

Quadro 6 - Matriz de avaliação

Alternativas	Critérios			
	C_1	C_2		C_j
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$		$g_j(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$		$g_j(a_2)$
.....				
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$		$g_j(a_n)$

Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 7 - Critérios gerais para o PROMETHEE

1 – Critério usual não há parâmetro a ser definido	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$
2 – Quase-critério define-se o parâmetro q (limite de indiferença)	$g_j(a) - g_j(b) > q$ $g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 0$
3 – Limite de preferência define-se o parâmetro p (limite de preferência)	$g_j(a) - g_j(b) > p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p}$ $F(a,b) = 0$
4 – Pseudocritério definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência)	$ g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $ g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = 1/2$ $F(a,b) = 0$
5 – Área de indiferença definem-se os parâmetros q (limite de indiferença) e p (limite de preferência)	$ g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $ g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$F(a,b) = 1$ $F(a,b) = (g_j(a) - g_j(b) - q)/(p - q)$ $F(a,b) = 0$
6 – Critério Gaussiano O desvio-padrão deve ser fixado	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	A preferência aumenta segundo uma distribuição normal $F(a,b) = 0$

Fonte: Almeida e Costa (2002)

Essa operação é realizada para todos os critérios selecionados, formando uma matriz de diferenças para cada critério, conforme exemplo do Quadro 8.

Quadro 8 - Matriz de diferenças para o critério j

	a_1	a_2	...	a_n
a_1	$F(a_1, a_1)$	$F(a_1, a_2)$	...	$F(a_1, a_n)$
a_2	$F(a_2, a_1)$	$F(a_2, a_2)$	...	$F(a_2, a_n)$
...	...	...	...	...
a_n	$F(a_n, a_1)$	$F(a_n, a_2)$		$F(a_n, a_n)$

Fonte: elaborado pelo autor

A próxima etapa é calcular o $\pi(a, b)$, grau de sobreclassificação de a sobre b para cada par de alternativas (a, b) , conforme Equação (7). Dessa forma, a matriz do grau de sobreclassificação é composta pelo somatório das funções de diferenças de cada uma das matrizes, multiplicado pelo p_i , peso do critério i , que na presente pesquisa serão elicitados pela metodologia ROC (descrita mais adiante).

$$\pi(a, b) = \sum_{i=1}^n p_i F_i(a, b), \text{ onde: } \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (7)$$

4.3.2 Exploração das relações de sobreclassificação

Um vez obtida a matriz do grau de sobreclassificação, as alternativas podem ser classificadas em ordem decrescente de fluxo de saída (fluxo positivo), em que $\Phi^+(a) = \sum_{b \in A} \pi(a, b)$ representa a intensidade de preferência da alternativa a , sobre todas as alternativas b no conjunto A ; e ordem crescente de fluxo de entrada (fluxo negativo), em que $\Phi^-(a) = \sum_{b \in A} \pi(b, a)$ representa a intensidade de preferência de todas as alternativas b no conjunto A sobre a alternativa a . Quanto maior o fluxo positivo, $\Phi^+(a)$, melhor a alternativa, e quanto menor o fluxo negativo, $\Phi^-(a)$, melhor a alternativa (ALMEIDA; COSTA, 2002). Em outras palavras, o fluxo positivo $\Phi^+(a)$ expressa a superação da alternativa a sobre todas as outras alternativas, e o fluxo negativo $\Phi^-(a)$ indica o quanto todas as outras alternativas superam a alternativa a (SAFARI et al., 2012). A seguir é apresentado as diferenças entre os principais métodos da família PROMETHEE:

- PROMETHEE I – permite avaliar situações de indiferença e incomparabilidade, estabelecendo uma relação de sobreclassificação parcial entre as alternativas. É baseado nos fluxos positivos $\Phi^+(a)$ e fluxos negativos $\Phi^-(a)$;

- PROMETHEE II – fornece uma classificação completa das alternativas em ordem decrescente por meio do fluxo líquido $\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a)$;
- PROMETHEE III E IV – aplicados à resolução de problemas de tomada de decisão mais sofisticados, especialmente aqueles com um componente estocástico;
- PROMETHEE V – após estabelecer uma ordem completa entre as alternativas (PROMETHEE II), são introduzidas restrições, identificadas no problema para as alternativas selecionadas, incorporando uma filosofia de otimização inteira;
- PROMETHEE VI – quando o decisor não está apto ou confiante para definir precisamente os pesos dos critérios, pode-se especificar intervalos de possíveis valores no lugar de um valor fixo para cada peso. Nesses situação, a implementação do PROMETHEE VI é recomendada (ALMEIDA; COSTA, 2002).

Neste estudo, optou-se pelo PROMETHEE II por fornece uma classificação completa das alternativas em ordem decrescente por meio do fluxo líquido. As alternativas avaliadas neste trabalho foram os equipamentos do Centro Cirúrgico e Central de Material Esterilizado do Hospital Universitário Lauro Wanderley (João Pessoa, Paraíba), dada a relevância dos setores frente à necessidade de manutenções periódicas nos seus equipamentos e à facilidade de acesso aos dados por parte do autor na unidade hospitalar. Este foi o ambiente escolhido para a aplicação do modelo.

4.3.3 Elicitação dos pesos e seleção das funções de preferência

Consoante justificativas apresentadas anteriormente, devido a inexistência de uma metodologia clara para a definição dos pesos nos métodos da família PROMETHEE, foi adicionado a metodologia ROC, que, de acordo com Almeida *et al.* (2018), usa a ordem de importância dos critérios definidos pelos decisores como entradas e as converte em pesos. A conversão é baseada na equação (8):

$$W_i(ROC) = \frac{1}{n} \sum_{j=i}^n \frac{1}{j}, i = 1, \dots, n \quad (8)$$

onde n é o número total de critérios e W_i é o peso do i -ésimo critério do *ranking*.

Os pesos são parâmetros importantes para a parametrização do modelo proposto para a instituição de interesse. Nesta pesquisa, os critérios foram ordenados de acordo

com entendimento dos especialistas quanto à aplicação na sua unidade hospitalar. O Apêndice B guiou a coleta de dados quanto à ordem de importância dos critérios para cada especialista. Posteriormente, os pesos dos critérios foram calculados pela Equação 8. É importante mencionar que a soma dos pesos deve ser igual a 1 (um).

Outro parâmetro fundamental para o modelo proposto é a seleção das funções de preferência, estabelecendo assim os limiares de preferência ou indiferença dos critérios na escolha das alternativas. Esse parâmetro é determinado com base no conhecimento e nas preferências dos especialistas. Devido à natureza qualitativa dos critérios selecionados pelos especialistas, não foi necessário definir os limiares de preferências, pois qualquer desvio de desempenho nas alternativas qualitativas sugere preferir uma alternativa ao invés de outra (função de preferência para critério usual).

4.4 Etapa IV – Aplicação do modelo

Concluídas as etapas anteriores, o modelo proposto para priorizar a manutenção de equipamentos médicos em consonância com a realidade da instituição estudada está pronto para a aplicação. Neste trabalho, a aplicação ocorreu no Hospital Universitário Lauro Wanderley (João Pessoa, Paraíba), pertencente à rede hospitalar estudada - EB-SERH, empresa pública vinculada ao Ministério da Educação (MEC). De acordo com o MEC (2011), trata-se da maior rede de hospitais públicos do Brasil. A escolha da empresa se deu devido à maior facilidade de o autor em conduzir o estudo, haja vista a posição profissional que ocupa na organização. Além disso, o resultado da pesquisa trará benefícios tanto teóricos como práticos, devido ao grande número de estabelecimentos de saúde ligados à rede que irão usufruir do modelo proposto.

Devido ao tamanho da rede, foi necessário adicionar algumas atividades aos procedimentos metodológicos que normalmente seriam suficientes para a aplicação em um hospital isolado. Por exemplo, como definir as unidades hospitalares de modo a representar toda rede? Como selecionar os participantes? Como conduzir o grupo focal? Como selecionar os critérios e as ferramentas? Como parametrizar o modelo específico? Todas essas questões tiveram que considerar a EB-SERH como a unidade de análise abrangente da pesquisa, sendo que o hospital e o setor de aplicação do modelo correspondem a unidades de análise incorporadas, conforme definição de Yin (2003).

É importante mencionar que a pesquisa se limitou aos equipamentos médicos do Centro Cirúrgico e Central de Material Esterilizado do Hospital Universitário Lauro Wanderley (João Pessoa, Paraíba), que já apresenta número de equipamentos e complexidade suficientes para testar o modelo. Com os resultados das etapas anteriores, foi possível aplicar o modelo de priorização com a parametrização de preferências dos engenheiros clínicos da Rede EBSEH. A aplicação do modelo viabilizou a obtenção de uma proposta de plano de manutenção para os equipamentos médicos do setor mencionado.

4.5 Etapa V – Análise e discussão dos resultados

A análise dos resultados se iniciou com a caracterização da rede hospitalar que deu origem ao problema de pesquisa. Em seguida, a discussão das unidades que em conjunto buscam representar as particularidades da rede e a caracterização dos tomadores de decisão das referidas unidades hospitalares.

Em seguida, foram discutidas a seleção e a ordem de importância dos critérios para a rede estudada. Essa etapa tanto definiu os critérios de priorização do modelo como apresentou uma entrada para a metodologia ROC de definição dos pesos. Ainda sob a perspectiva dos critérios de priorização, foi necessário observar a sua natureza para então distinguir as funções de preferências de cada critério. Como os critérios selecionados possuíam natureza qualitativa, a definição dos parâmetros da função de preferência pelo grupo focal não foi necessária.

Para auxiliar na análise e processamentos dos dados relacionados à estruturação e exploração das relações de sobreclassificação, bem como na obtenção dos pesos dos critérios de priorização do problema, foi escolhido o sistema gratuito do Instituto Nacional de Sistemas de Informação e Decisão, denominado PROMROCNRatio, que está disponível no site <http://cdsid.org.br/prometheeroc/>. Esse sistema realiza os cálculos necessários ao PROMETHEE-ROC, assim como apresenta gráficos e permite realizar uma análise de sensibilidade com os resultados obtidos. A discussão dos resultados gerados pela aplicação do modelo foi realizada de modo qualitativo em contraponto com as experiências dos engenheiros clínicos, conforme detalhado no capítulo a seguir.

5 RESULTADOS

Devido ao tamanho da rede hospitalar estudada e com o intuito de tornar viável o campo de prática, algumas atividades preliminares à aplicação do modelo foram necessárias, por exemplo, a seleção das unidades hospitalares e dos especialistas de modo a compreender a realidade da rede como um todo. Para tal, inicialmente, caracterizou-se a instituição estudada e estabeleceu-se fatores de escolha para os especialistas. Os resultados dessa atividade preliminar, bem como as demais etapas de aplicação do modelo proposto estão descritas a seguir.

5.1 Caracterização da instituição

O modelo de priorização desenvolvido nesta pesquisa foi aplicado em uma rede de hospitais públicos, denominada EBSEH. A EBSEH é uma empresa pública brasileira criada em 2011 com o objetivo de administrar os Hospitais Universitários Federais (HUF), promovendo ensino, pesquisa e extensão nas áreas de saúde (MEC, (2011). A EBSEH pertence ao MEC e possui contratos de gestão com várias Universidades Federais do país.

O principal propósito da EBSEH é melhorar a gestão dos HUF, visando oferecer um atendimento de qualidade à população, promovendo a formação de profissionais de saúde e fomentando a pesquisa e inovação na área da saúde. A empresa também promove modernização das infraestruturas físicas e tecnológicas, bem como a implementação de boas práticas de gestão. Trata-se da maior rede de hospitais públicos do Brasil com quarenta e uma unidades hospitalares.

A seleção desta empresa foi baseada na necessidade de resolução do problema de priorização de manutenção de equipamentos e na facilidade que o autor possui para conduzir o estudo na mesma, considerando sua posição profissional dentro da rede hospitalar. Além disso, é importante destacar que os resultados da presente pesquisa têm implicações tanto teóricas quanto práticas. Isso se deve ao considerável número de estabelecimentos de saúde associados à rede, os quais serão capazes de aproveitar os benefícios do modelo que está sendo proposto. A Figura 11 apresenta a distribuição das unidades hospitalares da rede no território nacional.

Figura 11 - Distribuição dos hospitais da rede estudada



Disponível em: EBSEHR (2021).

5.2 Resultados da aplicação do modelo proposto

5.2.1 Seleção dos especialistas

Para uma modelagem mais próxima da realidade, antes de selecionar os especialistas, também foi importante coletar dados sobre as características individuais de cada unidade hospitalar em termos de quantidade de equipamentos, localização geográfica, tipo da estrutura organizacional e envolvimento de trabalhos executados para a rede. Os dados a respeito da quantidade de equipamentos foram obtidos por meio do sistema de gerenciamento de manutenção, de acesso interno. Os dados quanto à localização geográfica e o tipo de estrutura organizacional foram coletados da página da EBSEHR (2021). O tipo da estrutura organizacional está relacionado com o número de leitos e serviços oferecidos. Por exemplo, Tipo 1 possui mais de 400 leitos, Tipo 2 possui de 300 a 400 leitos, Tipo 3 possui menos de 300 leitos, Tipo 4 tem como especialidade a maternidade e o Complexo é formado por mais de uma unidade assistencial. Por último, as informações referentes ao envolvimento em trabalhos executados para a rede, acerca da gestão

de equipamentos médicos, foram obtidas da autoria de documentos técnicos disponíveis na intranet, de acesso interno.

O Quadro 9 consolidou a coleta de dados quanto às características individuais de cada unidade hospitalar da rede. Diante do número significativo de unidades, a fim de viabilizar um campo de prática viável dentro da rede EBSEH, foi definido um número máximo de 10 unidades distintas para representar a rede como um todo.

Quadro 9 - Caracterização das unidades da rede estudada

HUF	Quantidade equipamentos (DEZ21)	Região do país	Estrutura organizacional	Envolvimento em grupos de trabalho
HC-UFMG	6873	Sudeste	Tipo 1	Alto
HC-UFG	5000	Centro-Oeste	Tipo 2	Baixo
HC-UFU	5000	Sudeste	Tipo 1	Baixo
CH-UFC	5000	Nordeste	Complexo	Alto
HUPES-UFBA	4000	Nordeste	Tipo 2	Baixo
CHC-UFPR	3994	Sul	Complexo	Baixo
HU-UFMA	3234	Nordeste	Tipo 1	Baixo
HUGG-UNIRIO	2800	Sudeste	Tipo 3	Baixo
HUCAM-UFES	2800	Sudeste	Tipo 2	Alto
HUB-UNB	2700	Centro-Oeste	Tipo 2	Alto
HUAP-UFF	2700	Sudeste	Tipo 2	Alto
HUSM-UFMS	2541	Sul	Tipo 2	Baixo
HC-UFPE	2442	Nordeste	Tipo 2	Alto
HU-UFJF	2140	Sudeste	Tipo 3	Alto
HUOL-UFRN	2000	Nordeste	Tipo 2	Alto
HULW-UFPB	1996	Nordeste	Tipo 3	Baixo
HU-UFSC	1900	Sul	Tipo 2	Baixo
HC-UFTM	1876	Sudeste	Tipo 2	Baixo
HU-UFOD	1820	Centro-Oeste	Tipo 3	Alto
HU-UFPI	1803	Nordeste	Tipo 3	Baixo
HUJM-UFTM	1624	Centro-Oeste	Tipo 3	Baixo
HUPAA-UFAL	1600	Nordeste	Tipo 2	Baixo
HU-UFS	1590	Nordeste	Tipo 3	Baixo
HUMAP-UFMS	1571	Centro-Oeste	Tipo 2	Alto
HUAC-UFOD	1438	Nordeste	Tipo 3	Alto
HE-UFPE	1400	Sul	Tipo 3	Alto
HUGV-UFAM	1400	Norte	Tipo 3	Alto
CHU-UFPA	1400	Norte	Tipo 3	Baixo
HU-FURG	1200	Sul	Tipo 3	Baixo
HU-UNIVASF	1130	Nordeste	Tipo 3	Baixo
HUL-UFS	1100	Nordeste	Tipo 4	Baixo
MEJC-UFRN	1060	Nordeste	Tipo 3	Alto
HU-UFSCar	727	Sudeste	Tipo 4	Alto

HUF	Quantidade equipamentos (DEZ21)	Região do país	Estrutura organizacional	Envolvimento em grupos de trabalho
MCO-UFBA	600	Nordeste	Tipo 4	Alto
HU-UNIFAP	545	Norte	Tipo 4	Baixo
HUAB-UFRN	531	Nordeste	Tipo 4	Alto
HUJB-UFCG	350	Nordeste	Tipo 4	Baixo
HDT-UFT	227	Norte	Tipo 4	Baixo

Fonte: elaborado pelo autor

Posteriormente à filtragem das unidades hospitalares com histórico de alto envolvimento nos trabalhos em rede, o número reduziu para dezessete, conforme Quadro 10.

Quadro 10 - Unidades com alto envolvimento em trabalhos da rede hospitalar

HUF	Quantidade equipamentos (JUN21)	Região do país	Estrutura organizacional	Envolvimento em grupos de trabalho
HC-UFMG	6873	Sudeste	Tipo 1	Alto
CH-UFC	5000	Nordeste	Complexo	Alto
HUCAM-UFES	2800	Sudeste	Tipo 2	Alto
HUB-UNB	2700	Centro-Oeste	Tipo 2	Alto
HUAP-UFF	2700	Sudeste	Tipo 2	Alto
HC-UFPE	2442	Nordeste	Tipo 2	Alto
HU-UFJF	2140	Sudeste	Tipo 3	Alto
HUOL-UFRN	2000	Nordeste	Tipo 2	Alto
HU-UFGD	1820	Centro-Oeste	Tipo 3	Alto
HUMAP-UFMS	1571	Centro-Oeste	Tipo 2	Alto
HUAC-UFCG	1438	Nordeste	Tipo 3	Alto
HE-UFPe	1400	Sul	Tipo 3	Alto
HUGV-UFAM	1400	Norte	Tipo 3	Alto
MEJC-UFRN	1060	Nordeste	Tipo 3	Alto
HU-UFSCar	727	Sudeste	Tipo 4	Alto
MCO-UFBA	600	Nordeste	Tipo 4	Alto
HUAB-UFRN	531	Nordeste	Tipo 4	Alto

Fonte: elaborado pelo autor

Em seguida, considerando a proporcionalidade de unidades por região do país, tipo de estrutura organizacional e tamanho do parque tecnológico, estabeleceu-se as seguintes condições simultâneas para a escolha das dez unidades entre as dezessete que possuem histórico de envolvimento nos trabalhos da rede: ao menos um Complexo Hospitalar; ao menos uma unidade do Tipo 1; ao menos três unidades do Tipo 2; ao menos três unidades do Tipo 3; ao menos duas unidades do Tipo 4; ao menos uma unidade da Região

Norte; ao menos cinco unidades da Região Nordeste; ao menos uma unidade da Região Centro-Oeste; ao menos duas unidades da Região Sudeste; e ao menos uma unidade da Região Sul; por fim, ao menos duas unidades com número grande de equipamentos médicos; ao menos três unidades com número médio de equipamentos médicos; e ao menos duas unidades com número pequeno de equipamentos médicos. Ao atender simultaneamente às condições mencionadas, foram obtidas dez unidades com a finalidade de representar a rede como um todo. O Quadro 11 descreve as unidades selecionadas.

Quadro 11 - Unidades hospitalares selecionadas

HUF	Quantidade equipamentos (JUN21)	Região do país	Estrutura organizacional	Envolvimento em grupos de trabalho
HC-UFMG	6873	Sudeste	Tipo 1	Alto
CH-UFC	5000	Nordeste	Complexo	Alto
MCO-UFBA	600	Nordeste	Tipo 4	Alto
HUAB-UFRN	531	Nordeste	Tipo 4	Alto
HC-UFPE	2442	Nordeste	Tipo 2	Alto
HU-UFJF	2140	Sudeste	Tipo 3	Alto
HUOL-UFRN	2000	Nordeste	Tipo 2	Alto
HUMAP-UFMS	1571	Centro-Oeste	Tipo 2	Alto
HUGV-UFAM	1400	Norte	Tipo 3	Alto
HE-UFPEl	1400	Sul	Tipo 3	Alto

Fonte: elaborada pelo autor

Para concluir a etapa de seleção dos especialistas participantes do grupo focal, foi selecionado o engenheiro clínico mais experiente de cada unidade hospitalar apresentada no Quadro 11. Assim, buscou-se reduzir as incertezas relacionadas ao conhecimento da matéria, bem como compreender o máximo das particularidades da rede.

5.2.2 Seleção dos critérios de priorização

Conforme descrito no Capítulo 4, para identificar os critérios de priorização adequados à realidade de cada instituição, propõe-se a condução da metodologia de grupo focal, buscando coletar informações, conhecer atitudes, opiniões, percepções e comportamentos dos participantes relativos ao problema pesquisado. Definidos os participantes, descritos na seção anterior, partiu-se para o agendamento de uma reunião *on-line* a fim

de apresentar o objetivo, a metodologia e os principais conceitos da pesquisa aos participantes. O roteiro está descrito no Apêndice A.

Durante a reunião, foram apresentados os principais conceitos dos trinta e três critérios levantados na literatura e foi explicado como os participantes deveriam responder ao questionário semiestruturado, reproduzido no Apêndice B. Ainda sobre o questionário, os participantes deveriam atribuir notas de 1 (um) a 5 (cinco) para o nível de aplicação de cada critério na unidade hospitalar a qual pertence. Essa atividade resultou nos dados consolidados na Tabela 1 (somatório de notas), em que os critérios de priorização função do equipamento e manutenção requerida foram classificados como os mais importantes e os critérios tempo de inatividade e complexidade de uso como os menos importantes para definir a prioridade de manutenção.

Tabela 1 - Resultado do questionário

Aplicação	Critérios	Valor
1º	Função	49
2º	Manutenção requerida	49
3º	Calibração	47
4º	Criticidade da missão	43
5º	Criticidade de área	42
6º	Risco físico	41
7º	Capacidade de atendimento	40
8º	Frequência de falhas	39
9º	Custo associado à demora no tratamento	38
10º	Risco para o operador	37
11º	Disponibilidade de <i>backup</i>	36
12º	Repetitividade	36
13º	Qualidade do tratamento	36
14º	MTBF	35
15º	Confiabilidade	35
16º	Reprodutibilidade	34
17º	Risco para o ambiente	34
18º	Complexidade técnica	33
19º	Custo de manutenção	33
20º	Idade	31
21º	Custo do equipamento	31
22º	Taxa de utilização	30
23º	Sensibilidade à manutenção	30
24º	MTTR	29
25º	Tempo remanescente de vida útil	28

Aplicação	Critérios	Valor
26º	Manutenções não realizadas	27
27º	Detectabilidade	27
28º	Recalls e alertas de perigo	25
29º	Obsolescência tecnológica	23
30º	Rapidez de resposta	22
31º	Carga de trabalho	21
32º	Tempo de inatividade	19
33º	Complexidade de uso	19

Fonte: elaborado pelo autor

Na segunda reunião com o grupo focal, os especialistas discutiram os resultados e confirmaram a ordem de importância estabelecida com as respostas do questionário. Na ocasião, os participantes concluíram que o modelo de priorização da rede estudada deveria conter um número máximo de cinco critérios de priorização para torná-lo de fácil aplicação. Contudo, observou-se que o critério classificado como sexto mais importante não poderia ficar de fora dado a sua relevância. Assim, foram selecionados os seis primeiros critérios de priorização que configuraram quase como unanimidade entre os participantes, que os aceitaram como consenso. Esses critérios também estão entre os mais utilizados nos modelos da literatura, conforme revisado anteriormente.

5.2.3 Características dos critérios selecionados

Referente às características dos critérios selecionados, vale mencionar que a função do equipamento foi classificada como o critério de maior nível de aplicação nas unidades da rede estudada. Ele representa o propósito principal do equipamento, ou seja, o fim para o qual foi concebido. Funções dos equipamentos poderiam ser, por exemplo, suporte à vida, terapia, diagnóstico, análises, entre outros. Trata-se de um critério usual, pois qualquer desvio de performance sugere preferir uma alternativa ao invés da outra, necessitando de uma escala para o tratamento. A escala utilizada na aplicação foi extraída de WHO (2011), Tabela 2.

De acordo com os dados obtidos no questionário, Tabela 1, o critério manutenção requerida ficou empatado em nível de aplicação com o critério função do equipamento. Entretanto, durante a condução do grupo focal, os participantes o classificaram como o segundo colocado. Esse critério representa a frequência de manutenção necessária conforme indicado pelo fabricante ou pela experiência dos especialistas da área (engenheiros

clínicos). Também é um critério usual. Entretanto, apresenta uma escala diferente do primeiro critério, conforme Tabela 3. Nesse aspecto, observa-se uma característica dos modelos não compensatórios, que permitem a avaliação de alternativas com base em múltiplos critérios sem a necessidade de reduzi-los a uma única métrica, fato que corrobora com as justificativas da escolha do método PROMETHEE.

Tabela 2 - Escala de avaliação do critério função

Categoria	Descrição da Função	Pontuação
Terapêutico	Suporte à vida	10
	Cirúrgico e Cuidados Intensivos	9
	Tratamento	8
Diagnóstico	Monitoramento Cirúrgico e Cuidados Intensivos	7
	Monitoramento fisiológico adicional e diagnóstico	6
Análises Clínicas	Análise laboratorial	5
	Acessório laboratorial	4
	Computadores e relacionados	3
Diversos	Outros	2

Fonte: WHO (2011)

Tabela 3 - Escala de avaliação do critério manutenção requerida

Manutenção requerida	Pontuação
Amplo: substituição de peças necessárias	3
Média: verificação de desempenho e testes de segurança	2
Mínimo: inspeção visual	1

Fonte: WHO (2011)

O critério com terceiro maior nível de aplicação nas unidades hospitalares da rede de interesse foi a calibração. Também é um critério usual, uma vez que qualquer diferença no desempenho torna preferível uma alternativa em detrimento da outra. Para Hernández-López, Pimentel-Aguilar e Ortiz-Posadas (2020), o critério possui uma escala de avaliação binária, sendo que o equipamento que requer calibração periódica recebe valor 1 (um) e o que não requer recebe valor 0 (zero). A avaliação é embasada no manual dos fabricantes, normas vigentes e experiência do especialista. A Tabela 4 descreve a condição.

Tabela 4 - Escala de avaliação do critério calibração

Calibração	Pontuação
Requerida	1
Não requerida	0

Fonte: Hernández-López, Pimentel-Aguilar e Ortiz-Posadas (2020)

Dando sequência, a criticidade da missão foi classificada como o quarto colocado quanto ao nível de aplicação na rede EBSEH. Trata-se de um critério usual com três graus de criticidade. Ele define o quanto o equipamento médico é crucial para garantir a eficiência do fluxo de atendimento dos pacientes (impacto operacional). Por exemplo, para um estabelecimento de saúde referência numa determinada especialidade, os equipamentos dessa especialidade serão mais críticos do que outros equipamentos com menor fluxo de atendimento de pacientes. Nesta pesquisa, foi utilizada a escala de avaliação proposta por Wang et al (2006), conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Escala de avaliação do critério criticidade da missão

Criticidade da missão	Pontuação
Crítico	3
Importante	2
Necessário	1

Fonte: Wang et al (2006)

Ainda na atividade de ordenar os critérios em nível de aplicação na rede (descrito anteriormente), para assim calcular os respectivos pesos relativos (metodologia ROC), o critério criticidade da área foi considerado pelos especialistas como o quinto mais importante dentro do modelo de priorização proposto. Esse critério também é usual e descreve criticidade da área de funcionamento do equipamento. Diferentes áreas podem ter criticidades diferentes, por exemplo, emergência, urgência, unidade de terapia intensiva, centro cirúrgico, diagnóstico por imagem, entre outras. A escala de criticidade das áreas pode variar um pouco entre os estabelecimentos de saúde. Contudo, nesta pesquisa, seguiu-se o raciocínio proposto por Kamal, Taghaddos e Karimi (2021), apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Escala de avaliação do critério criticidade da área

Criticidade da área	Valor linguístico	Pontuação
Emergência / Urgência / UTIs / Centro cirúrgico / CME	Muito importante	5
Endoscopia / Recuperação pós-anestésica	Importante	4
Angiografo / Diagnóstico por imagem / Enfermaria	Moderadamente importante	3
Laboratório / Ambulatório / Pesquisa clínica	Pouco importante	2
Central de equipamentos / outros	Não importante	1

Fonte: adaptado de Kamal, Taghaddos e Karimi (2021)

Concluindo a atividade de classificação do nível de aplicação dos critérios selecionados para o modelo proposto, o critério risco de uso devido a inexistência de manutenção, foi adicionado e classificado como sexto mais importante dada a sua relevância para o paciente, o operador e o próprio equipamento. Assim como os demais, trata-se de um critério usual. A escala de avaliação proposta por WHO (2011) é a mais presente no portfólio de artigos pesquisados, conforme revisão anterior. Dessa forma, a Tabela 7 foi utilizada nesta pesquisa para avaliar o referido critério.

Tabela 7 - Escala de avaliação do critério risco físico

Risco físico	Pontuação
Potencial morte do paciente	5
Potencial lesão no paciente ou operador	4
Terapia inadequada ou diagnóstico incorreto	3
Danos ao equipamento	2
Nenhum risco significativo identificado	1

Fonte: WHO (2011)

Com os resultados obtidos acima, partiu-se para a parametrização do modelo proposto, tendo como subetapas: a elicitación dos pesos dos critérios selecionados; a escolha das funções de preferência; e a estruturação das relações de sobreclassificação. Os resultados a seguir estão descritos conforme sequência de aplicação da ferramenta computacional PROMROCnRatio, utilizada para auxiliar nos cálculos do modelo proposto.

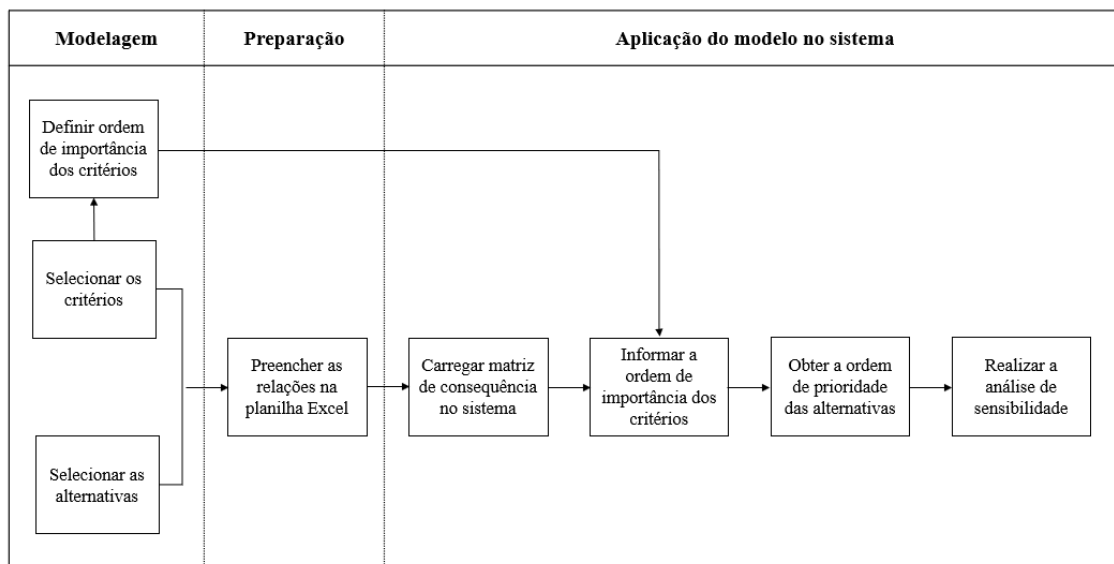
5.2.4 Estruturação das relações de sobreclassificação

A estruturação das relações de sobreclassificação consistem em correlacionar as alternativas com os critérios. Conforme explicitado no capítulo anterior, as alternativas desta pesquisa serão os equipamentos médicos do Centro Cirúrgico e Central de Material Esterilizado do Hospital Universitário Lauro Wanderley da Universidade Federal da Paraíba (HULW-UFPB). As alternativas selecionadas para testar o modelo (equipamentos) estão descritas no Apêndice C.

Para suportar essa etapa, utilizou-se a planilha disponibilizada no sistema PROMROCnRatio. Essa planilha foi preenchida na primeira linha com o nome dos seis critérios selecionados. Na segunda linha, com a direção de preferência de cada critério, sendo 1 para maximização (quanto mais crítico mais prioritário) e 0 para minimização (quanto menos crítico menos prioritário). Em seguida, a partir da linha 9, as alternativas foram

descritas e os valores de desempenho em função de cada critério inseridos. Assim, estabelecendo a matriz de avaliação do modelo. Essa avaliação baseou-se nas escalas de avaliação de cada critério apresentadas na seção anterior. Os dados consolidados estão no Apêndice D, que corresponde a planilha de entrada de dados do sistema. A estrutura lógica de aplicação do modelo no sistema escolhido pode ser observada na Figura 12.

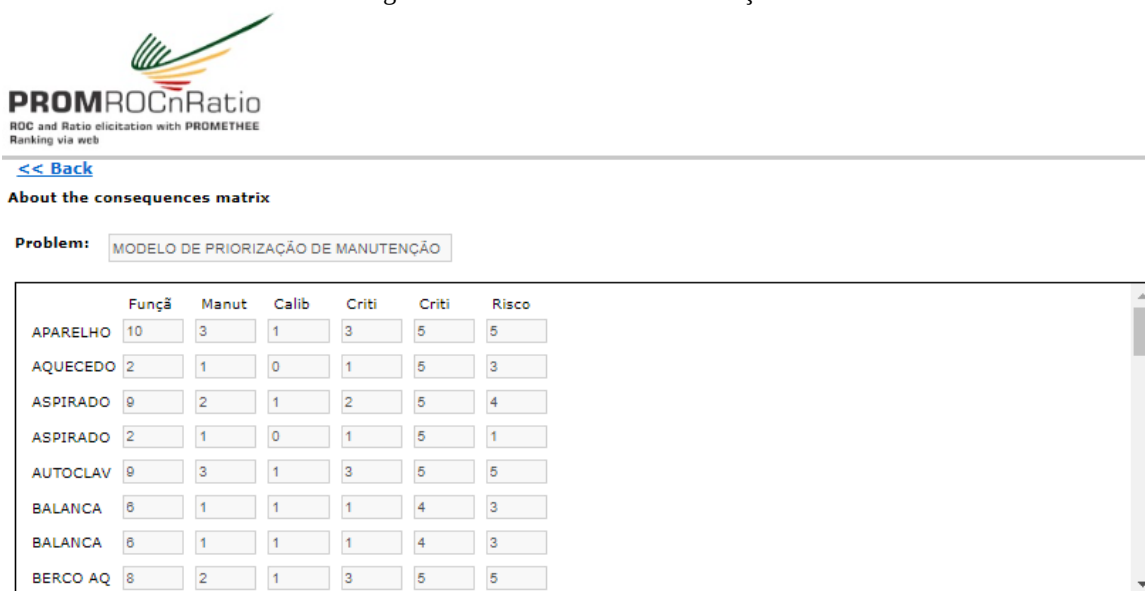
Figura 12 - Estrutura lógica de aplicação do modelo no sistema



Fonte: elaborada pelo autor

Na hipótese do presente modelo ser introduzido no sistema de gerenciamento de manutenção da rede estudada, a avaliação ocorrerá com os dados de entrada do próprio sistema, gerando assim o PGEMH em função dos critérios de priorização escolhidos. No entanto, essa hipótese não é escopo desta pesquisa, mas sim uma proposta para trabalhos futuros. Retornando à aplicação do modelo no sistema PROMROCnRatio, após carregar a planilha preenchida, a matriz de avaliação é apresentada no sistema, conforme Figura 13.

Figura 13 - Tela da matriz de avaliação



PROMROCnRatio
ROC and Ratio elicitation with PROMETHEE
Ranking via web

[<< Back](#)

About the consequences matrix

Problem:

	Funçã	Manut	Calib	Criti	Criti	Risco
APARELHO	10	3	1	3	5	5
AQUECEDO	2	1	0	1	5	3
ASPIRADO	9	2	1	2	5	4
ASPIRADO	2	1	0	1	5	1
AUTOCLAV	9	3	1	3	5	5
BALANCA	6	1	1	1	4	3
BALANCA	6	1	1	1	4	3
BERCO AQ	8	2	1	3	5	5

Fonte: elaborada pelo autor

5.2.5 Escolha das funções de preferências

Na tela de elicitação das preferências intercritérios, foi necessário informar a natureza de cada um dos seis critérios selecionados no sistema. Vale lembrar da seção anterior, que todos os seis critérios selecionados possuem natureza usual, vez que qualquer variação no seu desempenho sugere preferir uma alternativa ao invés da outra. Sendo assim, não foi necessária a etapa de elicitação dos limiares de preferência ou indiferença dos critérios, pois a função de preferência usual no sistema, estabelece para $F(a,b) = 1$, quando $[g_i(a) - g_i(b)] > 0$, e $F(a,b) = 0$, quando $[g_i(a) - g_i(b)] \leq 0$. A Figura 14 apresenta o processo de seleção das funções de preferências no sistema.

Figura 14 - Tela para escolher as funções de preferências

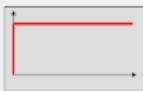
Intra-Criterion Elicitation

Restart

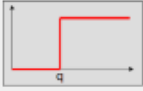
Intra-criterion preference elicitation

1 | Criterion: Função: Crit1

2 | Choose, among these options, a proper preference function that makes you comfortable when establishing preferences over



Usual criterion: any performance deviation suggests preferring one alternative rather than another.



U-shape criterion: only after a few performance deviation, you prefer one alternative rather than another.



V-shape criterion: under a few performance deviation, you prefer one alternative rather than another gradually.



Level-criterion: there is an interval of performance difference which you have a half-preference of one alternative rather than another.



V-shape with indifference criterion: there is an interval of performance difference which you have a partial preference of one alternative rather than another, gradually.



Gaussian criterion: you prefer one alternative rather than another following a gaussian distribution.

3 | Answer the questions below to establish your preferences

No questions needed.

Next >>

Fonte: elaborada pelo autor

5.2.6 Elicitação dos pesos

Com a informação da ordem de importância de cada critério, calculam-se os pesos ROC. A Figura 15 apresenta a tela do sistema onde os critérios foram ordenados de acordo com o seu nível de aplicação na rede hospitalar de interesse. Em seguida, os pesos ROC foram calculados com base na Equação 8. Cabe mencionar, que quanto maior a importância do critério de priorização, tratado nesta pesquisa como nível de aplicação, maior o peso atribuído ao critério.

Figura 15 - Tela para escolher a importância dos critérios

Among the criteria available below, which one is the most important for you? Restart

Answer the question until there is no criterion available.

List of Criteria:

>>

Criteria Ranking:

-- No Selection --
Crit1
Crit2
Crit3
Crit4
Crit5
Crit6

Fonte: elaborada pelo autor

A Tabela 8 apresenta os dados obtidos acerca do peso calculado pelo sistema para cada critério selecionado, de acordo com a sua ordem de importância. Os dados demonstram uma diferença relevante entre o valor do critério mais importante e o valor do menos importante. Nesse sentido, ao término da aplicação do modelo propôs-se efetuar uma análise de sensibilidade baseada em testes de correlação para verificar a robustez dos resultados, especialmente quando há alterações nos pesos dos critérios. Essa análise será mostrada mais adiante. Antes disso, serão apresentados os resultados da ordem de priorização de manutenção calculados pelo sistema.

Tabela 8 - Pesos dos critérios obtidos com o método ROC

Código	Nome do Critério	Peso ROC
Crit1	Função	0,4044
Crit2	Manutenção requerida	0,2196
Crit3	Calibração	0,1708
Crit4	Criticidade da missão	0,1124
Crit5	Criticidade da área	0,0638
Crit6	Risco físico	0,0279

Fonte: elaborada pelo autor

5.2.7 Aplicação do modelo

Com base no método não compensatório PROMETHEE II, combinado aos pesos substitutos ROC, o sistema PROMROCnRatio calculou a matriz do grau de sobreclassificação automaticamente, apresentando os fluxos positivos Φ^+ negativos Φ^- e líquido Φ de cada alternativa. Na mesma tela, também é apresentado o resultado da ordem de prioridade das manutenções dos equipamentos médicos analisados (alternativas). A Figura 16

demonstra o resultado no formato de gráfico e a Tabela 9 apresenta o resultado completo da exploração das relações de sobreclassificação.

Figura 16 - Tela com o resultado do problema

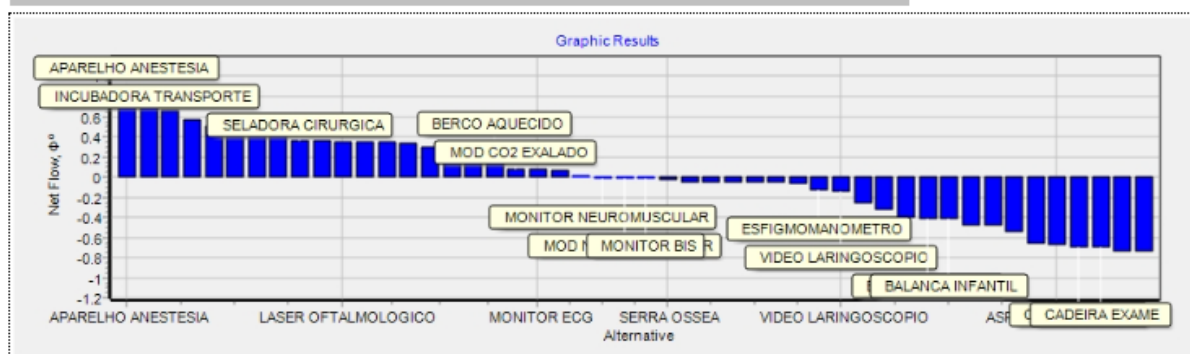
RESULT REPORT

By using a non-compensatory rationality, the PROMETHEE II method with ROCnRATIO elicitation took into account pairwise comparison between alternatives for each criterion. Apart from the outranking degree matrix, these positive and negative flows express the extent in which an alternative outranks (or is outranked by) all other options. Consequently, the net flow is calculated for each alternative in order to rank the recommendation.

Ranking: Exploiting the valued outranking relation - outgoing, ingoing, and net flows

Ranking	Alternative	Positive Flow, Φ^+	Negative Flow, Φ^-	Net Flow, Φ^0
1	APARELHO ANESTESIA	0.7232	0	0.7232
2	INCUBADORA TRANSPORTE	0.7232	0	0.7232
3	VENTILADOR PULMONAR	0.7102	0.0494	0.6608
4	CARDIOVERSOR	0.6204	0.0463	0.5741
5	TERMODESINFECTORA	0.5408	0.0348	0.506
6	ESTERILIZADOR PLASMA	0.5408	0.0348	0.506
7	AUTOCLAVE HORIZONTAL	0.5408	0.0348	0.506
8	EFACEMULSIFICADOR	0.5366	0.0424	0.4942

Graphic Visualization



Fonte: elaborada pelo autor

Diante dos resultados explicitados na Figura 16 e Tabela 9, observa-se que o equipamento com maior prioridade de manutenção entre os existentes no Centro Cirúrgico e Central de Material Esterilizado do HULW-UFPB é o Aparelho de Anestesia e o menos prioritário é o Foco Clínico. Esse resultado foi confirmado tanto pelo engenheiro clínico mais experiente quanto pelos outros dois engenheiros clínicos do quadro de funcionários da instituição. Ainda assim, nesta pesquisa, foi efetuada uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto do resultado quando há alterações nos pesos dos critérios. Para concluir a análise, foi realizada um teste de hipóteses para avaliar a coerência e consistência da simulação, conforme apresenta a seção seguinte.

Tabela 9 - Resultado da priorização

Ranking	Equipamento	Fluxo positivo, Φ^+	Fluxo negativo, Φ^-	Fluxo líquido, Φ
1	Aparelho Anestesia	0,7232	0,0000	0,7232
2	Incubadora Transporte	0,7232	0,0000	0,7232
3	Ventilador Pulmonar	0,7102	0,0494	0,6608
4	Cardioversor	0,6204	0,0463	0,5741
5	Termodesinfectora	0,5408	0,0348	0,5060
6	Esterilizador Plasma	0,5408	0,0348	0,5060
7	Autoclave Horizontal	0,5408	0,0348	0,5060
8	Facoemulsificador	0,5366	0,0424	0,4942
9	Seladora Cirúrgica	0,4379	0,0810	0,3569
10	Lavadora Ultrassônica	0,4379	0,0810	0,3569
11	Laser Oftalmológico	0,4338	0,0887	0,3451
12	Bisturi Eletrônico	0,4338	0,0887	0,3451
13	Insuflador Vdl	0,4338	0,0887	0,3451
14	Fonte Luz Vdl	0,4693	0,1368	0,3325
15	Bomba Infusão	0,4249	0,1304	0,2945
16	Bomba Seringa	0,4249	0,1304	0,2945
17	Aspirador Cirúrgico	0,4098	0,1543	0,2554
18	Berço Aquecido	0,4293	0,2635	0,1658
19	Mod Co2 Exalado	0,3665	0,2840	0,0825
20	Monitor Ecg	0,3665	0,2840	0,0825
21	Secadora Instrumental	0,3258	0,2593	0,0665
22	Monitor Multiparamétrico	0,3535	0,3334	0,0201
23	Monitor Neuromuscular	0,3424	0,3496	-0,0072
24	Mod Neuromuscular	0,3424	0,3496	-0,0072
25	Monitor Bis	0,3424	0,3496	-0,0072
26	Serra Óssea	0,2687	0,2859	-0,0171
27	Mesa Cirúrgica	0,2522	0,2965	-0,0443
28	Microscópio Cirúrgico	0,2522	0,2965	-0,0443
29	Foco Cirúrgico	0,2522	0,2965	-0,0443
30	Processadora Vdl	0,2522	0,2965	-0,0443
31	Câmera Vdl	0,2522	0,2965	-0,0443
32	Incubadora Biológica	0,3163	0,3764	-0,0601
33	Esfigmomanômetro	0,2803	0,4082	-0,1280
34	Vídeo Laringoscópio	0,2281	0,3621	-0,1340
35	Termohigrômetro	0,2174	0,4729	-0,2555
36	<i>Nobreak</i>	0,2222	0,5411	-0,3189
37	Monitor Vdl	0,1392	0,5398	-0,4005
38	Balança Adulto	0,1643	0,578	-0,4137
39	Balança Infantil	0,1643	0,578	-0,4137
40	Ultrassom Portátil	0,1252	0,5989	-0,4736
41	Ultrassom Geral	0,1252	0,5989	-0,4736

Ranking	Equipamento	Fluxo positivo, Φ^+	Fluxo negativo, Φ^-	Fluxo líquido, Φ
42	Digitalizador Vdl	0,0611	0,6006	-0,5395
43	Aquecedor Paciente	0,0317	0,6837	-0,6520
44	Aspirador Fumaça	0,0217	0,6902	-0,6686
45	Cama Elétrica	0,024	0,7156	-0,6916
46	Cadeira Exame	0,024	0,7156	-0,6916
47	Guindaste Paciente	0,0087	0,7397	-0,7310
48	Foco Clínico	0,0087	0,7397	-0,7310

Fonte: elaborado pelo autor

5.2.8 Análise de sensibilidade

Embora o resultado da ordem de priorização tenha se mostrado coerente com as experiências dos especialistas, esta pesquisa adicionou a etapa de análise de sensibilidade. O sistema escolhido possibilita a análise de sensibilidade utilizando o método de Monte Carlo. Esse método gera um número elevado de amostras aleatórias dos parâmetros do modelo, simulando o comportamento para cada conjunto de parâmetros e, em seguida, analisa as saídas para entender como as variações dos parâmetros impactam no resultado do problema. Na Figura 17, é possível observar que o sistema permite gerar variações tanto nos parâmetros da matriz de avaliação quanto nos pesos atribuídos pelo método ROC. Considerando a natureza dos critérios selecionados, optou-se apenas por analisar a sensibilidade dos resultados quando há variações nos valores dos pesos. A distribuição de probabilidade escolhida foi a uniforme e o percentual de variação 20%.

Feito isso, obteve-se o relatório de mudanças na ordem de priorização das manutenções dos equipamentos analisados, Figura 18 e Tabela 10. No relatório, tanto as três primeiras posições como as oito últimas não sofreram mudanças ao variar os pesos, permanecendo na mesma posição em 100% das simulações. Além disso, poucos equipamentos tiveram um percentual de mudança significativo. Apenas a serra óssea, o foco cirúrgico, a processadora vdl, a câmera vdl e a incubadora biológica tiveram mais de 50 % de inversões nas ordens originais de prioridade. O método utilizado possui uma abordagem poderosa, pois considera a natureza estocástica das incertezas e permite avaliar os resultados em função da distribuição de probabilidade. Dessa forma, o relatório fornece informações robustas para o decisor mensurar a sensibilidade das alternativas quando há variação nos pesos.

Figura 17 - Tela da análise de sensibilidade

Sensitivity Analysis

About

► The Sensitivity Analysis module allows the decision maker to perform the analysis by varying the original consequence matrix values of the problem for the selected criteria as well as the weight assignment.

Weights

Do you want to insert the weights in the sensitivity analysis? ☒ Yes ☐ No

Select parameters:

Choose the type of distribution: ☐ Uniform ☐ Triangular

Parameter Range (%):

View Results

Restart

Criteria	Weight	Range (%)	PDF
Cr 1:	0.408	20	Uniform
Cr 2:	0.242	20	Uniform
Cr 3:	0.158	20	Uniform
Cr 4:	0.103	20	Uniform
Cr 5:	0.061	20	Uniform
Cr 6:	0.028	20	Uniform

Consequences Matrix

Do you want to insert the evaluation matrix in the sensitivity analysis? ☐ Yes ☒ No

Select parameters:

Choose the type of distribution: ☐ Uniform ☐ Triangular

Parameter Range (%):

Restart

Criteria	Evaluation	Range
Cr 1: Função	0	0
Cr 2: Manutenção Requerida	0	0
Cr 3: Calibração	0	0
Cr 4: Criticidade da Missão	0	0
Cr 5: Criticidade da Área	0	0
Cr 6: Risco ao Paciente	0	0

Start simulation

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 18 - Tela do resultado da simulação

Simulation Results

► The Sensitivity Analysis module allows the decision-maker to perform the analysis by varying the original consequence matrix values of the problem for the selected criteria as well as the decision weights.

Rank Changes Report

Original Rank	Alternative	10(%)	20(%)	30(%)	40(%)	50(%)	60(%)	70(%)	80(%)	90(%)	100(%)
1	APARELHO ANESTESIA	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	INCUBADORA TRANSPORTE	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
3	VENTILADOR PULMONAR	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
4	CARDIOVERSOR	0	0	0	99.7	0.3	0	0	0	0	0
5	TERMODESINFECTORA	0	0	0	0	99.7	0.3	0	0	0	0
6	ESTERILIZADOR PLASMA	0	0	0	0	0	99.7	0.3	0	0	0
7	AUTOCLAVE HORIZONTAL	0	0	0	0.3	0	0	99.7	0	0	0
8	FACOEMULSIFICADOR	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
9	SELADORA CIRURGICA	0	0	0	0	0	0	0	0	82.2	17.8
10	LAVADORA ULTRASSÔNICA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.8

Fonte: elaborada pelo autor

Na Tabela 10, observa-se que o maior intervalo de variação nas posições originais ocorre entre as prioridades 27 e 34. Particularmente, tais equipamentos médicos não requerem substituições periódicas de peças, mas configuram em áreas extremamente críticas. Os equipamentos das primeiras posições quase não sofreram variações, o que sugere a confirmação da ordem de prioridade. Esses equipamentos geram um impacto significativo na ausência de manutenção. Portanto, indica-se a sua inclusão no PGEMH da instituição. No outro extremo, a análise de sensibilidade sugere de fato que os equipamentos são menos prioritários à realização de manutenções planejadas.

Tabela 10 - Relatório das mudanças de prioridades

Posição original	Equipamentos	% Original	% Mudanças
1	Aparelho Anestesia	100	00,0
2	Incubadora Transporte	100	00,0
3	Ventilador Pulmonar	100	00,0
4	Cardioversor	99,7	00,3
5	Termodesinfectora	99,7	00,3
6	Esterilizador Plasma	99,7	00,3
7	Autoclave Horizontal	99,7	00,3
8	Facoemulsificador	100	00,0
9	Seladora Cirúrgica	82,2	17,8
10	Lavadora Ultrassônica	82,2	17,8
11	Laser Oftalmológico	67,5	32,5
12	Bisturi Eletrônico	67,5	32,5
13	Insuflador Vdl	67,5	32,5
14	Fonte Luz Vdl	59,3	40,7
15	Bomba Infusão	100	00,0
16	Bomba Seringa	91,8	08,2
17	Aspirador Cirúrgico	100	00,0
18	Berço Aquecido	100	00,0
19	Mod Co2 Exalado	67,1	32,9
20	Monitor Ecg	99,5	00,5
21	Secadora Instrumental	56	44,0
22	Monitor Multiparamétrico	68,7	31,3
23	Monitor Neuromuscular	58,8	41,2
24	Mod Neuromuscular	79,2	20,8
25	Monitor Bis	78,2	21,8
26	Serra Óssea	34,6	65,4
27	Mesa Cirúrgica	43,9	56,1
28	Microscópio Cirúrgico	51,5	48,5
29	Foco Cirúrgico	37,3	62,7
30	Processadora Vdl	37,3	62,7
31	Câmera Vdl	42,6	57,4
32	Incubadora Biológica	47,2	52,8
33	Esfigmomanômetro	50,9	49,1
34	Vídeo Laringoscópio	53	47,0
35	Termohigrômetro	95,3	04,7
36	<i>Nobreak</i>	93,9	06,1
37	Monitor Vdl	67,4	32,6
38	Balança Adulto	98,4	01,6
39	Balança Infantil	69,8	30,2
40	Ultrassom Portátil	100	00,0
41	Ultrassom Geral	100	00,0
42	Digitalizador Vdl	100	00,0
43	Aquecedor Paciente	100	00,0
44	Aspirador Fumaça	100	00,0
45	Cama Elétrica	100	00,0
46	Cadeira Exame	100	00,0
47	Guindaste Paciente	100	00,0
48	Foco Clínico	100	00,0

Fonte: elaborado pelo autor

Por último, mas não menos importante, realizou-se um teste estatístico de correlação sobre o número de simulações efetuadas para avaliar a precisão da análise diante das incertezas nos parâmetros. A Figura 19, demonstra que o sistema utiliza os pressupostos do teste de hipótese de Kendall para correlacionar a ordem de prioridade das alternativas. Os resultados obtidos na simulação contradizem a hipótese nula de que não há correlação entre os resultados. Além disso, ao escolher verifica-se que a simulação é considerada coerente e consistente com um nível de significância 0,05%. Esse processo oferece maior confiabilidade dos resultados, auxiliando a tomada de decisão.

Figura 19 - Tela da análise de correlação

About the Correlation Analysis

Kendall's tau (τ) Correlation Coefficient

► It is a statistic test used to measure the association between two measured quantities.

Significance Level (α)

► Values of α must be between 0 (zero) and 1 (one). Historically, the α -value of 0.05 has been used for α . This means that about one test in twenty (1:20) will falsely reject the null hypothesis.

Hypothesis Test

► Under the null hypothesis of independence between two entities, X and Y, the sampling distribution of τ has an expected value of 0 (zero). Here, X means the original ranking from PROMETHEE II, while Y represents the simulated ranking from the Monte Carlo Sensitivity Analysis.

Kendall's τ Coefficient Report

Maximum	1
Mean	0.9733
Minimum	0.922
Mode	0.9787
Median	0.9787
Standard Deviation	0.0188

Hyphotesis Test

Significance Level (α):

0.05 ▼

► Ho: " There is no association between the rankings (original and the simulated ones) under analysis."

The Null Hyphotesis is:

Rejected

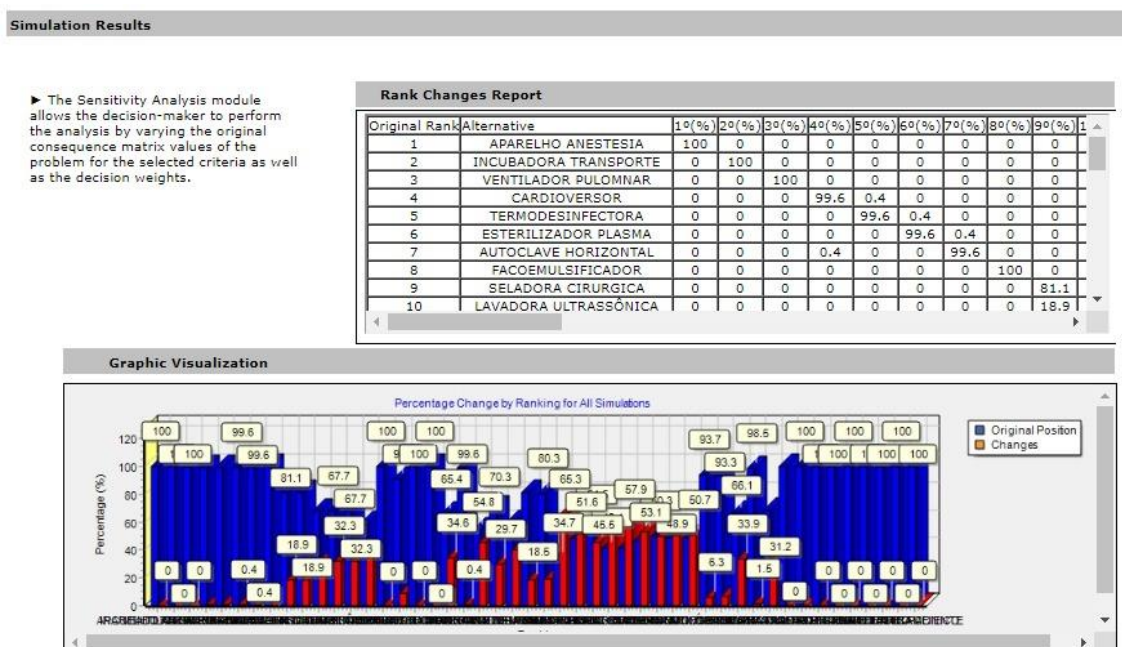
Go to Simulation Analysis ►

Fonte: elaborada pelo autor

A Figura 20 apresenta a tela dos resultados da simulação, com uma visualização gráfica dos percentuais de mudança na ordem de prioridade das alternativas quando há

alteração nos pesos dos critérios. Essa tela permite ao decisor avaliar os resultados e enxergar quais alternativas têm maiores chances de mudar a sua ordem de prioridade para a realização da manutenção.

Figura 20 - Tela dos resultados da simulação



Fonte: elaborado pelo autor

5.3 Discussão dos resultados

De acordo aos engenheiros clínicos da instituição, o resultado da aplicação do modelo apresentou resultados totalmente alinhados com a realidade. Contudo, vale mencionar que embora a rede hospitalar determine nas suas normas operacionais a aplicação do método de priorização proposto por WHO (2011), na prática, a definição de criticidade e, consequentemente, a inclusão do equipamento no cronograma de manutenções é realizada de acordo com a experiência de cada engenheiro clínico da rede. Esses especialistas, durante a condução do grupo focal, afirmaram que essa não uma característica exclusiva das unidades da rede EBSEH. Baseados nas experiências anteriores, eles informaram que nenhum estabelecimento de saúde público ou privado onde trabalharam utilizava um método sistematizado para definir o PGEMH. A justificativa apresentada foi a dificuldade de aplicação ou a baixa relação com as particularidades da instituição.

Em contraponto com o cronograma de manutenções planejadas do Centro Cirúrgico e Central de Material Esterilizado do HULW-UFPB (Figura 21), o resultado da aplicação do modelo proposto recomenda que alguns equipamentos de esterilização (esterilizador de plasma, seladora cirúrgica e lavadora ultrassônica), classificados com prioridade superior aos equipamentos de monitorização e diagnóstico, por exemplo, sejam inseridos no PGEMH dado à relevância dentre os critérios estabelecidos. O pensamento da análise em questão foi confirmado pela experiência do decisor. Assim sendo, o modelo proposto se apresentou como uma importante ferramenta com contribuições tanto científicas como práticas.

Figura 21 - Cronograma de manutenções planejadas da unidade analisada

CRONOGRAMA DE MANUTENÇÕES PLANEJADAS													
EQUIPAMENTO	TIPO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
APARELHO DE ANESTESIA	CA / PREV / SE											X	
ASPIRADOR CIRÚRGICO	PREV	X											
AUTOCLAVE	CA / PREV / SE			X							X		
BISTURI ELÉTRICO	CA / PREV / SE					X							
CARDIOVERSOR	CA / PREV / SE					X							
FOCO	CA / PREV / SE												X
MESA CIRÚRGICA	PREV / SE								X				
MICROSCÓPIO	PREV							X					
MONITOR MULTIPARAMÉTRICO	CA / PREV / SE	X	X										
OXÍMETRO	CA / PREV	X	X										
TERMODESINFECTORA	CA / PREV / SE			X	X								
TORRE DE VÍDEO	PREV / INSP								X				
ULTRASSOM	PREV / INSP											X	
VENTILADOR	CA / PREV / SE						X	X				X	

Fonte: HULW-UFPB (2023)

6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões derivadas da presente pesquisa sobre priorização de manutenção de EMHs, focando na descrição do atendimento dos objetivos, nas contribuições científicas e práticas, nas limitações que foram identificadas durante a execução e nas possíveis direções para as pesquisas futuras com base nas lacunas identificadas.

6.1 Atendimento dos aos objetivos

A pesquisa inicialmente foi motivada pela necessidade de adotar um modelo de priorização de manutenção para compor o PGEMH da rede hospitalar onde o autor trabalha. Embora, as buscas iniciais na literatura tenham revelado a existência de modelos de priorização, eles não possuíam diretrizes claras sobre sua aplicabilidade em diferentes contextos. Como resultado, o autor optou por realizar um estudo mais aprofundado sobre os modelos de priorização existentes. À medida que a pesquisa progrediu, o autor vislumbrou a necessidade de desenvolver um modelo de priorização de manutenção capaz de considerar diferentes realidades, trabalho este que também caracterizaria uma contribuição científica, dada a escassez verificada na literatura.

Partindo da análise da literatura, observou-se que para uma modelagem mais próxima da realidade seria necessário selecionar critérios de priorização e ferramentas de avaliação de acordo com as particularidades e requisitos da instituição de interesse. Dessa forma, o autor buscou atender um dos objetivos específicos de pesquisa, identificando todos os critérios de priorização citados no portfólio de artigos coletados em uma busca sistemática. Essa etapa gerou uma lista de critérios uniformes, com definições inequívocas, para auxiliar os tomadores de decisão na seleção dos critérios mais adequados à rede hospitalar estudada. Ademais, no atendimento do segundo objetivo específico, foram extraídos do portfólio os principais conceitos e atributos das ferramentas de avaliação utilizadas nos trabalhos anteriores e, assim, verificar as que mais se adequam ao problema de pesquisa.

Para compor o modelo de priorização da rede hospitalar de interesse, foram escolhidos o método PROMETHEE e o método ROC como ferramentas de avaliação. A escolha levou em consideração as vantagens específicas de cada método e como podem abordar as necessidades do modelo de priorização proposto. Especialmente, pelo fato da

simplicidade de concepção e aplicação, capacidade de lidar com alternativas não comparáveis, avaliação do comportamento de preferência do decisor e uma metodologia simples, com a necessidade apenas de definição da ordem de importância para estabelecer os pesos dos critérios. Ainda do objetivo de selecionar os critérios, devido ao tamanho da rede e a fim de estabelecer um campo viável de pesquisa, primeiramente, selecionou-se dez especialistas de modo a representar a rede como um todo. Em seguida, os especialistas participaram da metodologia grupo focal, com aplicação de questionários, para escolher os critérios de priorização mais adequados à instituição de interesse. Assim, foram selecionados e classificados em ordem de importância os critérios: função, manutenção requerida, criticidade da missão, criticidade da área e risco do equipamento.

Em relação ao objetivo de parametrizar o modelo de priorização para a rede estudada, a modelagem contou com um processo interativo com os especialistas, a introdução dos critérios adequados à instituição, a captura de preferência dos especialistas quanto à ordem de importância dos critérios, a compreensão das escalas dos critérios para avaliar as alternativas, a definição das alternativas a serem priorizadas, a definição dos pesos relativos por meio do método selecionado, o estabelecimento dos limiares de indiferença e preferência (não necessário nesta pesquisa devido à natureza dos critérios escolhidos) e a construção da matriz de avaliação das alternativas. Esse procedimento detalhado de parametrização demonstrou um compromisso com a precisão e a aplicabilidade do modelo de priorização às necessidades específicas da instituição de interesse. Isso fortaleceu a qualidade e a relevância científica da pesquisa.

A fim de atender o objetivo de validar o modelo de priorização proposto, foi selecionada uma das unidades da rede hospitalar de interesse para aplicar e testar o modelo. A unidade escolhida foi o HULW-UFPB devido a facilidade do autor em conduzir e coletar os dados da pesquisa. Ademais, em decorrência da quantidade de equipamentos médicos da instituição, optou-se por avaliar apenas os equipamentos do Centro Cirúrgico e Central de Material Esterilizados por já possuírem número e complexidade suficiente para avaliar o modelo. Em seguida, para auxiliar na análise e processamento dos dados relacionados à aplicação do modelo, foi utilizado o sistema PROMROCnRatio, disponibilizado gratuitamente. Esse sistema, calculou automaticamente o grau de sobreclassificação das alternativas em relação a cada critério e, combinando com o método de elicitação dos

pesos ROC, forneceu os fluxos positivos, negativos e líquidos das alternativas, apresentando, assim, a ordem de prioridades de manutenção dos equipamentos médicos analisados. O sistema também possibilitou a análise de sensibilidade dos resultados, que se mostraram coerentes e consistentes com um nível de significância de 0,05%.

Da análise de sensibilidade dos resultados, utilizando o método de Monte Carlo para simular alterações nos pesos atribuídos, verificou-se que as três primeiras e as oito últimas posições de prioridade não sofreram nenhuma inversão de posição. Além disso, poucos equipamentos tiveram inversões significativas nas ordens originais de prioridade. É importante destacar que a robustez dos resultados está ligada diretamente aos dados do problema. Portanto, é necessário fazer a ressalva que a análise de sensibilidade pode apresentar resultados diferentes em problemas com outras configurações de dados.

Adiante, ao discutir a ordem de prioridades obtidas pelo modelo proposto com os engenheiros clínicos da instituição, o resultado foi confirmado e se mostrou alinhado com o cronograma de manutenções planejadas do estabelecimento. No entanto, o resultado chamou a atenção para a criticidade dos equipamentos de esterilização (esterilizadora de plasma, lavadora ultrassônica e seladora cirúrgica) devido à relevância para a unidade hospitalar.

De forma geral, considerou-se o modelo proposto como adequado para priorizar a manutenção de equipamentos médicos na rede hospitalar estudada, podendo ser facilmente parametrizado para outras instituições hospitalares. Portanto, conclui-se que o objetivo geral da pesquisa foi cumprido.

6.2 Contribuições científicas e práticas

A respeito das contribuições, a metodologia adotada para a construção do modelo apresentou viabilidade de replicação e adaptação com a realidade de outras instituições, o que ressalta a abrangência da contribuição pesquisa. Considerando que modelos para tal finalidade ainda são escassos na literatura e de difícil implementação, pode-se considerar que este trabalho constitui uma contribuição científica.

Do ponto de vista prático, o modelo proposto tanto utilizou a combinação de ferramentas poderosas quanto aplicou uma metodologia interativa com os tomadores de decisão para gerar uma ordem de prioridades de manutenção de acordo com as particu-

dades do ambiente de interesse. Dessa forma, a metodologia apresentada para o desenvolvimento do modelo aproximou a teoria da prática, gerando assim resultados mais precisos para a unidade hospitalar analisada.

Ademais, o modelo eventualmente chama atenção para equipamentos críticos que atualmente podem não configurar no cronograma de manutenções planejadas do estabelecimento de saúde. Além de alertar para equipamentos prioritários que não eram considerados como tal, o modelo traz a importante contribuição de trazer um padrão organizacional menos dependente do decisor e permitir a automatização do processo de priorização de equipamentos.

6.3 Limitações da pesquisa e recomendações para trabalhos futuros

Naturalmente, a pesquisa apresentou algumas limitações durante a sua execução. Uma delas foi considerar na metodologia grupo focal apenas especialistas de dez unidades das 41 existentes na rede hospitalar, pois promover a interação com especialistas de 41 unidades hospitalares, de diferentes partes do país, poderia tornar a pesquisa impraticável.

Outra limitação, foi a aplicação do modelo em apenas uma unidade da rede hospitalar estudada, mais precisamente, no centro cirúrgico e central de material esterilizado da referida unidade. Isso ocorreu devido à necessidade dos decisores inserir na matriz de avaliação um número elevado de informações a respeito dos 2.000 equipamentos pertencentes à unidade hospitalar, sem uma base de dados já estabelecida para os seis critérios de priorização do modelo proposto.

Além dessas, é importante destacar que a escolha do método para a rede hospitalar de interesse assumiu uma racionalidade não compensatória dos decisores sobre a avaliação das alternativas, baseada em múltiplos critérios de priorização, sem a necessidade de reduzir os critérios a uma única métrica. Portanto, para a aplicação do método em outras instituições, deve-se considerar o mesmo tipo de racionalidade ou alterar o método.

Cabe ainda mencionar que a ordem importância dos critérios de priorização, os próprios critérios e até mesmo a racionalidade dos decisores podem mudar com o tempo, o que leva uma necessidade de revisão periódica do modelo proposto, tanto na rede hospitalar estudada como em outras instituições interessadas na aplicação do modelo.

Por último, a avaliação de prioridade se limitou aos tipos de equipamentos médicos existentes nos referidos setores críticos. Ou seja, foram avaliados 48 tipos de equipamentos distintos. Contudo, os setores possuem em conjunto a quantidade de 198 equipamentos. Alguns deles do mesmo tipo, mas eventualmente de marca e modelo distintos ou até mesmo com idades diferentes.

Essa abordagem está alinhada com a estratégia de manutenção definida pela unidade hospitalar, conforme podemos ver no cronograma da Figura 21. Além disso, com os critérios selecionados, isso não resultaria em diferenciação nas repostas, pois os critérios selecionados estão atrelados às características dos equipamentos, o que sugere uma oportunidade para a rede reavaliar a sua estratégia de manutenção e adicionar à análise critérios como idade, frequência de quebra, entre outros com perspectiva quantitativa.

Complementando, propõe-se inicialmente para trabalhos futuros a implementação do modelo em sistemas de gerenciamento de manutenção (*software*), de modo a gerar automaticamente relatórios da ordem de prioridades com as informações do próprio sistema, o que tornaria o modelo amplamente aplicado de acordo com relatos dos especialistas na condução do grupo focal.

Outra proposta de trabalho futuro, observada pelos especialistas do grupo focal, é criar um modelo para programar a periodicidade das manutenções dos EMHs, de modo que além de obter a ordem de prioridade seja possível definir quantas manutenções são necessárias ao longo do ano para cada equipamento.

Ademais, em trabalhos futuros no qual o decisor assumir uma racionalidade compensatória, propõe-se a utilização do método *Simple Multi-Attribute Rating Technique exploiting ranking* (SMARTER), que é baseado num procedimento de ponderação formalmente justificável (EDWARDS; BARRON, 1994).

Por fim, ainda em ambientes no qual os especialistas utilizam a racionalidade não compensatória, propõe-se comparar os resultados de priorização provenientes de outros métodos de sobreclassificação, por exemplo, métodos da família *Elimination Et Choix Traduisant La Realite* (ELECTRE), com o método proposto nesta pesquisa, para se certificar quanto ao de maior precisão.

REFERÊNCIAS

- ABDO, A. M.; WAHED, M. A.; SHARAWI, A. Dynamic Model for Evaluation of Medical Devices Maintenance in Developing Countries. **International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management**, v. 3, n. 12, p. 145–159, 2014.
- ABNT. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade** Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1994.
- ABNT. **NBR 15943: Diretrizes para um programa de gerenciamento de equipamentos de infraestrutura de serviços de saúde e de equipamentos para a saúde** Rio de Janeiro Associação Brasileira de Normas Técnicas, , 2011.
- ABREU, A.; CALADO, J.; REQUEIJO, J. **Buildings Lean Maintenance Implementation Model**. International Conference on Engineering UBI 2015. **Anais...**2016
- ALMEIDA, A.; COSTA, A. Modelo De Decisão Multicritério Para Priorização De Sistemas De Informação Com Base No Método Promethee. **Gestão & Produção**, v. 9, n. 2, p. 201–214, 2002.
- ANTOSZ, K.; PASKO, L.; GOLA, A. **The Use of Intelligent Systems to Support Decision Lean Maintenance**. IFAC-PapersOnLine. **Anais...**2019
- ANVISA. **RDC 02: Gerenciamento de tecnologias em saúde em estabelecimentos de saúde** Brasília Agência Nacional de Vigilância Sanitária, , 2010.
- ANVISA. **RDC 509: Gerenciamento de tecnologias em saúde em estabelecimentos de saúde** Brasília Agência Nacional de Vigilância Sanitária, , 2021.
- ARUNRAJ, N. S.; MAITI, J. Risk-based maintenance-Techniques and applications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 142, n. 3, p. 653–661, 2007.
- ASHE/AHA. **Clinical Equipment Risk Classification** American Society for Healthcare Engineering of the American Hospital Association USA American Society for Healthcare Engineering of the American Hospital Association, , 1996.
- BAHREINI, R.; DOSHMANGIR, L.; IMANI, A. Factors Affecting Medical Equipment Maintenance Management : A Systematic Review. **Journal of Clinical and Diagnostic Research**, v. 12, n. 4, p. 1–7, 2018.
- BRITO, L. F. M. Clinical Engineering in Brazil. In: DYRO, J. (Ed.). . **Clinical Engineering Handbook**. 1. ed. Burlingto: Elsevier Academic Press, 2004. p. 69–72.
- BRONZINO, J. D. **The Biomedical Engineering Handbook**. Connecticut: Taylor & Francis, 2006.
- CARNERO, M. C.; GÓMEZ, A. A multicriteria decision making approach applied to improving maintenance policies in healthcare organizations. **BMC Medical Informatics and Decision Making**, v. 16, n. 47, p. 2–22, 2016.
- DE ALMEIDA FILHO, A. T. et al. Preference modeling experiments with surrogate weighting procedures for the PROMETHEE method. **European Journal of Operational Research**, v. 264, n. 2, p. 453–461, 2018.
- DENG, Y. et al. Analysis of Failures and Influence Factors of Critical Infrastructures: A Case of Metro. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, n. 1, p. 1–13, 2020.
- DOMÍNGUEZ, S.; CARNERO, M. C. Fuzzy Multicriteria Modelling of Decision Making in the Renewal of Healthcare Technologies. **Mathematics**, v. 8, n. 6, p. 944, 2020.

DURAN, O.; CAPALDO, A.; ACEVEDO, P. A. D. Lean maintenance applied to improve maintenance efficiency in thermoelectric power plants. **Energies**, 2017.

EBSERH. **Norma operacional de gestão de equipamentos médico-hospitalares** Brasília Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares, , 2018.

EDWARDS, W.; BARRON, F. H. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. **Organizational Behavior And Human Decision Processes**, v. 60, n. 3, p.306-325, 1994. <http://dx.doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>.

FENNIGKOH, L.; SMITH, B. **Clinical equipment management**. [s.l.] JCAHO PTSM, 1989.

FORTE, A. A. DOS S. **O Lean Manufacturing aplicado à tecnologia médico-hospitalar**. [s.l.] Universidade Federal do Amazonas, 2017.

FRASER, K. Facilities management: the strategic selection of a maintenance system. **Journal of Facilities Management**, v. 12, n. 1, p. 18–37, 2014.

GAAMANGWE, T. et al. Medical Device Risk Management For Performance Assurance Optimization and Prioritization. **Biomedical Instrumentation & Technology**, v. November, n. December, p. 446–451, 2015.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão**. Traduzido ed. São Paulo: Thomson, 2004.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Princípios e Métodos para Tomada de Decisão Enfoque Multicritério - Enfoque Multicritério**. 6a. ed. São Paulo: GEN: Atlas, 2019.

GOOSSENS, A. J. M.; BASTEN, R. J. I. Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process; An application for naval ships. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 142, n. 2015, p. 31–41, 2015.

HAMDI, N. et al. An intelligent healthcare management system: A new approach in work-order prioritization for medical equipment maintenance requests. **Journal of Medical Systems**, v. 36, n. 2, p. 557–567, 2012.

HERNÁNDEZ-LÓPEZ, L. A.; PIMENTEL-AGUILAR, A. B.; ORTIZ-POSADAS, M. R. An index to prioritize the preventive maintenance of medical equipment. **Health and Technology**, v. 10, p. 399–403, 2020.

HORENBEEK, A. VAN; PINTELON, L.; MUCHIRI, P. Maintenance optimization models and criteria. **International Journal of Systems Assurance Engineering and Management**, v. 1, n. 3, p. 189–200, 2010.

HOURIA, Z. BEN et al. Quantitative techniques for medical equipment maintenance management. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 10, n. 6, p. 1–30, 2017.

HUTAGALUNG, A. O.; HASIBUAN, S. Determining the Priority of Medical Equipment Maintenance with Analytical Hierarchy Process. **International Journal of Online and Biomedical Engineering**, v. 15, n. 10, p. 107–120, 2019.

HYMAN, W. The Theory and Practice of Preventive Maintenance. **Journal of Clinical Engineering**, v. 28, n. 1, p. 31–36, 2003.

JAMSHIDI, A. et al. **Medical devices inspection and maintenance; a literature review**. IIE

Annual Conference and Expo 2014. **Anais...2014**

JAMSHIDI, A. et al. A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices. **Applied Soft Computing Journal**, v. 32, p. 322–334, 2015.

JAWWAD, A. K. A.; SALEEM, M. Criticality Analysis of Medical Equipment: A Case Study at King Hussein Cancer Center (KHCC) Amman-Jordan. **International Journal of Online and Biomedical Engineering**, v. 15, n. 15, p. 18–38, 2019.

KARDEC, A. .; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. Segunda ed. Rio de Janeiro: QualityMark, 2001.

KUTOR, J. K.; AGEDE, P.; ALI, R. H. Maintenance Practice , Causes of Failure and Risk Assessment of Diagnostic Medical Equipment. **Journal of Biomedical Engineering and Medical Devices**, v. 2, n. 1, p. 1–3, 2017.

LERVOLINO, S. A.; PELICIONI, M. C. F. A utilização do grupo focal como metodologia qualitativa na promoção da saúde. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, v. 35, n. 2, p. 115–121, 2001.

LUCATELLI, M. V. **Proposta de aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em equipamentos médico-hospitalares**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

MAHFOUD, H.; ABDELLAH, E. B.; BIYAALI, A. EL. Dependability-Based Maintenance Optimization in Healthcare Domain. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 24, n. 2, p. 200–223, 2018a.

MAHFOUD, H.; ABDELLAH, E. B.; BIYAALI, A. EL. Dependability-based maintenance optimization in healthcare domain. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 24, n. 2, p. 200–223, 2018b.

MAHFOUD, H.; ABDELLAH EL, B.; AHMED EL, B. Medical maintenance performance monitoring : a roadmap to efficient improvement. **International Journal of Productivity and Quality Management**, v. 22, n. 1, p. 117–140, 2017.

MAHFOUD, H.; BARKANY, A. EL; BIYAALI, A. EL. Preventive Maintenance Optimization in Healthcare Domain: Status of Research and Perspective. **Journal of Quality and Reliability Engineering**, v. 2016, p. 1–10, 2016a.

MAHFOUD, H.; BARKANY, A. EL; BIYAALI, A. EL. A Hybrid Decision-Making Model for Maintenance Prioritization in Health Care Systems. **American Journal of Applied Sciences**, v. 13, n. 4, p. 439–450, 2016b.

MARHAUG, A. et al. Criticality analysis for maintenance purposes of platform supply vessels in remote areas. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 139, n. 3, p. 11–16, 2017.

MARLOW, D. R.; BEALE, D. J.; MASHFORD, J. S. Risk-based prioritization and its application to inspection of valves in the water sector. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 100, p. 67–74, 2012.

MASMOUDI, M. et al. Decision Support Procedure for Medical Equipment Maintenance Management. **Journal of Clinical Engineering**, v. 41, n. 1, p. 19–29, 2016.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Apresentação - Ebserh**. Disponível em:

<<http://portal.mec.gov.br/ebserh--empresa-brasileira-de-servicos-hospitalares>>. Acesso em:

10 jun. 2023.

MORAIS, D. C. et al. PROMETHEE-ROC model for assessing the readiness of technology for generating energy. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015.

MOSTAFA, S. et al. Lean thinking for a maintenance process. **Production & Manufacturing Research**, v. 3, n. 1, p. 236–272, 2015.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press Inc, 1997.

MUTIA, D. M.; MUKHONGO, L.; CHEMWENO, P. Review in Maintenance Strategies for Hemodialysis Machine in Healthcare Facilities. **Industrial Engineering**, v. 2, n. 1, p. 34–41, 2018.

NG, T. C. et al. A review on lean maintenance through various implementations of total productive maintenance models. **International Journal of Advanced and Applied Sciences**, v. 4, n. 9, p. 174–179, 2017.

PARAND, F. A.; TAVAKOLI-GOLPAYGANI, A.; REZVANI, F. Medical device risk assessment based on ordered weighted averaging aggregation operator. **Journal of Biomedical Physics and Engineering**, v. 11, n. 5, p. 621–628, 2021.

QIANG, T.; ZHU, B.; LI, L. **A study on Military Equipment Lean Maintenance**. 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. **Anais...**2011

RICE, W. P. A Gradient Risk Sampling Method For Performance Inspection and Preventive Maintenance. **Journal of Clinical Engineering**, v. 28, n. 1, p. 62–74, 2003.

RICE, W. P. Medical Device Risk Based Evaluation and Maintenance Using Fault Tree Analysis. **Biomedical Instrumentation & Technology**, v. 41, n. 1, p. 76–82, 2007.

RIDGWAY, M. Classifying medical devices according to their maintenance sensitivity: a practical, risk-based approach to PM program management. **Biomedical Instrumentation & Technology**, v. 35, n. 3, p. 167–176, 2001.

SAFARI, H. et al. Applying PROMETHEE Method based on Entropy Weight for Supplier Selection. **Business Management and Strategy**, v. 3, n. 1, p. 97–106, 2012.

SERROU, D.; KHLIE, K.; ABOUABDELLAH, A. **Improvement of the lean-maintenance by hospital logistics**. Colloquium in Information Science and Technology, CIST. **Anais...**2016

SEZDI, M. Two Different Maintenance Strategies in the Hospital Environment: Preventive Maintenance for Older Technology Devices and Predictive Maintenance for Newer High-Tech Devices. **Journal of Healthcare Engineering**, v. 2016, p. 1–16, 2016.

SHAMAYLEH, A.; AWAD, M.; ABDULLA, A. O. Criticality-based reliability-centered maintenance for healthcare. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 26, n. 2, p. 311–334, 2020.

TAGHIPOUR, S.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. Reliability Analysis of Maintenance Data for Complex Medical Devices. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 27, n. 1, p. 71–84, 2011a.

TAGHIPOUR, S.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. Prioritization of medical equipment

for maintenance decisions. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 9, p. 1666–1687, 2011b.

TAWFIK, B.; OUDA, B. K.; ABD EL SAMAD, Y. M. A fuzzy logic model for medical equipment risk classification. **Journal of Clinical Engineering**, v. 38, n. 4, p. 185–190, 2013.

VALA, S. et al. A risk-based maintenance approach for critical care medical devices: a case study application for a large hospital in a developing country. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 9, n. 5, p. 1217–1233, 2018.

WANG, B. Fennigkoh and Smith Model for Inclusion Criteria: 15-Year Retrospective. **Journal of Clinical Engineering**, v. 30, n. 1, p. 26–30, 2006.

WANG, B.; LEVENSON, A. Equipment Inclusion Criteria: A New Interpretation of JCAHO's Medical Equipment Management Standard. **Journal of Clinical Engineering**, v. 25, n. 1, p. 26–35, 2000.

WANG, B.; RICE, W. P. JCAHO's Equipment Inclusion Criteria Revisited — Application of Statistical Sampling Technique. **Journal of Clinical Engineering**, v. 28, n. 1, p. 37–48, 2003.

WANG, L.; CHU, J.; WU, J. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. **International Journal of Production Economics**, v. 107, n. 1, p. 151–163, 2007.

WEBSTER, JANE; WATSON, R. T. Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. **MIS Quarterly**, v. 2, p. xiii–xxiii, 2002.

WHO. Medical equipment maintenance programme overview. **WHO Library Cataloguing-in-Publication Data**, 2011.

WU, W. F.; LIN, S. R.; YOU, J. S. Risk-based inspection and maintenance in process plants and their practices in Taiwan. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, v. 39, n. 4, p. 392–403, 2016.

XIAO, Y.; WATSON, M. Guidance on Conducting a Systematic Literature Review. **Journal of Planning Education and Research**, v. 39, n. 1, p. 93–112, 2019.

YOUSSEF, N. F.; HYMAN, W. A. A medical device complexity model: A new approach to medical equipment management **Journal of Clinical Engineering**, 2009.

APÊNDICE A – ROTEIRO DE CONDUÇÃO DO GRUPO FOCAL

O grupo focal é uma metodologia qualitativa para guiar a discussão e interação entre os participantes, permitindo ao facilitador explorar tópicos específicos de interesse (LERVOLINO; PELICIONI, 2001). Nesta pesquisa, buscou-se selecionar os participantes de modo a criar um ambiente favorável à discussão de um modelo de priorização de manutenção de EMHs adequado à rede hospitalar estudada. Adiante, apresenta-se o roteiro utilizado para conduzir o grupo focal, na modalidade virtual, via *Microsoft Teams*.

Introdução (10 minutos):

- Dar as boas-vindas aos participantes e agradecer por aceitarem o convite;
- Apresentar brevemente o trabalho e a sua importância para a rede hospitalar;
- Esclarecer a seleção dos participantes e as expectativas sobre a interação do grupo.

Quebra-gelo (10 minutos):

- Propor a apresentação entre os participantes para que se conheçam e se sintam mais à vontade para compartilhar suas opiniões.

Discussão do modelo de priorização (30 minutos):

- Introduzir os conceitos relacionados ao modelo de priorização em discussão;
- Apresentar o questionário semiestruturado para avaliar a importância dos critérios para a rede hospitalar (Apêndice B);
- Realizar perguntas abertas sobre os critérios de priorização, de modo a permitir que os participantes compartilhem suas perspectivas;
- Encorajar o diálogo entre os participantes, incentivando-os a responderem uns aos outros e aprofundarem suas opiniões sobre os critérios de priorização;
- Manter a discussão focada na construção do modelo de priorização de manutenção para a rede hospitalar, evitando desvios irrelevantes.
- Encerrar a primeira rodada com o compromisso de devolver o questionário respondido em uma semana.

Discussão dos resultados obtidos (30 minutos):

- Recapitular os principais pontos discutidos na primeira reunião;

- Apresentar os resultados sobre os critérios de priorização do questionário;
- Explorar os diversos pontos de vistas e experiências sobre os resultados obtidos;
- Aprofundar a compreensão dos resultados do questionário.

Encerramento (10 minutos):

- Oferecer aos participantes a oportunidade de realizarem quaisquer observações finais que não tenham tido a chance de compartilhar anteriormente;
- Agradecer aos participantes por suas contribuições e participações;
- Explicar como as informações coletadas serão utilizadas e compartilhadas posteriormente.

Boas práticas:

- Estabelecer uma quantidade viável de participantes para a condução das discussões;
- Adaptar o roteiro conforme a dinâmica do grupo;
- Criar um ambiente aberto e respeitoso, onde todos se sintam à vontade para expressar suas opiniões;
- Deixar as discussões fluírem naturalmente, sem interrupções ou direcionamentos.

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO SEMIESTRUTURADO

Este questionário tem o objetivo de identificar o quanto cada critério de priorização de manutenção de EMHs identificado na literatura é aplicado à unidade de saúde entrevistada. Para tal, será utilizada a seguinte escala:

Variável linguística de adequação	Abreviação	Pontuação
Discorda totalmente	DT	1
Discorda	D	2
Indiferente	I	3
Concorda	C	4
Concorda totalmente	CT	5

DESCRIÇÃO DO EAS ESTUDADO

Dados do entrevistado

- ❖ Nome:
- ❖ Cargo:
- ❖ Tempo no cargo:

Caracterização do hospital

- ❖ Nome:
- ❖ Tempo de implantação da engenharia clínica:
- ❖ Número de colaboradores da engenharia clínica com os terceirizados

APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS NO EAS ESTUDADO

1. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Natureza do equipamento

Critério: **Função**

Definição: Propósito principal do equipamento. Por exemplo, suporte à vida, terapia, diagnóstico, análises, entre outras.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

2. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Natureza do equipamento

Critério: **Criticidade da missão**

Definição: O quanto o equipamento é crucial para garantir a eficiência do fluxo de atendimento do paciente (impacto operacional).

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

3. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Natureza do equipamento

Critério: **Criticidade de área**

Definição: Criticidade da área de funcionamento do equipamento para os pacientes. Por exemplo, urgência, unidade de terapia intensiva, área de diagnóstico, entre outras.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

4. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Requisitos de manutenção

Critério: **Frequência de manutenção requerida**

Definição: Frequência de manutenção indicada pelo fabricante ou pela experiência dos gestores de manutenção.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

5. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Requisitos de manutenção

Critério: **Calibração**

Definição: Necessidade de procedimentos de calibração indicados pelo fabricante do equipamento.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

6. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Requisitos de manutenção

Critério: **Recalls e alertas de perigo**

Definição: Número de alertas emitidos pelo fabricante ou pela agência sanitária para solucionar problemas de equipamentos que representam riscos à saúde.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

7. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Condição do equipamento

Critério: **Idade**

Definição: Tempo de vida útil do equipamento. Em geral, a expectativa de vida de um equipamento é de 10 anos.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

8. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Condição do equipamento

Critério: **Tempo remanescente de vida útil**

Definição: Relação da idade do equipamento com sua expectativa de vida.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

9. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Condição do equipamento

Critério: Obsolescência tecnológica

Definição: Falta de interconectividade ou incapacidade de se adaptar a novos padrões, como mudanças de *software* e *hardware*, que dificultam a atualização contínua de equipamentos.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

10. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Condição do equipamento

Critério: Disponibilidade de backup

Definição: Relação do número de equipamentos com a mesma função (redundância) com sua demanda por unidade de tempo.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

11. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Histórico do equipamento

Critério: Manutenções não realizadas

Definição: Procedimentos de manutenção que não foram realizados no prazo recomendado.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

12. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Histórico do equipamento

Critério: Tempo de inatividade

Definição: Tempo médio que um equipamento fica fora de uso por indisponibilidade.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

13. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Histórico do equipamento

Critério: **Frequência de falhas**

Definição: Frequência de ocorrência de falhas no equipamento.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

14. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Histórico do equipamento

Critério: **Repetitividade**

Definição: Frequência de ocorrência do mesmo tipo de falha no equipamento ou componente.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

15. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Histórico do equipamento

Critério: **Mean Time Between Failures (MTBF)**

Definição: Tempo médio entre a ocorrência de falhas. Indicador geralmente associado à confiabilidade do equipamento e utilizado como medida complementar para isso.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

16. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Histórico do equipamento

Critério: **Mean Time to Repair (MTTR)**

Definição: Tempo médio para reativar um determinado equipamento.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
---------------------	----------	-------------	----------	---------------------

Justificativa				

17. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Histórico do equipamento

Critério: **Confiabilidade**

Definição: Capacidade de um equipamento funcionar adequadamente durante um determinado período sob certas condições. Pode ser medida consultando os registros históricos do equipamento.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

18. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Manutenibilidade

Critério: **Complexidade técnica**

Definição: Nível de dificuldade em termos de manutenibilidade, reparo, instalação e operação.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

19. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Manutenibilidade

Critério: **Detectabilidade**

Definição: Capacidade de detectar a falha antes que ela ocorra.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

20. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Manutenibilidade

Critério: **Reprodutibilidade**

Definição: Capacidade de verificar o equipamento após à manutenção e antes de entregá-lo ao operador.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

21. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento

Categoria: Manutenibilidade

Critério: **Sensibilidade à manutenção**

Definição: Resposta do equipamento diante dos procedimentos de manutenção preventiva.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

22. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Usuário

Categoria: Impacto no usuário (operador do equipamento)

Critério: **Complexidade de uso**

Definição: Nível de dificuldade em operar o equipamento abrangendo requisitos de entrada de dados, configuração e usabilidade geral do equipamento.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

23. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Paciente

Categoria: Impacto no paciente

Critério: **Impacto na capacidade de atendimento**

Definição: Impacto operacional causado pela quebra ou funcionamento inadequado do equipamento, expresso em termos de redução de capacidade. É importante considerar o número de pacientes que terão que esperar enquanto o dispositivo está inativo.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

24. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Paciente

Categoria: Impacto no paciente

Critério: **Qualidade do tratamento**

Definição: Efeito da quebra ou funcionamento inadequado do equipamento no tratamento do paciente.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

25. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento, usuário e paciente

Categoria: Consequência da falha

Critério: **Risco para o paciente**

Definição: Consequência da falha do equipamento na segurança do paciente.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

26. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento, usuário e paciente

Categoria: Consequência da falha

Critério: **Risco para o usuário**

Definição: Consequência da falha do equipamento na segurança do operador.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

27. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento, usuário e paciente

Categoria: Consequência da falha

Critério: **Risco para o ambiente**

Definição: Consequência da falha do equipamento para o ambiente onde o mesmo está instalado.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

28. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento, usuário e paciente

Categoria: Custos

Critério: **Custo de manutenção**

Definição: Total dos custos com mão-de-obra, partes e peças necessárias aos procedimentos de manutenção do equipamento.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

29. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento, usuário e paciente

Categoria: Custos

Critério: **Custo associado à demora no tratamento**

Definição: Impacto financeiro causado pela indisponibilidade do equipamento (lucro cessante).

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

30. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Equipamento, usuário e paciente

Categoria: Custos

Critério: **Custo do equipamento**

Definição: Custo associado à aquisição de um equipamento novo.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

31. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Pessoal de manutenção

Categoria: Equipe técnica

Critério: **Carga de trabalho**

Definição: Quantidade de horas trabalhadas na execução das manutenções preventivas.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

32. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Pessoal de manutenção

Categoria: Equipe técnica

Critério: **Rapidez de resposta**

Definição: Tempo de resposta da equipe técnica quando ocorre uma falha.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

33. Como você avalia o nível de aplicação do critério ao seu hospital?

Perspectiva: Pessoal de manutenção

Categoria: Equipe técnica

Critério: **Grau de aceitação do mantenedor**

Definição: Grau de satisfação e confiança da equipe de manutenção em relação ao diagnóstico e às ações corretivas adotadas.

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

34. Existe algum outro critério além dos mencionados que é considerado no seu estabelecimento de saúde? Se sim, qual? Qual o seu nível de aplicação?

Discorda Totalmente	Discorda	Indiferente	Concorda	Concorda Totalmente
Justificativa				

APÊNDICE C – LISTA DAS ALTERNATIVAS DO MODELO PROPOSTO

CÓDIGO	EQUIPAMENTOS
ALT1	Aparelho Anestesia
ALT2	Aquecedor Paciente
ALT3	Aspirador Cirúrgico
ALT4	Aspirador Fumaça
ALT5	Autoclave Horizontal
ALT6	Balança Adulto
ALT7	Balança Infantil
ALT8	Berço Aquecido
ALT9	Bisturi Eletrônico
ALT10	Bomba Seringa
ALT11	Bomba Infusão
ALT12	Cadeira Exame
ALT13	Cama Elétrica
ALT14	Câmera Vdl
ALT15	Cardioversor
ALT16	Digitalizador Vdl
ALT17	Esfigmomanômetro
ALT18	Monitor Neuromuscular
ALT19	Facoemulsificador
ALT20	Foco Cirúrgico
ALT21	Foco Clínico
ALT22	Fonte Luz Vdl
ALT23	Guindaste Paciente
ALT24	Incubadora Biológica
ALT25	Incubadora Transporte
ALT26	Insuflador Vdl
ALT27	Laser Oftalmológico
ALT28	Lavadora Ultrassônica
ALT29	Termohigrômetro
ALT30	Mesa Cirúrgica
ALT31	Microscópio Cirúrgico
ALT32	Mod Neuromuscular
ALT33	Mod Co2 Exalado
ALT34	Monitor Ecg
ALT35	Monitor Bis
ALT36	Monitor Multiparamétrico
ALT37	Monitor Vdl
ALT38	<i>Nobreak</i>
ALT39	Processadora Vdl
ALT40	Secadora Instrumental
ALT41	Seladora Cirúrgica

CÓDIGO	EQUIPAMENTOS
ALT42	Serra Óssea
ALT43	Termodesinfectora
ALT44	Ultrassom Geral
ALT45	Ultrassom Portátil
ALT46	Esterilizador Plasma
ALT47	Ventilador Pulmonar
ALT48	Vídeo Laringoscópio

APÊNDICE D – PLANILHA EXCEL DO SISTEMA PREENCHIDA

Criteria:	Função	Manutenção Reque- rida	Calibração	Criticidade da Missão	Criticidade da Área	Risco Físico
Criterion type (FITradeoff)/Preference Direc- tion (PROMETHEE)	1	1	1	1	1	1

FITradeoff: Number of levels of discrete cri- teria						
Alternatives:	Consequence Matrix:					
APARELHO ANESTESIA	10	3	1	3	5	5
AQUECEDOR PACIENTE	2	1	0	1	5	3
ASPIRADOR CIRURGICO	9	2	1	2	5	4
ASPIRADOR FUMACA	2	1	0	1	5	1
AUTOCLAVE HORIZONTAL	9	3	1	3	5	5
BALANCA ADULTO	6	1	1	1	4	3
BALANCA INFANTIL	6	1	1	1	4	3
BERCO AQUECIDO	8	2	1	3	5	5
BISTURI ELETRONICO	9	2	1	3	5	4
BOMBA SERINGA	9	2	1	3	4	5
BOMBA INFUSAO	9	2	1	3	4	5
CADEIRA EXAME	2	1	0	2	4	1
CAMA ELETRICA	2	1	0	2	4	1
CAMERA VDL	9	1	0	3	5	1
CARDIOVERSOR	10	2	1	3	5	5
DIGITALIZADOR VDL	2	1	0	3	5	1
ESFIGMOMANOMETRO	6	2	1	2	5	1
MONITOR NEUROMUSCULAR	7	2	1	2	5	3
FACOEMULSIFICADOR	9	3	1	3	5	4

FOCO CIRURGICO	9	1	0	3	5	1
FOCO CLÍNICO	2	1	0	1	4	1
FONTE LUZ VDL	9	3	0	3	5	4
GUINDASTE PACIENTE	2	1	0	1	4	1
INCUBADORA BIOLÓGICA	5	2	1	3	5	5
INCUBADORA TRANSPORTE	10	3	1	3	5	5
INSUFLADOR VDL	9	2	1	3	5	4
LASER OFTALMOLOGICO	9	2	1	3	5	4
LAVADORA ULTRASSÔNICA	9	2	1	3	5	5
TERMOHIGROMETRO	1	2	1	3	5	1
MESA CIRURGICA	9	1	0	3	5	1
MICROSCOPIO CIRURGICO	9	1	0	3	5	1
MOD NEUROMUSCULAR	7	2	1	2	5	3
MOD CO2 EXALADO	7	2	1	3	5	3
MONITOR ECG	7	2	1	3	5	3
MONITOR BIS	7	2	1	2	5	3
MONITOR MULTIPARAMETRICO	7	2	1	3	4	3
MONITOR VDL	6	1	0	3	5	1
NOBREAK	2	3	0	1	5	1
PROCESSADORA VDL	9	1	0	3	5	1
SECADORA INSTRUMENTAL	9	2	0	2	5	1
SELADORA CIRURGICA	9	2	1	3	5	5
SERRA OSSEA	9	1	0	3	5	4
TERMODESINFECTORA	9	3	1	3	5	5
ULTRASSOM GERAL	6	1	0	2	5	3
ULTRASSOM PORTATIL	6	1	0	2	5	3
ESTERILIZADOR PLASMA	9	3	1	3	5	5
VENTILADOR PULOMNAR	10	3	1	3	4	5
VIDEO LARINGOSCOPIO	9	1	0	2	5	2