



INSTITUTO POLITÉCNICO DE LISBOA



Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa

Sistema de apoio à decisão em manutenção de equipamentos hospitalares

Rita Catarina Fernandes Brito
(Licenciada em Tecnologia Biomédica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientador:

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

Júri:

Presidente: Doutora Cecília Ribeiro da Cruz Calado

Vogais: Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

Doutor Manuel José de Matos

Maio de 2025

Sistema de apoio à decisão em manutenção de equipamentos hospitalares

Rita Catarina Fernandes Brito
(Licenciada em Tecnologia Biomédica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientador:

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues (ISEL)

Júri:

Presidente: Doutora Cecília Ribeiro da Cruz Calado (ISEL)

Vogais: Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues (ISEL)

Doutor Manuel José de Matos (ISEL)

Maio de 2025

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi possível graças ao contributo de várias pessoas, às quais quero expressar o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, irmão, cunhada e falecida avó materna, por serem o meu maior apoio ao longo de todo o meu percurso académico. Nos momentos de dúvida e cansaço, o vosso carinho e incentivo foram fundamentais para que eu nunca perdesse o foco.

Agradeço também ao meu namorado Francisco pela paciência, compreensão e confiança que sempre me demonstrou especialmente nas fases mais desafiantes deste percurso.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa por me proporcionar a possibilidade de conhecer e aprender com profissionais de excelência.

Gostaria ainda de agradecer ao Instituto de Medicina Molecular, especialmente à Engenheira Sara Santos, por toda a ajuda prestada durante o meu estágio.

Gostaria de deixar um agradecimento aos meus amigos por todo o apoio, amizade e ajuda ao longo deste percurso.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada palavra de incentivo, cada gesto de ajuda, foi importante para a sua concretização.

Resumo

A manutenção eficiente de equipamentos é crucial para garantir a continuidade, fiabilidade e segurança das operações em ambientes hospitalares e laboratoriais. Em instituições de investigação biomédica, como o Instituto de Medicina Molecular, a gestão adequada de equipamentos, nomeadamente ultracongeladores -80°C, é determinante para proteger amostras biológicas críticas. Este trabalho apresenta três casos de estudo que exemplificam diferentes abordagens e metodologias aplicadas à gestão de manutenção dos equipamentos no IMM.

No caso de estudo I, a aplicação da metodologia FMEA a um ultracongelador -80 °C permitiu identificar o compressor como o componente mais crítico, com um Número de Prioridade de Risco (RPN) de 60, associado à falha por corte de energia ou baixa tensão. Outras falhas relevantes incluíram o entupimento do tubo capilar (RPN = 60) e o sobreaquecimento do condensador (RPN = 48). Estes dados possibilitaram a definição de prioridades de intervenção e a implementação de medidas preventivas específicas.

No caso de estudo II, o método AHP foi utilizado para apoiar a seleção de um software de monitorização remota, considerando sete critérios essenciais. Entre esses critérios, os mais determinantes para a decisão foram a transmissão de dados por GSM (30,57%) e os alarmes por SMS (30,57%), que apresentaram os maiores pesos relativos na avaliação. A análise comparativa entre as duas empresas fornecedoras revelou que a Empresa A destacou-se em termos de desempenho nos critérios mais críticos, levando à sua seleção como a melhor opção para a implementação do software de monitorização remota.

No caso de estudo III, foram analisados três indicadores-chave de desempenho (KPIs) referentes à gestão da manutenção dos equipamentos no IMM em 2023. Os KPIs selecionados focaram nos equipamentos com maior número de manutenções corretivas, as causas dos atrasos nas reparações e os fornecedores responsáveis pelo maior número de manutenções corretivas. A análise revelou que os equipamentos, como as câmaras de biossegurança classe 2 e os ultracongeladores, exigem maior atenção devido a três fatores (quantidade, utilização e idade). Além disso, a principal causa para os atrasos nas reparações foi o prazo de entrega das peças.

Conclui-se que a aplicação integrada das metodologias FMEA e AHP, aliada à digitalização dos processos de manutenção com recurso a um CMMS, constitui uma abordagem eficaz para aumentar a fiabilidade dos equipamentos, melhorar a tomada de decisão e otimizar os recursos operacionais no contexto da investigação biomédica.

Palavras-chave: AHP; Apoio à decisão; FMEA; Fiabilidade; Manutenção de equipamentos; Monitorização Remota; Software de Gestão da Manutenção.

Abstract

Efficient equipment maintenance is crucial to ensuring the continuity, reliability and safety of operations in hospital and laboratory environments. In biomedical research institutions, such as the Institute of Molecular Medicine, proper management of equipment, namely -80°C ultra-freezers, is crucial to protecting critical biological samples. This document presents three case studies that exemplify different approaches and methodologies applied to equipment maintenance management at IMM.

In case study I, the application of the FMEA methodology to a -80°C ultra-freezer allowed the compressor to be identified as the most critical component, with a Risk Priority Number (RPN) of 60, associated with failure due to power cut or low voltage. Other relevant failures included capillary tube clogging (RPN = 60) and condenser overheating (RPN = 48). These data made it possible to define intervention priorities and implement specific preventive measures.

In case study II, the AHP method was used to support the selection of remote monitoring software, considering seven essential criteria. Among these criteria, the most decisive for the decision were data transmission via GSM (30.57%) and alarms via SMS (30.57%), which had the highest relative weights in the evaluation. The comparative analysis between the two supplier companies revealed that company A stood out in terms of performance in the most critical criteria, leading to its selection as the best option for implementing the remote monitoring software.

In case study III, three key performance indicators (KPIs) related to equipment maintenance management at IMM in 2023 were analyzed. The selected KPIs focused on the equipment with the highest number of corrective maintenance, the causes of delays in repairs and the suppliers responsible for the highest number of corrective maintenance. The analysis revealed that equipment, such as biological safety cabinet class II and ultra-freezers, require greater attention due to three factors (quantity, use and age). Furthermore, the main cause of delays in repairs was the delivery time of the parts.

It is concluded that the integrated application of FMEA and AHP methodologies, combined with the digitalization of maintenance processes using a CMMS, constitutes an effective approach to increase equipment reliability, improve decision-making and optimize operational resources in the context of biomedical research.

Keywords: AHP, Decision Support, FMEA, Reliability, Equipment Maintenance, Remote Monitoring, Maintenance Management Software.

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xiv
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Estrutura do documento	2
1.3. Entidade de acolhimento	2
1.3.1. Instituto de Medicina Molecular João Lobo Antunes	3
1.3.1.1. Departamento <i>Safety & Compliance</i>	3
Capítulo 2 – Fundamentação teórica	5
2.1. Ciclo de vida de um equipamento médico	5
2.2. Manutenção de equipamentos	6
2.3. Tipos de Manutenção	7
2.4. Análise do Modo e Efeitos de Falha (<i>Failure Mode and Effects Analysis – FMEA</i>)	8
2.5. Processo Analítico Hierárquico (<i>Analytic Hierarchy Process – AHP</i>)	10
2.6. Gestão da Manutenção	14
2.6.1. Evolução da Gestão da Manutenção	14
2.6.2. Critérios de seleção de um <i>Software</i> de Gestão da Manutenção	15
Capítulo 3 – Caso de estudo I: Aplicação FMEA ao Ultracongelador -80°C	17
3.1. Material – Ultracongelador -80°C	17
3.2. Método – FMEA	18
Capítulo 4 – Caso de estudo II: Seleção de <i>Software</i> de Monitorização Remota com AHP	25
4.1. Material – Equipamentos e salas críticas	25
4.2. Método – AHP	30
Capítulo 5 – Caso de estudo III: Implementação de <i>Software</i> de Gestão da Manutenção	36
5.1. Critérios de seleção considerados	36
5.2. Implementação do <i>Software</i> de Gestão da Manutenção	37
5.2.1. Estrutura Hierárquica de Organização	37
5.2.2. Dados (Equipamentos, Recursos Humanos e Terceiros)	38
5.2.3. Ordens de trabalho	41
5.2.4. Catálogo de Avarias (Tipo, Causa e Método de Detecção)	43
5.2.5. Planos de Manutenção	45
5.2.6. Contratos de Manutenção	47
5.3. Procedimento Operacional Padrão (<i>Standard Operating Procedures - SOP</i>)	47

Capítulo 6 – Resultados e Discussão	48
6.1. Caso de estudo I	48
6.2. Caso de estudo II	51
6.3. Caso de estudo III	55
Capítulo 7 – Conclusões e Perspetivas Futuras	59
Capítulo 8 – Referências Bibliográficas	62
Anexos	65
A.1 – Princípio de refrigeração do ultracongelador -80°C em estudo.	65

Índice de Figuras

Figura 1 - Instituto de Medicina Molecular.....	3
Figura 2 - Organograma do iMM.	4
Figura 3 - Representação esquemática da equipa do Safety & Compliance.	4
Figura 4 - Ciclo de vida de um equipamento médico.	6
Figura 5 - Tipos de Manutenção, Anexo A da (NP EN 13306, 2021).	7
Figura 6 - Procedimento sequencial da análise FMEA (Balaraju, Raj, & Murthy, 2019).	10
Figura 7 - Esquema de decisão hierárquico genérico. Adaptado de (Colin, 2007, p. 443).	12
Figura 8 - Localização dos componentes do ultracongelador -80°C.	19
Figura 9 - Ilustração do piso -1.	26
Figura 10 - Ilustração do piso 0.	26
Figura 11 - Sala P0-A-24.	27
Figura 12 - Sala P0-A-13.	27
Figura 13 - Sala P0-A-20.	28
Figura 14 - Ilustração do piso 1.	28
Figura 15 - Ilustração do piso 2.	29
Figura 16 - Ilustração do piso 3.	29
Figura 17 - Fluxo de comunicação da Empresa A.	32
Figura 18 - Fluxo de comunicação da Empresa B.	32
Figura 19 - Identificação do número de dispositivos necessários na sala P0-A-24 para a Empresa A.	33
Figura 20 - Identificação do número de dispositivos necessários na sala P0-A-13 para a Empresa A.	33
Figura 21 - Identificação do número de dispositivos necessários na sala P0-A-21 para a Empresa A.	34
Figura 22 - Processo de análise AHP.	35
Figura 23 - Ilustração da organização hierárquica dos ativos.	38
Figura 24 - Ficha técnica de um equipamento, mais especificamente uma centrífuga.	40
Figura 25 - Exemplo de uma OT no software Fractal One.	42
Figura 26 - Exemplo do fluxo das Ots e a ilustração de uma OT concluída do software Fractal One.	43
Figura 27 - Plano de manutenção para o tipo de equipamentos PCR.	45
Figura 28 - Checklist das tarefas do plano de manutenção preventiva mensal do tipo de equipamento PCR.	46
Figura 29 - Manutenções corretivas por Tipo e Classificação 1.	56
Figura 30 - Causas para demora das reparações.	57
Figura 31 - Fornecedor com maior número de reparações.	58
Figura 32 - Representação esquemática do circuito de refrigeração do equipamento em estudo (Panasonic Healthcare, n.d.).	66

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Referencial de preferências de Saaty. Adaptado de (Saaty, 1987).	11
Tabela 2 - Valores do IR para diferentes números de critérios das matrizes.	14
Tabela 3 - FMEA aplicada ao ultracongelador -80°C.	20
Tabela 4 - Tabela de Probabilidade de Ocorrência (Sobral et al., 2017).	23
Tabela 5 - Tabela de Severidade das Consequências (Sobral et al., 2017).	23
Tabela 6 - Tabela de Detetabilidade (Sobral et al., 2017).	24
Tabela 7 - Listagem do número total de equipamentos e salas.	25
Tabela 8 - Número total de dispositivos necessários por piso para Empresa A.	34
Tabela 9 - Número total de recetores necessários para a Empresa B.	34
Tabela 10 - Tabela de correspondência de informações.	39
Tabela 11 - Exemplos de Tipo, Classificação 1 e Classificação 2 da ficha de um equipamento criados.	40
Tabela 12 - Elementos de informação da ordem de trabalho, adaptado de (NP EN 13460, 2009).	41
Tabela 13 - Lista dos tipos de avaria.	44
Tabela 14 - Lista das causas.	44
Tabela 15 - Lista dos modos de deteção.	45
Tabela 16 - Classificação do nível do Risco por RPN.	48
Tabela 17 - Modos de falha e causas com risco crítico.	48
Tabela 18 - Modos de falha e causas com risco médio.	49
Tabela 19 - Modos de falha e causas com risco baixo.	50
Tabela 20 - Critérios e suas respectivas siglas.	51
Tabela 21 - Matriz de julgamentos (Matriz A).	51
Tabela 22 - Tabela da matriz A normalizada.	52
Tabela 23 - Vetor de Prioridades dos critérios.	52
Tabela 24 - Matriz do critério C ₁ .	54
Tabela 25 - Matriz do critério C ₂ , C ₄ e C ₅ .	54
Tabela 26 - Matriz do critério C ₃ .	54
Tabela 27 - Matriz do critério C ₆ .	54
Tabela 28 - Matriz do critério C ₇ .	55
Tabela 29 - Peso de cada critério em relação a cada alternativa.	55

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

AHP *Analytic Hierarchy Process* (Processo Analítico Hierárquico)

API *Application Programming Interface*

CMMS *Computerized Maintenance Management System* (Sistemas Computadorizados de Gestão da Manutenção)

FMEA *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise do Modo e Efeitos de Falha)

GSM *Global System for Mobile Communications* (Sistema Global para Comunicações Móveis)

HFC Hidrofluorcarbonetos

iMM Instituto de Medicina Molecular

ISEL Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

KPIs *Key Performance Indicators* (Indicadores-chave de desempenho)

LCD *Liquid Crystal Display* (Display de cristal líquido)

MEB Mestrado em Engenharia Biomédica

MTBF *Mean time between failures* (tempo médio entre falhas)

MTTR *Mean time to repair* (tempo médio de reparação)

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

OT Ordem de trabalho

PCR *Polymerase chain reaction*

RPN *Risk Priority Number* (Número de prioridade de risco)

S&C *Safety and Compliance*

SOP *Standard Operating Procedure* (Procedimento Operacional Normalizado)

SMS *Short Message Service* (Serviço de mensagens curtas)

UPS *Uninterruptible Power Supply* (Fonte de alimentação ininterrupta)

USB *Universal Serial Bus* (Porta serial universal)

Capítulo 1 – Introdução

O principal objetivo dos prestadores de cuidados de saúde é fornecer as melhores práticas e serviços aos seus pacientes, utilizando equipamentos médicos concebidos para fins de diagnóstico e tratamento de doenças. Deste modo, o equipamento médico é um elemento crucial na função do profissional de saúde, onde auxilia na deteção, medição e restauração da estrutura e função normal dos órgãos do corpo. O não desempenho desta função resultará em possíveis eventos de risco de vida, devido a diagnósticos incorretos ou falha na prestação de tratamento, e poderá gerar insatisfação por parte dos utentes caso o equipamento não esteja disponível (Shamayleh et al., 2019).

Para prestar serviços de saúde atempados e de qualidade, é de grande importância implementar um programa adequado de gestão de ativos e manutenção que garanta a correta funcionalidade dos equipamentos e tecnologias. Estes são frequentemente adquiridos com elevados investimentos e a sua fiabilidade afeta diretamente os resultados clínicos e a segurança dos utilizadores. A manutenção adequada melhora a disponibilidade e o tempo de vida útil dos equipamentos, além de minimizar riscos operacionais (Shamayleh et al., 2019).

No contexto específico do Instituto de Medicina Molecular (iMM), onde se desenvolve investigação científica de elevada complexidade técnica, a gestão eficiente de equipamentos laboratoriais é essencial. A existência de equipamentos críticos, como ultracongeladores, exige práticas estruturadas que permitam antecipar falhas, garantir a rastreabilidade das operações e apoiar a tomada de decisão com base em dados. Este trabalho propõe-se a estudar e aplicar metodologias que contribuam para otimizar a manutenção de equipamentos no iMM, respondendo à seguinte pergunta:

Como pode a aplicação das metodologias FMEA e AHP, aliada à implementação de um software de gestão da manutenção, contribuir para otimizar a manutenção de equipamentos no Instituto de Medicina Molecular ?

A relevância deste estudo decorre da necessidade crescente de integrar estratégias de manutenção mais rigorosas, apoiadas em ferramentas analíticas e digitais, que assegurem a continuidade dos processos laboratoriais e o cumprimento das exigências normativas. Ao aplicar metodologias como a Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA) e o Processo Analítico Hierárquico (AHP), pretende-se não só identificar e priorizar riscos operacionais, mas também fundamentar a seleção de soluções tecnológicas adequadas às necessidades da instituição.

1.1. Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são:

- Aplicar o método FMEA a um ultracongelador (-80°C), considerado um equipamento crítico no IMM, de modo a identificar e mitigar potenciais falhas, garantindo maior fiabilidade e segurança na preservação de amostras biológicas;
- Análise da aquisição do melhor *software* de monitorização remota para o IMM com recurso ao método AHP;
- Demonstrar as vantagens da utilização de um *software* de gestão da manutenção, explorando como este pode otimizar o planeamento de intervenções melhorando a eficiência da manutenção.

1.2. Estrutura do documento

O presente documento encontra-se dividido em oito capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução: contextualiza o problema, define os objetivos e apresenta a entidade de acolhimento.
- Capítulo 2 - Fundamentação teórica: aborda conceitos relacionados com a gestão e manutenção de equipamentos e refere as duas metodologias aplicadas, FMEA e AHP.
- Capítulos 3 a 5 - Casos de Estudo: identificam o material de estudo e a metodologia aplicada. No primeiro caso de estudo é aplicado o método FMEA a um ultracongelador. No segundo caso de estudo é utilizado o método AHP para selecionar um *software* de monitorização remota adequado às necessidades do IMM. Por fim, no último caso de estudo descreve as etapas da implementação de um *software* de manutenção.
- Capítulo 6 - Resultados e Discussão: apresenta e analisa os resultados obtidos dos três casos de estudo.
- Capítulo 7 - Conclusões e Perspetivas Futuras: sintetiza as principais conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.
- Capítulo 8 - Referências Bibliográficas e anexos.

1.3. Entidade de acolhimento

No âmbito do Mestrado em Engenharia Biomédica (MEB) do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) foi realizado um estágio de treze meses no departamento *Safety and Compliance* (S&C) do Instituto de Medicina Molecular.

1.3.1. Instituto de Medicina Molecular João Lobo Antunes

Em 2002 foi fundado o Instituto de Medicina Molecular João Lobo Antunes, figura 1, que se consolidou como um dos principais institutos biomédicos competitivos a nível nacional e internacional, sendo um instituto de investigação privado português sem fins lucrativos. Este instituto fornece um ambiente científico vibrante, com o objetivo de alimentar ideias inovadoras em investigação biomédica básica, clínica e translacional (Mota, 2023a). A par disto, apoia a formação científica pós-graduada de jovens licenciados, médicos e outros profissionais de saúde. Adicionalmente, apoia a divulgação científica e a prestação de serviços no estrangeiro nas áreas do diagnóstico especializado, controlo de qualidade e colaboração em comissões nacionais e internacionais relacionadas com a saúde. O objetivo do IMM consiste na preparação do caminho para uma ciência cada vez mais inovadora, de forma a melhorar a vida humana por meio da excelência em pesquisa biomédica (Mota, 2023b).



Figura 1 - Instituto de Medicina Molecular.

1.3.1.1. Departamento Safety & Compliance

Sucintamente o IMM está organizado tal como representado na figura 2. As Facilites são unidades de apoio especializadas, tais como *Analytical and Structural Biochemistry*, *Biobank*, *Bioimaging*, *Comparative Pathology*, *Flow Cytometry*, *Rodents* e *Zebrafish*. Estas unidades fornecem tecnologia de ponta e suporte técnico para os investigadores, facilitando a realização de projetos de pesquisa de alta qualidade. Em relação aos laboratórios existem pelo menos trinta grupos de investigação com os mais variados temas desde *Neurosciences*, *Host-pathogen interactions*, *Gene regulation*, *Cell and developmental biology* e *Immunity and*

inflammation. O *Finance and Operations Office* compreende cinco departamentos, nomeadamente *Project Management*, *Legal and Human Resources*, *Accounting*, *Purchases and Procurement* e *Safety & Compliance*, sendo este último departamento onde o meu estágio se inseriu.

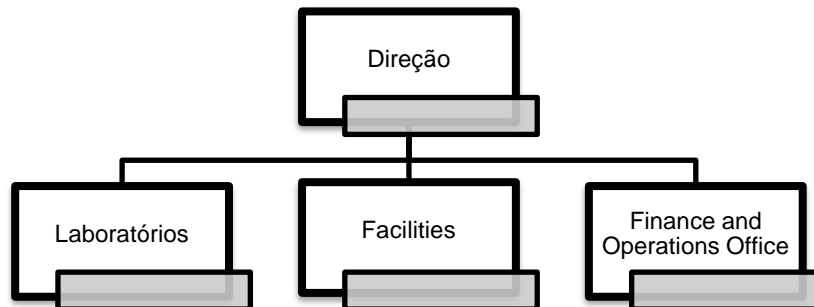


Figura 2 - Organograma do IMM.

A missão do *Safety & Compliance* é garantir que todos os requisitos de infraestrutura, equipamentos e materiais para uma pesquisa de alta qualidade sejam atendidos, trabalhando em um ambiente seguro e saudável, minimizando o risco de lesões ou doenças profissionais. A equipa que constitui este departamento, figura 3, é formada por dez elementos, nomeadamente Sara Santos, Cláudia Costa, Francisca Lemos, Hugo Silva, Bruno Martins, Monique Madureira, Naira Correia, Paulo Ferreira, Bashir Alibhai e eu. Este departamento atua em áreas como o cumprimento das obrigações legais de segurança; prevenção, formação e avaliação de riscos em matéria de saúde e segurança no trabalho; projeto e remodelação de laboratórios; gestão do ciclo de vida dos equipamentos (instalação, manutenção, reparação, validações) e limpeza e esterilização de material/ soluções de laboratório.

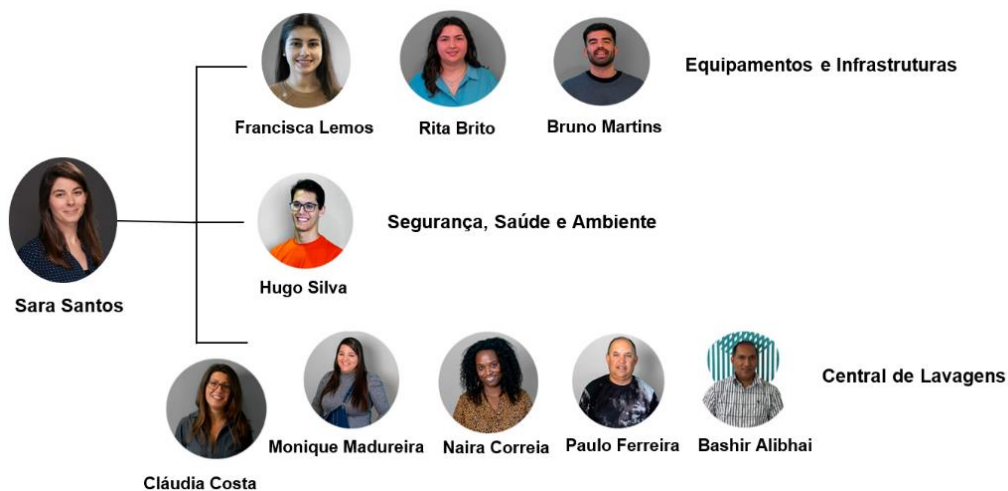


Figura 3 - Representação esquemática da equipa do Safety & Compliance.

Capítulo 2 – Fundamentação teórica

2.1. Ciclo de vida de um equipamento médico

O ciclo de vida de um equipamento ou dispositivo médico abrange todas as suas etapas, desde a concepção até à desativação (figura 4). Este ciclo é composto por várias fases (World Health Organization, 2003):

1. **Concepção e desenvolvimento:** nesta fase, são realizadas pesquisas e análises de risco para garantir que o dispositivo cumpra os requisitos de segurança e eficácia. A validação e os ensaios clínicos são cruciais para assegurar que o dispositivo tenha o correto funcionamento.
2. **Fabrico:** os dispositivos são produzidos de acordo com normas de qualidade rigorosas. A gestão da qualidade durante esta fase é essencial para evitar falhas que possam comprometer a segurança do paciente.
3. **Utilização:** refere-se ao uso real do dispositivo em ambientes clínicos. A formação adequada dos profissionais de saúde é fundamental para garantir que os dispositivos são utilizados corretamente.
4. **Manutenção:** envolve a realização de atividades de manutenção programadas e corretivas para garantir que os dispositivos funcionem de maneira segura e eficaz ao longo da sua vida útil.
5. **Desativação e descarte:** quando um dispositivo atinge o fim da sua vida útil, é necessário seguir os procedimentos adequados para a sua desativação e descarte, garantindo que não causem danos ao meio ambiente ou à saúde pública.

A gestão eficaz do ciclo de vida é essencial para maximizar a segurança e a eficácia dos dispositivos médicos, minimizando os riscos associados, mas também contribui para a sustentabilidade destes dispositivos. A análise contínua do ciclo de vida permite identificar oportunidades de melhoria e inovação, assegurando que os dispositivos atendam às necessidades dos profissionais de saúde e dos pacientes.



Figura 4 - Ciclo de vida de um equipamento médico.

2.2. Manutenção de equipamentos

A manutenção desempenha um papel essencial, sendo a sua principal função assegurar o funcionamento contínuo e eficiente dos equipamentos. Além disso, exerce um papel secundário crucial, que é a reparação de falhas, garantindo a fiabilidade e a longevidade dos equipamentos.

De acordo com [Alsyouf \(2007\)](#), uma política de manutenção eficaz pode influenciar a produtividade e a lucratividade de um processo de fabricação. Os principais resultados do estudo realizado em uma fábrica de papel sueca mostraram que uma máquina de fábrica de papel poderia, idealmente, gerar lucro extra de pelo menos 7,8 milhões de coroas suecas (SEK) (aproximadamente US\$ 0,975 milhões) por ano, ou seja, 12,5% do orçamento anual de manutenção, caso todas as paragens não planeadas e produção de baixa qualidade associadas à manutenção fossem eliminadas. Assim, a manutenção não é um centro de custo, mas uma função geradora de lucro.

2.3. Tipos de Manutenção

Existem diferentes abordagens para organizar a manutenção. Na figura 5 está representado a organização da manutenção segundo a norma **NP EN 13306 (2021)** que define a manutenção como a “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele possa desempenhar a função requerida”.

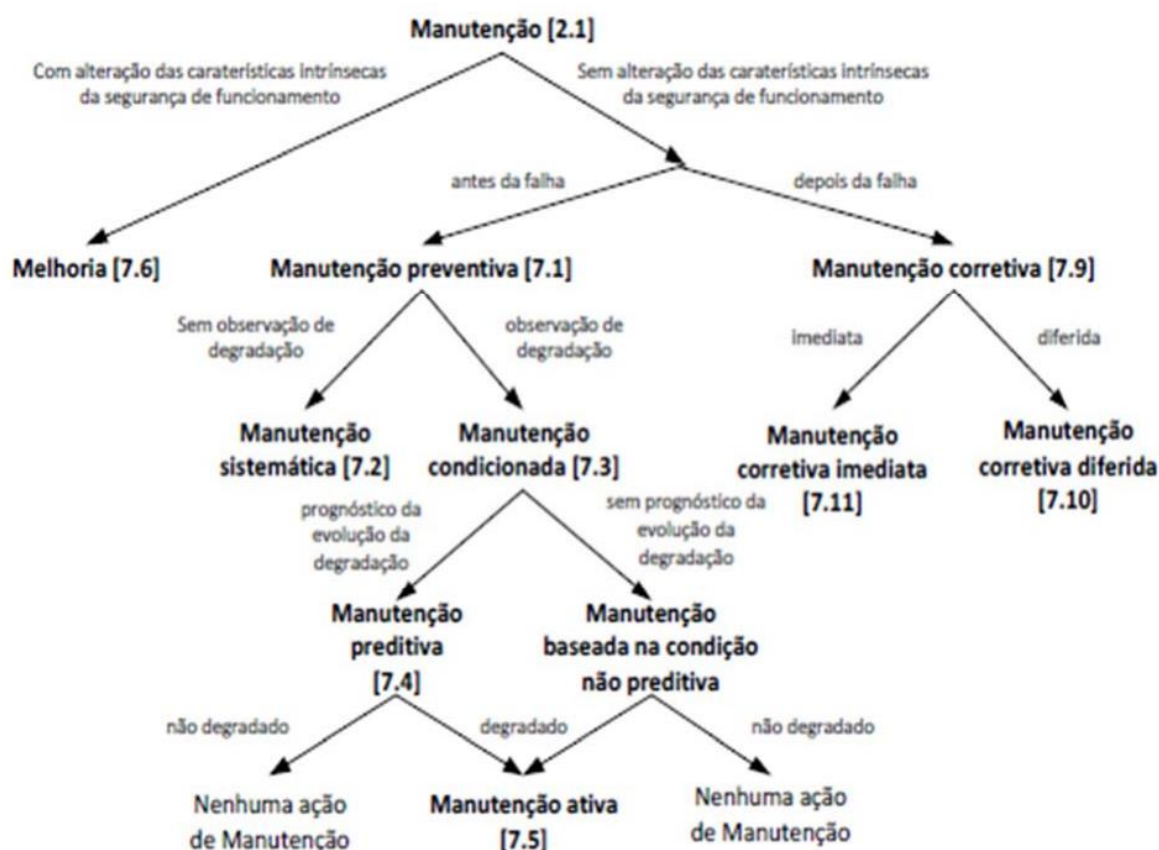


Figura 5 - Tipos de Manutenção, Anexo A da (NP EN 13306, 2021).

Se as ações forem executadas antes da ocorrência de uma falha e sem alterar as características intrínsecas da segurança do funcionamento, trata-se de Manutenção Preventiva. Por outro lado, quando a intervenção ocorre após a falha, considera-se Manutenção Corretiva. Já quando há alteração das características intrínsecas da segurança e do funcionamento do bem, as ações realizadas são classificadas como Melhoria.

A Manutenção Preventiva é efetuada com o objetivo de avaliar e/ou mitigar a degradação e reduzir a probabilidade de falha de um bem. Ela pode ser classificada como manutenção sistemática, quando ocorre em intervalos de tempo previamente definidos ou com base em unidades específicas de utilização, como horas, quilómetros ou ciclos de produção, sem que haja um controlo prévio da condição do bem.

Por outro lado, quando a manutenção é baseada na avaliação da condição física do bem, por meio de análises e possíveis intervenções, ela é denominada Manutenção Condicionada. Este tipo de manutenção pode ser dividido em dois subtipos a Manutenção Preditiva e a Manutenção Baseada na Condição não preditiva. A primeira diz respeito à manutenção baseada na condição efetuada de acordo com as previsões extrapoladas de análises repetidas ou de características conhecidas e avaliação de parâmetros significativos da degradação. A Manutenção Baseada na Condição, também designada por Manutenção Condicionada, é a manutenção preventiva que inclui a avaliação das condições físicas, análise e possíveis ações de manutenção decorrentes (NP EN 13306, 2021).

A Manutenção Corretiva, é a manutenção efetuada após a deteção da falha, destinada a repor um bem num estado em que pode realizar a função requerida. Esta pode ser diferida, não sendo efetuada imediatamente após a deteção da avaria, sendo adiada de acordo com regras estabelecidas, ou pode ser imediata se é efetuada sem atraso após a deteção de uma avaria, de forma a evitar as consequências inaceitáveis (NP EN 13306, 2021).

Por fim, outro tipo de manutenção é a Manutenção de Melhoria que consiste na combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, com o objetivo de melhorar a fiabilidade intrínseca e/ou a manutibilidade e/ou segurança de um bem, sem alterar a sua função original (NP EN 13306, 2021).

2.4. Análise do Modo e Efeitos de Falha (*Failure Mode and Effects Analysis* – FMEA)

A Análise do Modo e Efeitos de Falha (*Failure Mode and Effects Analysis* – FMEA) apesar de ser um método amplamente reconhecido, a sua origem ainda é incerta. Segundo Zhang e Chu (2011) o FMEA foi criado em 1950 pela *Grumman Aircraft Corporation*, enquanto grande parte dos autores defende que militares norte-americanos utilizaram o FMEA pela primeira vez em 1949 e, em seguida, introduziram-no na indústria aeroespacial em meados da década de 60, durante a Missão Apollo. De acordo com essa perspetiva, a agência norte-americana NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) teria criado um método com o intuito de identificar potenciais falhas em serviços, sistemas ou processos de forma sistemática, identificando assim as suas causas e efeitos. Dessa forma, tornou-se possível tomar decisões para eliminar ou, pelo menos, reduzir o risco das falhas que podem acontecer nos processos (Fernandes & Rebelato, 2006).

A partir dos anos 80, a *Ford Motor Company* foi uma das primeiras empresas a implementar o FMEA em larga escala, para melhorar a qualidade e fiabilidade dos automóveis (Clarke, 2005). Esse movimento foi impulsionado pela concorrência com fabricantes japoneses, que já utilizavam metodologias avançadas no controlo da qualidade.

Para realizar uma análise FMEA, é preciso seguir as seguintes etapas (Coughlin & Posencheg, 2019):

1. Identificação do processo ou serviço ou produto que requer a investigação.
2. Reunir uma equipa multidisciplinar representativa das diversas áreas envolvidas no processo.
3. Listar cada etapa do processo com o máximo de detalhes possível.
4. Avaliar os erros ou falhas que podem acontecer em cada etapa utilizando a seguinte construção:
 - Modos de falha (o que pode dar errado?)
 - Causas da falha (por que a falha aconteceria?)
 - Efeitos da falha (qual seria a consequência de cada falha?)
5. Classificar cada modo de falha usando os seguintes critérios:
 - Probabilidade de ocorrência (O)
 - Probabilidade de deteção (D)
 - Severidade (S)
6. Calcular o RPN (*Risk Priority Number*) de cada modo de falha multiplicando os valores de probabilidade de ocorrência, probabilidade de deteção e probabilidade de severidade ('O' x 'D' x 'S').
7. Desenvolver medidas de ação para mitigar os modos de falha com maior RPN.

Na figura 6 podemos observar esquematicamente o processo de uma análise FMEA.

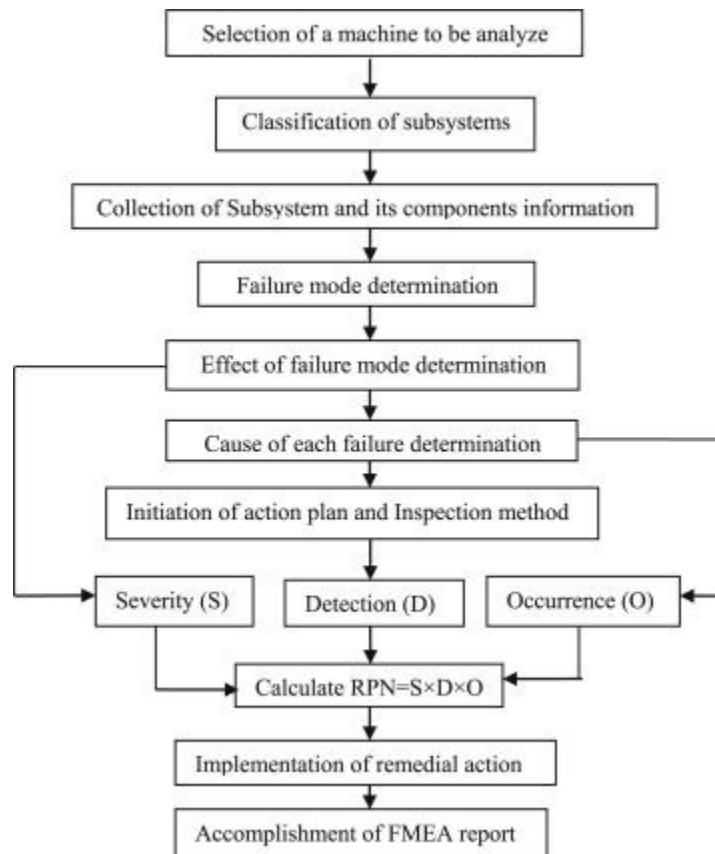


Figura 6 - Procedimento sequencial da análise FMEA (Balaraju, Raj, & Murthy, 2019).

2.5. Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process* – AHP)

Na gestão das organizações, diariamente são tomadas decisões a vários níveis, com diferentes graus de importância e complexidade. A tomada de decisão envolve escolher, com base em critérios, uma alternativa entre várias. Quando há múltiplos critérios a serem considerados, é necessário avaliar cada alternativa em relação a esses critérios e depois agregá-los para estabelecer um ranking das alternativas (Bhushan & Rai, 2004).

De acordo com Zeleny e Cochrane (1982) a tomada de decisão é um esforço para tentar resolver problemas com objetivos conflitantes que impedem a existência da solução ótima, conduzindo à procura do melhor compromisso. Segundo Hammond, Keeney e Raiffa (1999) torna-se importante garantir que as decisões tomadas são racionais e não são resultado de preconceitos naturais da mente, tal como a sua tendência a dar mais relevância à primeira informação que se recebe.

Na década de 1970 foi desenvolvido o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) pelo Professor Dr. Thomas L. Saaty. Saaty enquanto liderava projetos de pesquisa na Agência de Controle de Armas dos Estados Unidos, desenvolveu a metodologia AHP com base no conhecimento e na sua experiência. Desde essa altura, a simplicidade e o poder do AHP levaram ao seu uso generalizado em múltiplos domínios em todas as partes do mundo (Bhushan & Rai, 2004). Por exemplo, Improta et al. aplicaram o AHP em estudos na área da saúde, avaliando critérios como custo, risco de complicações e durabilidade na escolha da prótese mais adequada para o tratamento de hérnias.

A subjetividade é uma característica natural de todos os processos de decisão e em particular quando existe vários critérios e várias alternativas, principalmente porque essas decisões implicam consequências no futuro. Esta metodologia permite comparar alternativas, critérios e subcritérios, dois a dois, com base numa escala (Assis, 2014). Os critérios geralmente têm uma importância diferente e as alternativas diferem consoante a preferência por estas em cada critério (Saaty, 2004), daí que o autor definiu uma escala (tabela 1) para que se possa medir e comparar alternativas distintas com base em critérios diferentes.

Tabela 1 - Referencial de preferências de Saaty. Adaptado de (Saaty, 1987).

Escala de preferências	Definição
1	Igual importância
3	Importância moderada de um sobre o outro
5	Essencial ou importância forte
7	Importância muito forte
9	Importância extrema
2, 4, 6, 8	Valores intermédios entre dois julgamentos adjacentes

Para a aplicação do método AHP devem ser considerados os seguintes passos:

1. Definição do problema a analisar e determinar o tipo de resultados pretendidos.
2. Estruturação da hierarquia de decisão a partir do objetivo principal, de seguida, critérios, subcritérios e alternativas, tal como representado na figura 7.

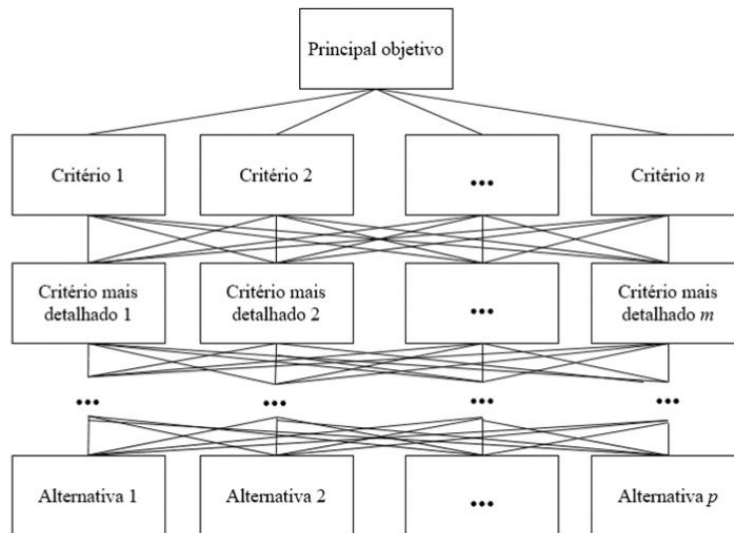


Figura 7 - Esquema de decisão hierárquico genérico. Adaptado de (Colin, 2007, p. 443).

3. Comparação Par a Par dos Critérios e subcritérios.



Os critérios e subcritérios são comparados par a par, de acordo com a escala de Saaty (tabela 1). A partir das comparações são constituídas matrizes, tais como:

$$\text{Matriz A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Estas matrizes servem como base para o cálculo das importâncias relativas dos diferentes critérios e subcritérios. É colocado o valor de 1 na diagonal da matriz uma vez que cada critério e subcritério representa a mesma importância sobre ele mesmo.

Os elementos da matriz são representados por a_{ij} e são recíprocos a a_{ji} , ou seja, se $a_{ij} = 3$ então $a_{ji} = \frac{1}{3}$. Assim uma vez que a matriz é recíproca, apenas é necessário avaliar a metade triangular superior, porque a outra metade é simétrica.

4. Cálculo dos Pesos dos Critérios e subcritérios.

O primeiro passo consiste na normalização das matrizes, através da divisão de cada elemento da mesma pela soma de cada coluna:

(1)

$$w_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

onde w_{ij} corresponde ao valor normalizado de cada elemento a_{ij} e $\sum_{i=1}^n a_{ij}$ representa a soma dos valores das colunas. Isto permite obter uma nova matriz, com os valores normalizados. Nesta nova matriz, calcula-se a média dos valores de cada linha, obtendo-se desta forma as importâncias relativas dos critérios e subcritérios. Note-se que a soma das importâncias deve ser igual a 1:

(2)

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

5. Verificação da Consistência.

As comparações efetuadas podem estar sujeitas a alguma inconsistência devido a alguma intransitividade possível nas comparações (Godinho et al., 2011), ou seja, as comparações feitas por este método são subjetivas, sendo importante verificar se a matriz é consistente. Assim, Saaty (1994) propõe que se calcule o índice de consistência, que é dado pela seguinte equação:

(3)

$$IC = \frac{\lambda \text{ máx} - n}{n - 1}$$

onde IC representa o índice de consistência, n é número de critérios avaliados e $\lambda \text{ máx}$ o máximo valor próprio da matriz de comparações. A interpretação do valor de IC depende do tamanho da matriz (n), pelo que Saaty (1994) propõe o cálculo do rácio da consistência (RC) que consiste no quociente entre o índice de consistência (IC) e o índice de consistência aleatória (IR):

(4)

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

O IR é um valor fixo e é definido consoante o número de critérios, conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Valores do IR para diferentes números de critérios das matrizes.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.59

O valor será considerado consistente se a razão for inferior a 0.1. De outra forma, se o valor for superior a 0.1, terá de se reavaliar as comparações efetuadas.

Posteriormente, realizam-se os mesmos cálculos anteriormente descritos para cada uma das alternativas em relação a cada critério.

2.6. Gestão da Manutenção

2.6.1. Evolução da Gestão da Manutenção

A gestão da manutenção tem evoluído significativamente ao longo dos anos, progredindo de processos manuais e descentralizados para sistemas altamente automatizados e integrados. Inicialmente, as atividades de manutenção eram registadas em papel ou folhas de cálculo o que tornava o processo suscetível a erros e dificultava a consulta imediata de informações críticas. Os pedidos de manutenção, frequentemente informais, eram comunicados por telefone, e-mail ou verbalmente, sem qualquer mecanismo de rastreamento eficiente. Isso resultava em atrasos na execução de tarefas, falta de priorização adequada e ausência de um histórico centralizado para análise futura. Além disso, a gestão de *stock* era outro desafio, uma vez que o controlo dos materiais e peças era feito de forma manual, o que resulta em erros de inventário, desperdícios e ausência de peças críticas no momento necessário (Rosales, 2023).

Apesar da importância da manutenção, muitos gestores enfrentavam dificuldades na análise de dados. Como afirmam Pintelon e Van Puyvelde (1997), os gestores de manutenção frequentemente tinham acesso a uma grande quantidade de dados, mas raramente recebiam a informação estruturada e do que precisavam. Os dados tinham que ser recolhidos de diversas fontes e, muitas vezes, ainda estavam desorganizados e por isso, exigiam um esforço significativo para serem processados e transformados em informação útil, como por exemplo os indicadores-chave de desempenho.

Para lidar com esta complexidade surgiram soluções digitais como os CMMS (*Computerized Maintenance Management System - Sistemas Computadorizados de Gestão da Manutenção*), que permitem automatizar o planeamento e a execução das atividades, possibilitando que as organizações atuem de forma proativa, reduzam o tempo de inatividade e aumentem a eficiência operacional. Além disso, ajudam a gerir tarefas cíclicas, acompanhar pedidos de manutenção agendados e converter automaticamente ordens de trabalho concluídas em faturas prontas para processamento (Fractal, n.d.).

2.6.2. Critérios de seleção de um *Software* de Gestão da Manutenção

A seleção do *software* de gestão da manutenção adequado é uma tarefa crucial que envolve uma compreensão pormenorizada das necessidades da empresa, uma avaliação exaustiva das opções disponíveis e um processo de tomada de decisão cuidadoso para garantir que o *software* escolhido corresponde às suas necessidades em termos de funcionalidades, custo e escalabilidade. Os critérios a considerar para essa escolha incluem (ManWinWin, n.d.):

- Gestão centralizada de informação – Deve permitir o registo e a gestão de todos os dados relacionados com a manutenção, incluindo planos de manutenções, ordens de trabalho, fornecedores, informações detalhadas sobre os equipamentos e o inventário de *stock*;
- Planeamento e acompanhamento dos serviços – Deve possibilitar a criação e gestão de ordens de trabalho com informações detalhadas, como data da intervenção, responsável, equipamento e tempo estimado de execução. Além disso, alocar ordens de trabalho aos técnicos e acompanhar execuções em tempo real;
- Relatórios e indicadores-chave de desempenho – A capacidade de emitir relatórios detalhados e analisar indicadores-chave de desempenho permite otimizar processos e melhorar a tomada de decisões;
- Assistência técnica – A disponibilidade de suporte técnico eficiente é essencial para garantir a resolução rápida de problemas e evitar interrupções na utilização do *software*;
- Acesso móvel – A compatibilidade com dispositivos móveis, como telemóveis e tablets, permite que os técnicos consultem e atualizem informações em tempo real, melhorando o acompanhamento das manutenções no terreno e a eficiência operacional;

- Interface intuitiva – Um *software* de fácil utilização reduz erros, melhora a experiência do utilizador e facilita a adoção por parte das equipas, tornando os processos mais ágeis e eficientes;
- Integração com outros sistemas (*Application Programming Interface* - API) – A possibilidade de integração com outras ferramentas já utilizadas na empresa melhora a eficiência e a conectividade dos processos, evitando redundâncias e permitindo um fluxo de trabalho mais coeso.

Em suma, a escolha do *software* de gestão da manutenção deve basear-se em critérios que assegurem eficiência, organização e integração dos processos. Um *software* bem selecionado contribui diretamente para a redução de falhas, a otimização do desempenho operacional e o prolongamento da vida útil dos equipamentos.

Capítulo 3 – Caso de estudo I: Aplicação FMEA ao Ultracongelador -80°C

A análise de falhas desempenha um papel relevante em diversas áreas, proporcionando uma compreensão profunda das causas subjacentes a eventos indesejados. Diversos métodos foram desenvolvidos para orientar este processo, cada um fornecendo uma abordagem específica. A Análise do Modo e Efeitos de Falha (*Failure Mode and Effects Analysis* - FMEA) é um exemplo aplicado a um ultracongelador -80°C neste primeiro caso de estudo. Ao aplicar este método, as empresas podem melhorar a fiabilidade, eficiência e segurança dos seus sistemas, processos ou produtos.

3.1. Material – Ultracongelador -80°C

O ultracongelador -80°C é um dos equipamentos mais fundamentais para a investigação científica, sendo utilizado para conservar substâncias como reagentes e elementos biológicos que, de outra forma, se decomporiam ou perderiam as suas propriedades. A refrigeração, enquanto técnica, oferece condições que possibilitam a conservação de elementos como o sangue e os seus derivados, necessários para diagnóstico e prestação de serviços de saúde (World Health Organization, 2008). No anexo A.1 podemos visualizar o princípio básico de funcionamento do sistema de refrigeração do equipamento em estudo.

As amostras biológicas humanas de elevada qualidade são processadas e armazenadas a temperaturas específicas e monitorizadas, tornando-se assim úteis em diversos estudos, como a genómica, transcriptómica e proteómica. O cumprimento dos protocolos específicos de processamento e preservação é crucial para um diagnóstico preciso e, muitas vezes, para uma terapia personalizada para cada doente. De forma a garantir resultados de boa qualidade, é importante assegurar que as amostras biológicas estejam sujeitas a temperaturas suficientemente baixas, preservando assim a sua integridade (Powell et al., 2019). Com o objetivo de combater o desperdício e a perda das amostras biológicas recolhidas, é de extrema importância antecipar as falhas que possam ocorrer nestes equipamentos.

Posto isto, o equipamento selecionado para análise FMEA é um ultracongelador -80°C.

3.2. Método – FMEA

O método aplicado é o FMEA, e a primeira etapa consiste na identificação dos componentes sujeitos à análise do equipamento selecionado. Na figura 8 podemos observar a localização de alguns dos componentes, nomeadamente:

- 1- Painel tátil *LCD*.
- 2- Porta interna e trava.
- 3- Porta externa e manípulo.
- 4- Junta “*Fivefold*”.
- 5- Válvula de pressão.
- 6- Grade e Filtro.
- 7- Pés e rodas.

O painel tátil *LCD* (*Liquid Crystal Display*) permite que o utilizador interaja com o equipamento. A porta interna e trava garantem a segurança térmica, minimizando a troca de temperatura entre o interior e o exterior do equipamento, evitando a perda de eficiência energética. A porta externa facilita o acesso ao interior do equipamento para manutenções, limpeza e verificação. O manípulo é projetado para proporcionar uma fácil abertura da porta, garantindo segurança e praticidade. A junta “*Fivefold*” é responsável pela estanquidade do sistema, garantindo que não haja vazamentos de ar ou variações de temperatura, o que poderia comprometer o desempenho do sistema de refrigeração. A válvula de pressão regula a pressão interna do equipamento, permitindo regular a mesma quando se pretende abrir a porta do equipamento. A grade e o filtro desempenham um papel crucial no desempenho do sistema de refrigeração, filtrando as partículas que podem danificar os componentes internos ou prejudicar o fluxo de ar, garantindo a eficiência térmica do ultracongelador. Os pés asseguram que o equipamento esteja estável durante o funcionamento, prevenindo vibrações que possam afetar o desempenho. As rodas permitem a mobilidade do ultracongelador, facilitando a sua movimentação para limpeza ou manutenção.



Figura 8 - Localização dos componentes do ultracongelador -80°C.

Em seguida, os componentes foram agrupados em sistemas de acordo com as suas funções. Dessa forma, o equipamento foi dividido em cinco sistemas: refrigeração, elétrico, isolamento, filtração e estabilização/mobilização. Cada um desses sistemas é composto da seguinte forma:

- Sistema de refrigeração: inclui o compressor, condensador, tubo capilar, evaporador e o desidratador;
- Sistema elétrico: bateria, interruptor, cabo de alimentação e painel tátil LCD;
- Sistema de isolamento: porta interna e trava, porta externa e manípulo, junta “fivefold” e a válvula de pressão;
- Sistema de filtração: grade e filtro;
- Sistema de estabilização e mobilização: os pés e as rodas.

Posteriormente, como podemos observar na tabela 3 foi realizada a análise dos possíveis modos de falhas, causas e consequências de cada componente.

Tabela 3 - FMEA aplicada ao ultracongelador -80°C.

Sistemas	Componentes	Funções	Modos de Falha	Causas	O	Consequências	S	D	RPN
Refrigeração	Compressor	Comprimir e movimentar o gás refrigerante pelo circuito	Motor queimado	Sobretensão elétrica	2	Incapacidade de fazer refrigeração	5	3	30
			Sobreaquecimento	Ventilação insuficiente	3	Perda do compressor	5	3	45
				Quantidade insuficiente de gás refrigerante	2				30
			Não liga ou tentativas de acionamento sem sucesso	Corte de energia elétrica	3	Impossibilita o funcionamento do sistema de refrigeração	5	4	60
	Baixa tensão de alimentação	3		60					
	Condensador	Transforma o gás refrigerante de alta pressão num líquido de alta pressão	Sobreaquecimento	Filtro sujo	4	Transferência de calor reduzida	4	3	48
	Tubo capilar	Controla a quantidade de refrigerante que flui para o evaporador, ao diminuir a pressão e a temperatura	Perda de gás refrigerante	Fissuras ou buracos no tubo devido a corrosão ou danos mecânicos	2	Contaminações (entrada de ar, humidade)	4	4	32
			Entupimento	Subida do óleo	3	Bloqueio do fluxo de refrigerante	5	4	60
Evaporador	Absorve o calor do interior do equipamento, transformando o líquido em gás de baixa temperatura e pressão	Refluxo do líquido	Congelamento	2	Absorção pobre em calor	4	4	32	
Desidratador	Remover a humidade	Obstrução	Acúmulo excessivo de impurezas	2	Não retém humidade	3	4	24	
Elétrico	Bateria	Dar energia ao display e alarmes	Tempo de vida útil no limite	Falta de manutenção preventiva	1	Impede a emissão de alarmes	4	2	8
	Interruptor	Ligar e desligar o equipamento	Mau contacto	Uso incorreto e desnecessário	1	Não há possível utilizar o equipamento	3	3	9

	Cabo de alimentação	Fornecer energia necessária	Cabo cortado ou danificado	Ações externas (impactos, roedores, etc.)	1	Não existem condições necessárias para o arranque do equipamento	4	3	12
			Cabo com mau contacto	Conexões soltas	1	O equipamento pode se desligar inesperadamente ou ter falhas no funcionamento	5	3	15
				Terminais corroídos ou sujos	2				30
	Painel tátil LCD	Fornecer informações ao utilizador, tais como: temperatura, erros, porta fechada ou aberta e permite desligar o alarme quando o mesmo é acionado	Sem qualquer tipo de informação	Cabo de alimentação desconectado	2	Perda de visibilidade das informações e dificuldades na monitorização de temperatura	4	3	24
				Sem bateria	1				12
			Fraca qualidade de imagem	Cabos de conexão danificados	2	Atraso na identificação de problemas, como exemplo da temperatura	4	3	24
			Touch screen não funciona	Exposição a temperaturas extremas ou humidade	3	Incapacidade de configurar ou ajustar os alarmes do equipamento	3	3	27
Isolamento	Porta interna e trava	Minimizar a troca de ar com o exterior	Trava quebrada ou danificada	Força excessiva aplicada ao tentar abrir ou fechar a porta	3	Comprometimento do isolamento térmico	4	3	36
	Porta externa e manípulo	Vedação e facilidade de acesso	Manípulo solto	Danos no mecanismo interno de fixação	2	Dificulta o acesso às amostras	4	3	24
			Manípulo danificado	Desgaste com o uso frequente	2				24
	Junta "Fivefold"	Aumentar o desempenho do isolamento	Acúmulo de gelo	Falta de manutenção regular	1	Dificuldade em fechar a porta	5	2	10
			Descolamento	Falha no mecanismo de fixação da borracha	2	Aumento do consumo de energia	3	3	18
			Desgaste e Fissuras	Impacto físico e desgaste natural	4	Variação indesejada da temperatura	3	2	24
	Válvula de pressão	Ajusta a diferença de pressão do interior e exterior	Quebra	Impacto físico	3	Dificuldade em abrir a porta	4	3	36

Filtração	Grade	Local pelo qual o calor se dissipa	Deformada	Embate	3	Fluxo de ar insuficiente	4	4	48
	Filtro	Evita que o pó se acumule no condensador	Filtro saturado	Longo período sem troca ou limpeza	2			1	8
Estabilização e Mobilização	Pés	Permite suporte e estabilidade	Desgaste excessivo	Atrito constante com o chão	2	Compromete a segurança do utilizador e das amostras	4	4	32
	Rodas	Confere mobilidade	Rodas presas	Acúmulo de sujeira ou ferrugem	4	Dificuldade na mobilidade para manutenções e limpeza	3	4	48

Por fim, foi atribuída uma classificação em três dimensões:

- Ocorrência (O): avalia a probabilidade de ocorrência do modo de falha;
- Severidade (S): avalia o impacto do modo de falha;
- Detetabilidade (D): avalia a capacidade de detetar a falha antes de ela acontecer.

Na tabela 4 visualizam-se números de 1 a 5, onde o nível 1 indica uma probabilidade muito baixa de ocorrência de falha, enquanto que o nível 5 indica uma probabilidade de certeza alta de que a falha ocorrerá. Por exemplo, a probabilidade de o cabo de alimentação ser cortado ou danificado por fatores externos, como roedores ou impactos, é muito baixa (nível 1), dado que se trata de um evento pouco comum e que pode ser prevenido. Em contraste, o sobreaquecimento do condensador devido a um filtro sujo tem uma probabilidade alta de ocorrer (nível 4), especialmente quando não há manutenção regular do sistema.

Tabela 4 - Tabela de Probabilidade de Ocorrência (Sobral et al., 2017).

Nível	Descrição
5	Certo
4	Provável
3	Ocasional
2	Remoto
1	Quase impossível

Por sua vez na tabela 5, pode classifica-se a gravidade dos efeitos de uma falha. O nível 5 representa uma consequência extremamente severa e o nível 1 representa um impacto insignificante. Por exemplo, no caso de entupimento do tubo capilar, as consequências são graves (nível 5), uma vez que essa falha bloqueia o fluxo do refrigerante, comprometendo todo o funcionamento do sistema de refrigeração. Já no caso de um manípulo solto, o impacto é menor (nível 2), pois apenas dificulta o acesso às amostras, sem comprometer a conservação térmica.

Tabela 5 - Tabela de Severidade das Consequências (Sobral et al., 2017).

Nível	Descrição
5	Catastrófico
4	Crítico
3	Médio
2	Marginal
1	Insignificante

Por fim, na tabela 6, classifica-se a capacidade de identificar a falha antes que ela ocorra, com 4 níveis. O nível 4 indica que é impossível detetar a falha antes de ela ocorrer e o nível 1 indica que a deteção da falha antes que ela ocorra é fácil de detetar. Por exemplo, a falha de mau contacto no interruptor é de deteção fácil (nível 1), pois geralmente é perceptível ao utilizar o equipamento. No entanto, um entupimento no tubo capilar pode ser de deteção difícil (nível 4), pois o problema desenvolve-se internamente e só se manifesta com perda de desempenho.

Tabela 6 - Tabela de Detetabilidade (Sobral et al., 2017).

Nível	Descrição
4	Impossível
3	Difícil
2	Moderada
1	Fácil

Capítulo 4 – Caso de estudo II: Seleção de *Software* de Monitorização Remota com AHP

A capacidade de tomar decisões é fundamental em diferentes contextos. Com a utilização do Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), as organizações conseguem tomar decisões mais fundamentadas e eficazes. Neste segundo caso de estudo, o AHP é aplicado para a aquisição de um *software* de monitorização remota para o IMM, capaz de assegurar um controlo rigoroso e contínuo destes equipamentos e salas fundamentais.

4.1. Material – Equipamentos e salas críticos




Para este estudo foi selecionado um total de 101 pontos para monitorização remota e podemos observar uma lista detalhada da quantidade total de cada categoria na tabela 7.

Tabela 7 - Listagem do número total de equipamentos e salas.

Descrição	Número total
Ultracongeladores (-80°C)	40
Congeladores (-20°C)	6
Frigoríficos (4°C)	5
Sala (temperatura e humidade)	12
Sala (temperatura)	1
Combinado (-20°C e 4°C)	1
Incubadora (CO ₂)	1
Sala (CO ₂)	29
Câmaras frias (4°C)	6

Estes equipamentos e salas encontram-se distribuídos pelos cinco pisos e pelas três alas (A, B e C) do IMM. Na figura 9 observamos o piso -1 e nesse piso encontra-se um ultracongelador -80°C na ala A, dois frigoríficos e dois congeladores na ala C.

Legenda

-  ultracongelador -80°C
-  congelador -20°C
-  frigorífico 4°C

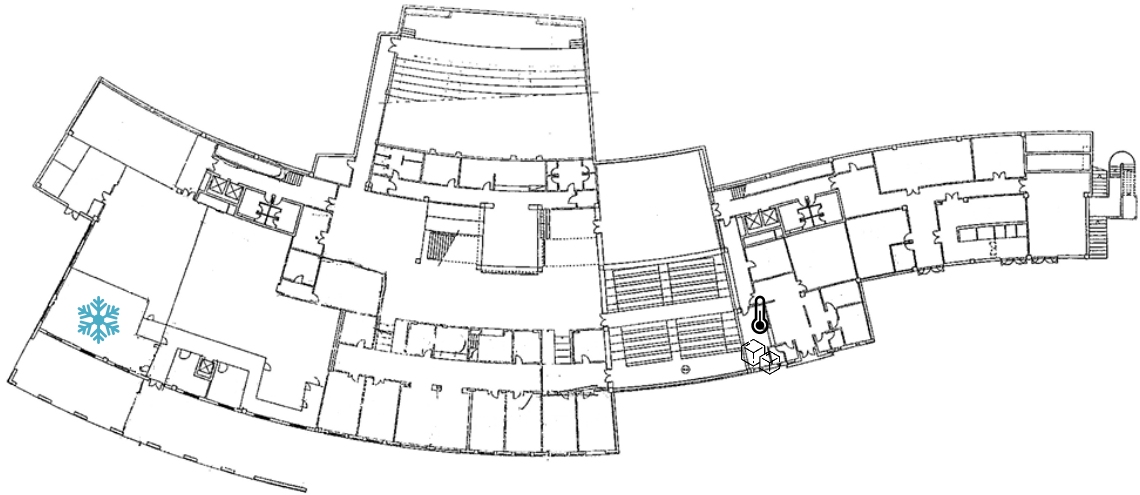


Figura 9 - Ilustração do piso -1.

Na figura 10 está representado o piso 0 e é nele que se encontram o maior número de equipamentos que são necessários monitorizar remotamente, nomeadamente na sala P0-A-24, P0-A-13, P0-A-20 e cinco ultracongeladores -80°C no corredor.

Legenda




-  ultracongelador -80°C
-  temperatura e humidade da sala
-  temperatura da sala



Figura 10 - Ilustração do piso 0.

Na figura 11 podemos observar a sala P0-A-24 em mais detalhe e, nesta sala é necessário monitorizar doze ultracongeladores -80°C, três frigoríficos, um congelador e a temperatura e humidade da sala.



Figura 11 - Sala P0-A-24.

Por sua vez, na figura 12 observamos a sala P0-A-13 com dezassete ultracongeladores -80°C, três congeladores e temperatura e humidade da sala.

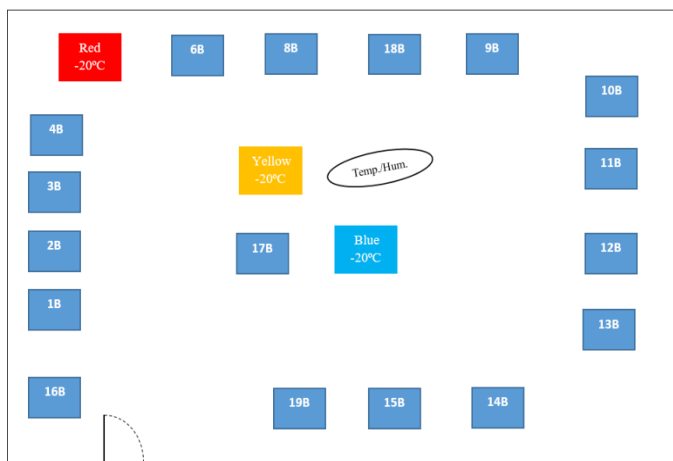


Figura 12 - Sala P0-A-13.

Por último, na sala P0-A-20 (figura 13) existem três ultracongeladores -80°C, um combinado, uma incubadora e a temperatura da sala.

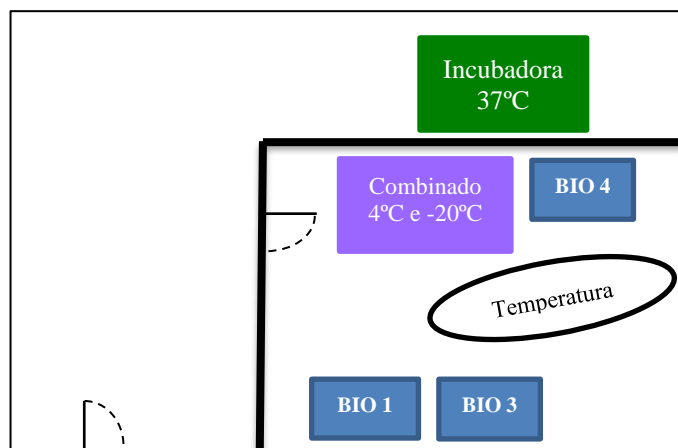


Figura 13 - Sala P0-A-20.

A figura 14 ilustra o piso 1, onde é necessário monitorizar o CO₂ de cinco salas e a temperatura de uma câmara fria.

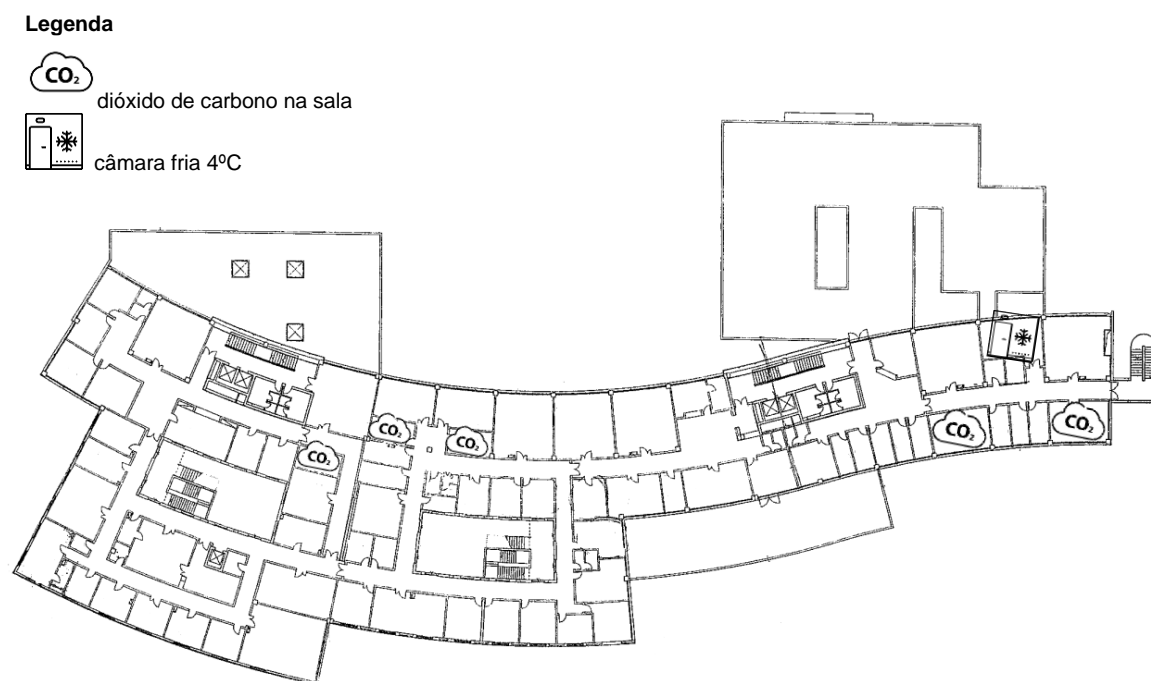


Figura 14 - Ilustração do piso 1.

Em relação ao piso 2, ele está representado na figura 15 e tem duas câmaras frias, quatorze salas para monitorizar CO₂ e sete salas para monitorizar temperatura e humidade.

Legenda




-  dióxido de carbono na sala
-  câmara fria 4°C
-  temperatura e humidade da sala



Figura 15 - Ilustração do piso 2.

Por fim, na figura 16 observamos o piso 3 com dez salas para monitorizar o CO₂, três câmaras frias e dois ultracongeladores -80°C.

Legenda





-  dióxido de carbono na sala
-  câmara fria 4°C
-  temperatura e humidade da sala
-  ultracongelador -80°C



Figura 16 - Ilustração do piso 3.

Ainda, gostaria de salientar que um ultracongelador -80°C não aparece representado em nenhum mapa do IMM porque está localizado em outro edifício, denominado Centro de Diagnóstico Molecular (MDU).

4.2. Método – AHP

O IMM precisava de um *software* de monitorização remota para controlar e acompanhar equipamentos críticos, como ultracongeladores -80°C e outros equipamentos e salas essenciais para a investigação científica, porque a tecnologia de monitorização anterior já não conseguia responder às necessidades atuais do instituto.

O *software* anterior, embora eficaz no passado, apresentava algumas limitações que comprometiam a eficiência e a segurança das operações. Duas das principais limitações eram:

- Transmissão de dados – a comunicação dos dados do *software* anterior era realizada por cabo, o que impedia e dificultava a monitorização de equipamentos e salas situados em pisos superiores;
- Ausência de assistência técnica – o *software* anterior já não possuía suporte técnico, nem à plataforma nem ao *hardware*, o que representava um grande risco de falha na monitorização de equipamentos críticos a qualquer momento.

Assim sendo, o objetivo principal era a aquisição de um *software* de monitorização remoto capaz de atender aos seguintes critérios:

- Alarmes por serviço de mensagens curtas (*Short Message Service - SMS*) – Garantir uma notificação imediata é fundamental, por exemplo, em caso de aumento de temperatura dos ultracongeladores -80°C, permitindo uma ação rápida mesmo fora de horas, fins de semana e feriados;
- Transmissão dos dados idealmente por Sistema Global para Comunicações Móveis (*Global System for Mobile Communications - GSM*);
- Preço total - Incluiu o hardware, subscrição anual, instalação e configuração e custos adicionais se aplicável;
- Hardware compatível com as sondas atuais – Para evitar a substituição das sondas e para minimizar transtornos operacionais, como o descongelamento dos ultracongeladores, é essencial que o *software* seja compatível com as sondas atuais;
- Assistência técnica;
- Frequência de registo e medição de leituras ajustável – Pretende-se o registo de leituras da temperatura a cada cinco minutos para os ultracongeladores e, a cada quinze minutos para a temperatura e humidade das salas, com o objetivo de identificar e agir sobre tendências de variação de temperatura fora do esperado;

- Possibilidade de calibração das sondas – Com uma regularidade predefinida fazemos verificações do valor de temperatura medido pela sonda dos equipamentos e ajustamos o valor de acordo com o valor medido por uma sonda externa portátil devidamente calibrada por uma entidade certificada. Realiza-se a verificação da temperatura no equipamento (ultracongelador, frigorífico ou congelador) que estiver a ser monitorizado e na sonda portátil, para verificar possíveis discrepâncias entre a temperatura exibida no equipamento e a indicada pela sonda portátil.

A escolha do método AHP em detrimento de outras técnicas para esta análise deve-se à possibilidade de consideração de um grande número de critérios, viabiliza a construção de uma hierarquia simples para analisar problemas complicados e é eficaz na integração de dados objetivos (quantitativos) e subjetivos (qualitativos), permitindo que os julgamentos dos avaliadores sejam incorporados de forma sistemática ao processo de tomada de decisão (Taherdoost, 2017).

Uma vez estabelecido o objetivo e definidos os critérios segundo a metodologia AHP, procedeu-se à identificação das alternativas. Neste caso, foram consideradas duas empresas: Empresa A e Empresa B.

A empresa A trabalha com um dispositivo que, dependendo do modelo, permite a monitorização de diferentes variáveis, como temperatura, humidade e CO₂ entre outras. Um dos modelos é especificamente concebido para a leitura de sinais analógicos através de entradas de corrente de 4 a 20 mA. Este equipamento tem capacidade para monitorizar até quatro variáveis em simultâneo, revelando-se uma solução ideal para o caso do iMM, onde se pretende a monitorização de vários ultracongeladores -80 °C localizados na mesma sala.

Quanto ao protocolo de comunicação do dispositivo esta empresa apresenta duas opções, nomeadamente Wi-Fi ou GSM. Dado que as instalações do iMM não dispõem de Wi-Fi, optou-se por considerar GSM.

A figura 17 representa o fluxo de comunicação da Empresa A para a monitorização remota de ultracongeladores. Cada ultracongelador está equipado com sondas PT100, que são ligadas ao dispositivo. Este dispositivo atua como intermediário, recolhendo as leituras de temperatura e transmitindo para a *Cloud* através de GSM. A partir da plataforma de monitorização fornecida pela empresa A, acessível através de um computador com ligação à internet, os utilizadores podem consultar em tempo real as leituras de temperatura, garantindo o controlo e a rastreabilidade dos parâmetros críticos dos equipamentos e salas.

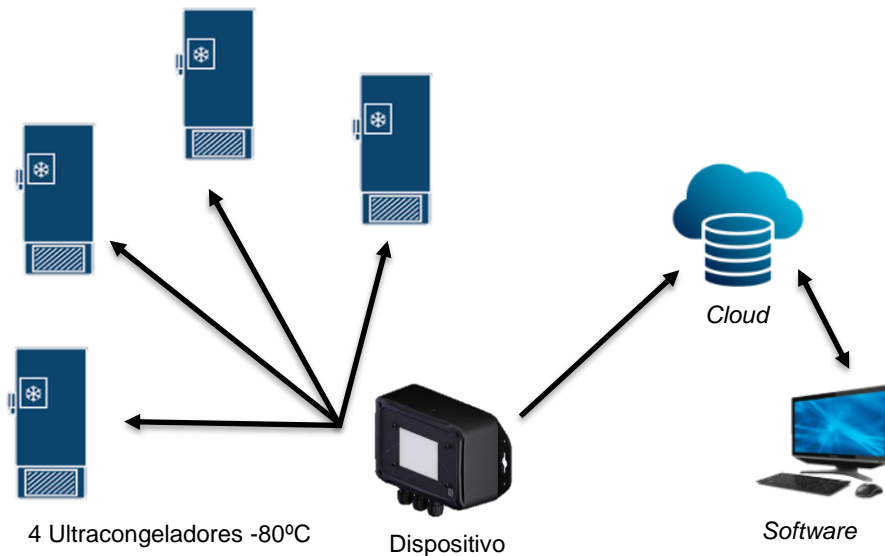


Figura 17 - Fluxo de comunicação da Empresa A.

A figura 18 representa o fluxo de comunicação da empresa B, cuja solução assenta na comunicação entre sensores e recetor. As sondas instaladas dentro dos ultracongeladores estão ligadas a sensores que comunicam com o recetor por radiofrequência. Cada sensor transmite as leituras de temperatura ao recetor que estiver mais próximo. O recetor, por sua vez, estabelece ligação com a *Cloud* através de uma das duas opções disponíveis: ligação Ethernet via tomada de rede, ou conexão GSM. A partir da cloud, os dados tornam-se acessíveis remotamente por intermédio da plataforma da empresa B consultável por computador tal como para a empresa A.

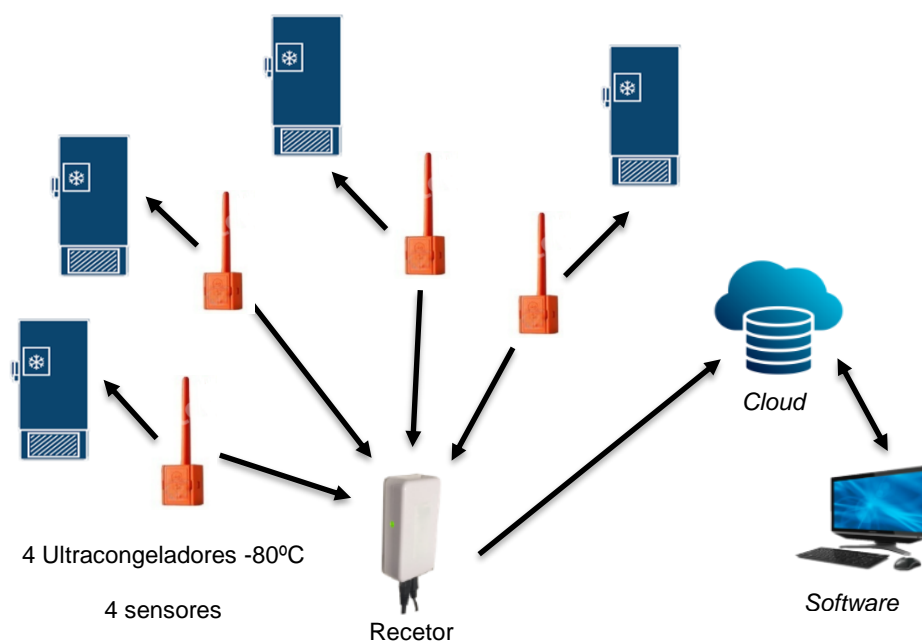


Figura 18 - Fluxo de comunicação da Empresa B.

Tendo em conta o critério preço total, mais concretamente o custo do *hardware*, e considerando que cada empresa utiliza um fluxo de comunicação distinto, foi elaborado um inventário do número necessário de dispositivos para a Empresa A, e de sensores e recetores para a Empresa B.

Para a empresa A visto que existe a possibilidade de com um dispositivo monitorizar até quatro variáveis em simultâneo, começou-se por verificar nas salas que apresentavam mais equipamentos o número necessário. Na figura 19 podemos observar que serão necessários oito dispositivos para a sala P0-A-24.

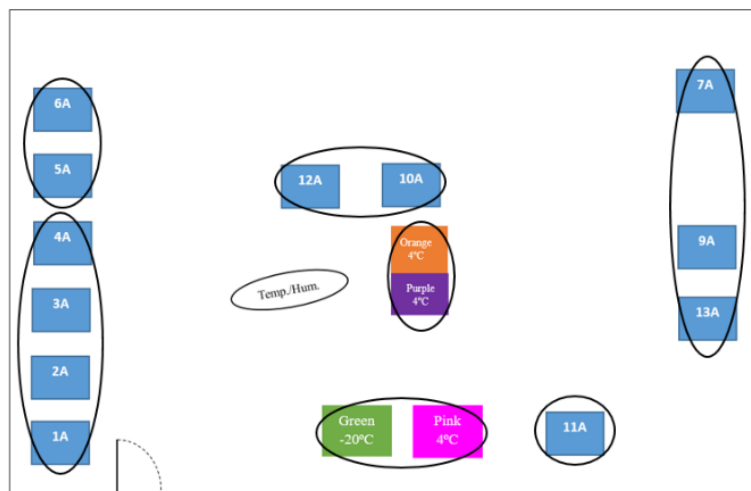


Figura 19 - Identificação do número de dispositivos necessários na sala P0-A-24 para a Empresa A.

Por observação da figura 20 serão necessários nove dispositivos para a sala P0-A-13.

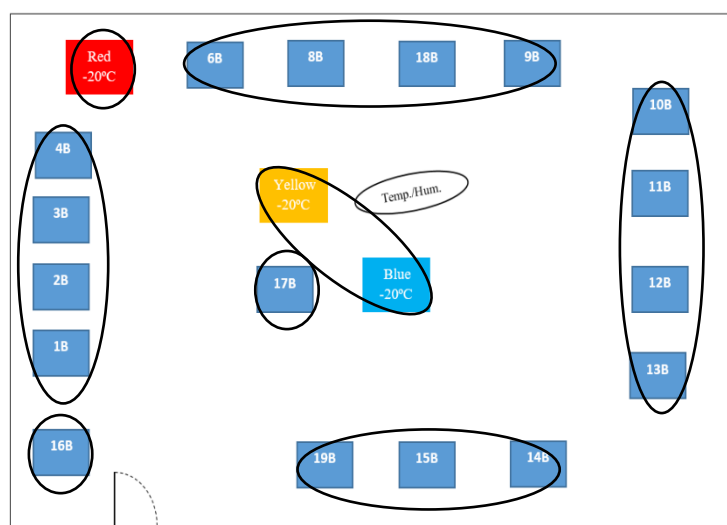


Figura 20 - Identificação do número de dispositivos necessários na sala P0-A-13 para a Empresa A.

Por fim, para a sala P0-A-21 são necessários quatro dispositivos (figura 21).

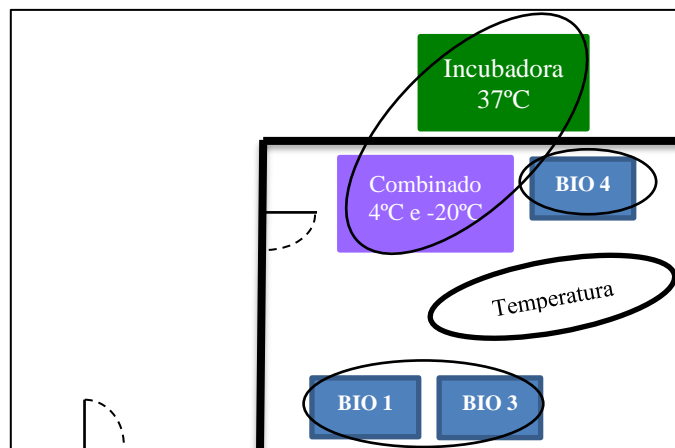


Figura 21 - Identificação do número de dispositivos necessários na sala P0-A-21 para a Empresa A.

Na tabela 8 podemos observar o número total de dispositivos necessários por piso para a empresa A.

Tabela 8 - Número total de dispositivos necessários por piso para Empresa A.

Piso / Edifício	-1	0	1	2	3	MDU
Total	3	26	6	23	16	1

Para a empresa B o número total de sensores é o número total de equipamentos e salas e o número total de recetores necessários por piso podemos verificar na tabela 9.

Tabela 9 - Número total de recetores necessários para a Empresa B.

Piso / Edifício	-1	0	1	2	3	MDU
Total	2	3	3	4	4	1

Para concluir na figura 22 podemos observar a representação esquemática do método AHP com objetivo, critérios e alternativas.

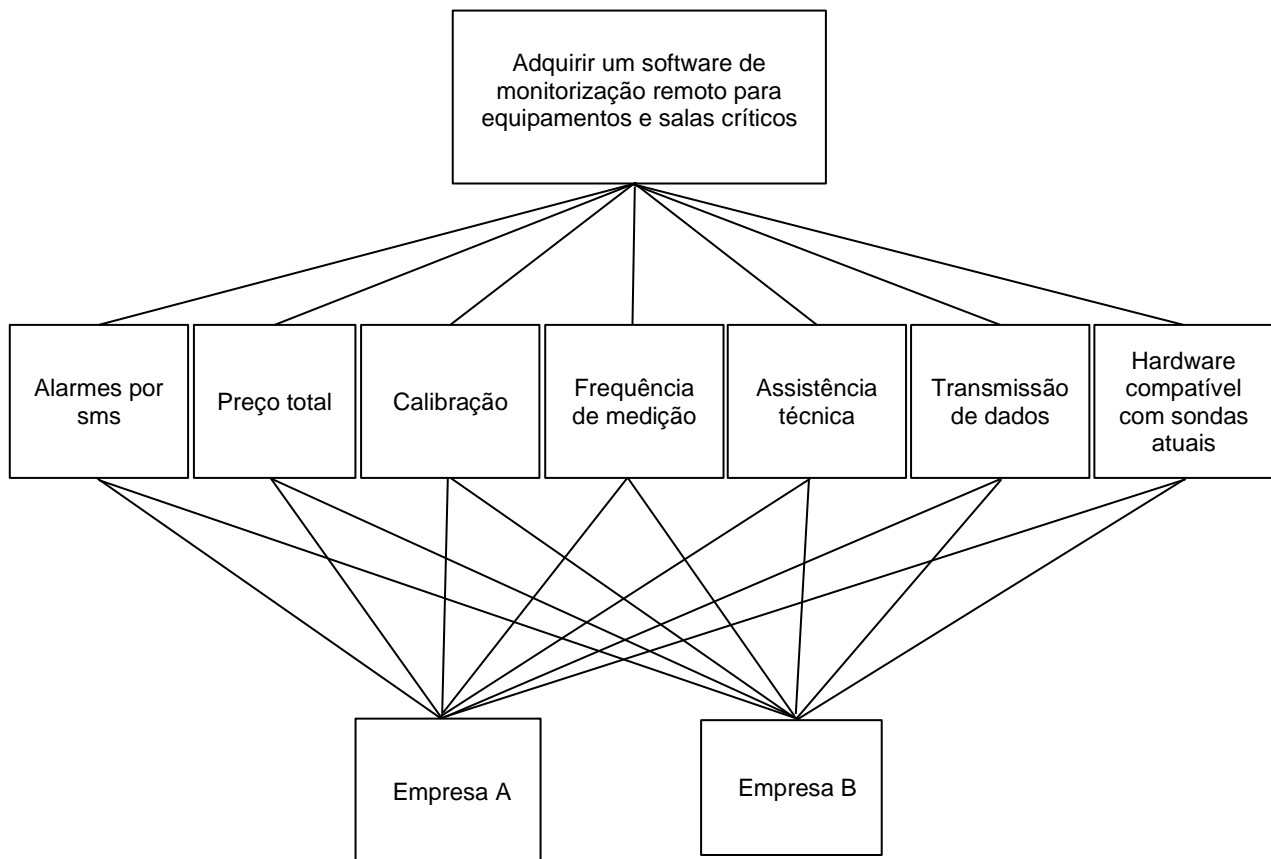


Figura 22 - Processo de análise AHP.

Capítulo 5 – Caso de estudo III: Implementação de *Software* de Gestão da Manutenção

Neste terceiro caso de estudo, são mencionados os critérios levados em consideração para uma escolha mais fundamentada de um *software* de gestão da manutenção para o IMM bem como as etapas realizadas para a sua implementação.

5.1. Critérios de seleção considerados

A escolha do *software* de gestão de manutenção seguiu critérios gerais aplicáveis a qualquer organização, tais como os que foram descritos na secção 2.6.2, mas também incluiu requisitos específicos que atendessem às particularidades operacionais do IMM, nomeadamente:

- Utilização do *software* por diversos utilizadores em simultâneo – Como o departamento responsável pela gestão da manutenção é composto por diferentes pessoas, a solução escolhida deve permitir o acesso e a edição de informações por vários utilizadores ao mesmo tempo, sem comprometer a integridade dos dados;
- Níveis de acesso diferenciados – Deve oferecer permissões ajustáveis para cada utilizador, garantindo segurança e controlo sobre as informações, protegendo dados sensíveis e permitindo diferentes níveis de acesso conforme as responsabilidades de cada colaborador;
- Alerta por e-mail sobre o fim dos contratos de manutenção – A possibilidade de configurar notificações automáticas, com antecedência personalizada, para avisar sobre a proximidade do vencimento dos contratos de manutenção é fundamental para evitar falhas e garantir a continuidade operacional;
- Inserção de datas anteriores à data atual nas ordens de trabalho – Como nem sempre é possível registar as intervenções no momento exato em que ocorrem, o *software* deve permitir a introdução de datas retroativas, assegurando um histórico preciso e atualizado das atividades de manutenção;
- Capacidade de exportação da informação – Deve permitir a exportação de dados para auxiliar em processos como a renovação de contratos de manutenção, auditorias ou análise de históricos de intervenções;
- Preço de aquisição total – O custo de implementação, manutenção e possíveis atualizações do *software* deve ser compatível com o orçamento disponível, garantindo um investimento sustentável a longo prazo.

5.2. Implementação do *Software* de Gestão da Manutenção

A implementação de um CMMS representa uma decisão estratégica de grande relevância para a organização, não apenas pela complexidade técnica envolvida, mas também pelas implicações que se estendem a múltiplas áreas. Este tipo de sistema, embora seja principalmente adotado pelos gestores da manutenção, tem um impacto transversal que abrange outros departamentos. Por outro lado, este processo exige um investimento considerável de recursos, tempo e formação dos utilizadores, sendo fundamental um planeamento cuidadoso para garantir a integração eficaz do CMMS com os fluxos operacionais existentes e com outros sistemas informáticos. Quando bem implementado, o CMMS contribui não só para a melhoria da eficiência da manutenção, mas também para o aumento da fiabilidade dos equipamentos, a redução de custos operacionais e o reforço da segurança e qualidade dos serviços prestados (Carnero & Novés, 2006).

O IMM decidiu implementar o *software* de manutenção Fractal One, e essa implementação exigiu um planeamento estruturado para garantir uma transição eficiente e bem sucedida. O processo começou de forma cuidadosa, com várias reuniões entre a equipa do S&C e a equipa representante da Fractal. Aquando dessas reuniões foi elaborado um plano dividido em três fases:

1. Identificação dos dados já existentes na base de dados do IMM.
2. Preparação dos dados (criação de novos e organização dos já existentes).
3. Importação dos dados para o *software*.

As sub-secções que se seguem dizem respeito à segunda fase de implementação. Esta etapa assegurou que os dados fossem consistentes e compatíveis com os requisitos do *software*, garantindo uma importação eficiente e sem erros.

5.2.1. Estrutura Hierárquica de Organização

Para garantir um controlo eficaz sobre os ativos e poder limitar o acesso conforme o perfil do utilizador foi necessário criar uma estrutura hierárquica. A árvore de ativos foi configurada para refletir a seguinte organização: Edifício → Piso → Ala → Sala → Equipamento. Esta estrutura permite uma visão clara e organizada da distribuição dos equipamentos, facilitando a gestão e o acesso às informações. A figura 23 representa essa hierarquia, destacando os diferentes níveis.

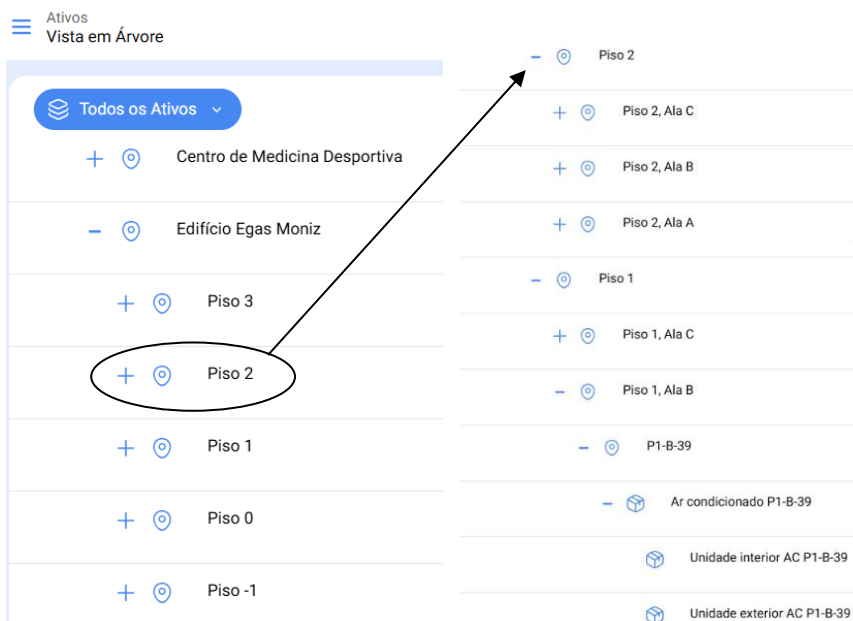


Figura 23 - Ilustração da organização hierárquica dos ativos.

5.2.2. Dados (Equipamentos, Recursos Humanos e Terceiros)

Todas as informações sobre os recursos humanos, terceiros (fornecedores) e equipamentos do IMM foram importadas para a plataforma Fractal One utilizando *templates* fornecidos pela própria empresa.

O processo iniciou com a correspondência entre os dados já existentes e os campos disponíveis nos *templates*. A título de exemplo, vejamos o *template* dos equipamentos. Este apresenta diversos campos sendo alguns deles: Código, Nome, Fabricante, Modelo, Número de série, Outros 1, Outros 2, Tipo, Classificação 1, Classificação 2, Data de compra, Código do pai ou código localização.

Na tabela 10 podemos observar a correspondência realizada entre os campos do *template* da Fractal e a base de dados do IMM. O campo código no *template* foi preenchido com o número de imobilizado do IMM, correspondendo ao campo "Número FIM" na base de dados. Para o nome foi utilizado a melhor designação (que podia ser o tipo ou modelo, por exemplo) para a identificação do equipamento, sendo uma informação que antes não existia na base de dados. O fabricante corresponde à marca do equipamento, enquanto o modelo e o número de série foram preenchidos diretamente com as informações já existentes desses campos. Para o campo Outro 1 foi atribuído a informação sobre o laboratório que utiliza o equipamento (correspondente ao "Lab User" na base de dados), e o Outro 2, identifica a informação referente ao laboratório responsável pela compra, pelo pagamento da manutenção e reparações, uma informação que antes não existia.

O tipo do equipamento foi associado à sua classe, enquanto a Classificação 1 e a Classificação 2 detalham a subclasse do equipamento, sendo que esta última é utilizada para uma descrição mais detalhada apenas quando aplicável. Por fim, a data de compra foi preenchida com a data de aquisição do equipamento.

Tabela 10 - Tabela de correspondência de informações.


Fractal	Observações	Base de dados IMM
Código	Preenchido com o número de imobilizado.	Número FIM
Nome	Preenchido com a melhor designação para identificar o equipamento.	Não existia
Fabricante	Corresponde à marca do equipamento.	Marca
Modelo	Informação diretamente associada ao modelo do equipamento.	Modelo
Número de série	Informação diretamente associada ao número de série.	Número de série
Outro 1	Para este campo foi atribuído o laboratório que utiliza o equipamento.	<i>Lab User</i>
Outro 2	Para este campo foi atribuído o laboratório que comprou o equipamento ou paga contrato de manutenção e reparações.	Não existia
Tipo	Informação associada à classe.	Classe
Classificação 1	Informação associada à subclasse.	Subclasse
Classificação 2	Descrição mais detalhada da subclasse, quando aplicável.	Não existia
Data de compra	Corresponde à data de aquisição do equipamento.	Data aquisição

Na figura 24, podemos ver um exemplo de como estas informações de um equipamento, mas especificamente uma centrífuga aparecem no *software*.

Ativos Equipamentos

Centrifuga Comum P2-A-04 Sigma 6-16K 143642

Guardar



Fora de Serviço: Não

Ativado

Geral

Formulário Personalizado

Estado de Saúde

Financeiro

Localizado em ou é parte de

// Fundação GIMM - Gulbenkian Institute for Molecular Medicine/ Polo de Lisboa/ Edifício Egas Moniz/ Piso 2/ X

Nome: Centrifuga Comum P2-A-04 Código: FIM002347 + IMM20122138

Marca: Sigma Modelo: 6-16K

Número de Série: 143642 Outro 1: IMM

Outro 2: IMM Código de Barras: Prioridade:

Tipo: Centrifuga Classificação 1: Centrifuga de Bancada Classificação 2: Refrigerada

Fornecedor: Data de Compra:

Figura 24 - Ficha técnica de um equipamento, mais especificamente uma centrífuga.

Em relação aos campos Tipo, classificação 1 e classificação 2 foi necessário criar os mesmos. Na tabela 11 podemos ver alguns exemplos desses campos.

Tabela 11 - Exemplos de Tipo, Classificação 1 e Classificação 2 da ficha de um equipamento criados.

Tipo	Classificação 1	Classificação 2
Água	Equipamentos purificação água	
Banho Maria	Sem agitação	
	Com agitação	
Centrifuga	Bancada	Refrigerada
	Chão	
Equipamento de Medição	Medidor de O ₂	
	Medidor de pH	
Incubadora	Refrigerada	
	CO ₂	
Frio	Arca/ Ultracongeladores (-80°C)	
	Câmara fria (4°C)	
	Congelador (-20°C)	
	Potes azoto líquido (-196°C)	
Proteção por fluxo de ar	Câmara biossegurança classe 2	
	Câmara biossegurança classe 1	
	Hotte	

5.2.3. Ordens de trabalho

De acordo com a NP EN 13460 (2009), uma Ordem de Trabalho (OT) consiste num documento que reúne toda a informação relevante para uma intervenção técnica de manutenção. Adicionalmente a OT permite dinamizar a realização de um trabalho de manutenção, suportando o respetivo relatório e agregando os custos inerentes ao mesmo, nomeadamente mão de obra, materiais e serviços (Cabral, 2016).

O registo da informação da execução dos trabalhos de manutenção nas ordens de trabalho é essencial para garantir o histórico de falhas dos equipamentos, permitindo avaliar as necessidades de manutenção corretiva e preventiva bem como a otimização das suas periodicidades (Gulati & Smith, 2009).

Alguns elementos de informação que uma OT deve conter devidamente preenchidos podemos verificar na tabela 12 (NP EN 13460, 2009).

Tabela 12 - Elementos de informação da ordem de trabalho, adaptado de (NP EN 13460, 2009).

Informação da OT	Descrição da Informação
Número	Código atribuído à OT. Este código é único para cada OT.
Solicitante	Nome da pessoa autorizada pelo pedido de manutenção.
Data de abertura	Data de ativação da OT.
Data de fecho	Data de fecho da OT. Quando o trabalho correspondente estiver terminado.
Código do bem	Código atribuído ao bem no âmbito da empresa.
Localização do bem	Corresponde à localização do bem.
Tipo de manutenção	Referente à natureza da atividade (preventiva, instalação, corretiva).
Prioridade	Código informando que a ação correspondente é prioritária sobre as OT.
Frequência	Tempo entre as atividades de manutenção nas operações cíclicas.
Descrição da atuação	Explicação das operações levadas a cabo.
Quantidade de mão de obra	Horas de trabalho despendidas.
Tipo de mão de obra	Categoria dos que executam o serviço.

A figura 25 ilustra um exemplo de alguns campos referenciados na tabela 12 e como aparece no *software* de gestão da manutenção Fracttal One.

Figura 25 - Exemplo de uma OT no software Fractal One.

Uma ordem de trabalho, divide-se em quatro fases:

- Pendente: planeada para uma determinada data;
- Em processo: trabalho que já foi emitido, ficando a cargo do responsável pela intervenção técnica;
- Em revisão: fim da execução do trabalho, com ainda possibilidade de anexar documentos;
- Concluída: já não pode receber nenhuma imputação ou registo de informação, serve como histórico e relatório do trabalho.

Na figura 26 é possível ver o fluxo das OT e um exemplo de uma OT concluída do *software* de gestão da manutenção Fractal One.



Figura 26 - Exemplo do fluxo das Ots e a ilustração de uma OT concluída do software Fractal One.

5.2.4. Catálogo de Avarias (Tipo, Causa e Método de Detecção)

Foi criado um catálogo de avarias, que contém informações detalhadas sobre o tipo de avaria, a sua causa e o método de deteção. Este catálogo é essencial para garantir que as ordens de trabalho são preenchidas com informações precisas e posteriormente utilizadas na análise estatística.

Na tabela 13 estão enumerados os diferentes tipos de avaria que podem ocorrer.

Tabela 13 - Lista dos tipos de avaria.

Tipos de Avaria
Falha na velocidade
Falha na temperatura
Impossível programar os parâmetros
Tampa/porta não fecha/abre
Não funciona
Vibração/ruído anormal
Não liga
Alarme/erro
Incumprimento requisitos de segurança
Mau estado de conservação e/ou limpeza
Falha na humidade
Falha da concentração de CO ₂ /O ₂
Falha na iluminação
Falha na lâmpada UV
Fuga de água
Falha do fluxo de ar
Falha na aquisição de imagem
Falha do <i>software</i>
Acessórios/consumíveis em mau estado
Dano físico no equipamento
Outro

Por sua vez, na tabela 14 são apresentadas as possíveis causas de uma falha.

Tabela 14 - Lista das causas.

Causas
Desgaste (consumíveis)
Equipamento envelhecido/obsoleto
Má utilização
Falha energia
Falha manutenção
Defeito de fabrico
Falha abastecimento água
Falha abastecimento gás
Fuga gás
Outro

Por fim, na tabela 15 consideraram-se três métodos de deteção que podem ser utilizados para identificar as falhas.

Tabela 15 - Lista dos modos de deteção.

Métodos de deteção
Visual/Sonoro
Teste
Resultados inesperados

5.2.5. Planos de Manutenção

Os planos de manutenção variam consoante o tipo de equipamento (Cruzan, 2009). De acordo com a norma NP EN 13460:2009, estes são definidos como “o conjunto estruturado de tarefas que compreendem as atividades, os procedimentos, os recursos e a duração necessários para executar a manutenção”.

No total, foram registados mais de cem planos de manutenção. Na figura 27 apresenta um exemplo referente ao tipo de equipamentos PCR (*Polymerase chain reaction*), nomeadamente os Viia 7 e 7500 Fast.

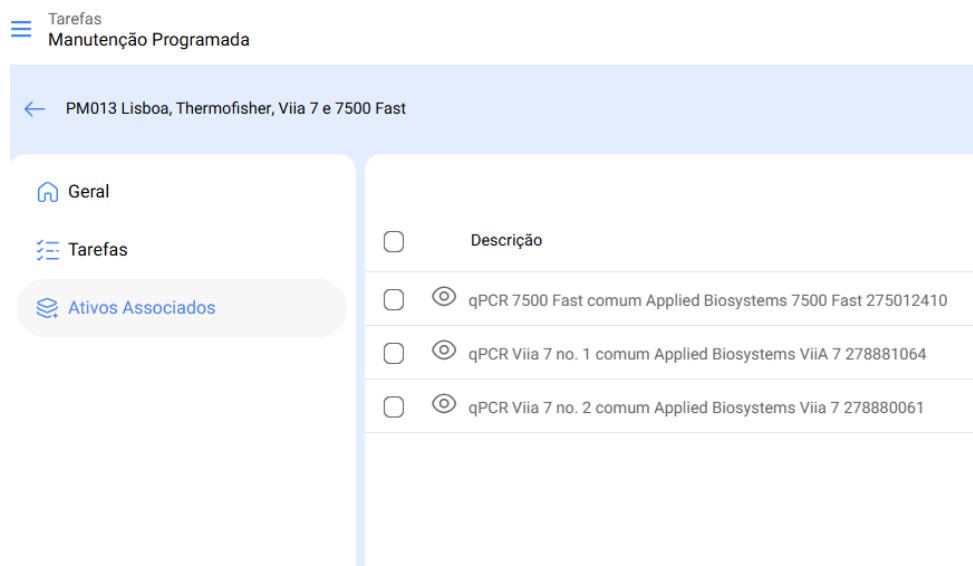


Figura 27 - Plano de manutenção para o tipo de equipamentos PCR.

Nestes equipamentos são realizadas duas tarefas de manutenção: uma mensal e outra anual. A manutenção anual é realizada por um técnico de uma empresa — neste caso, a Thermo Fisher Scientific — ao abrigo do contrato de manutenção. Após a intervenção, é fornecido um relatório técnico. Já a manutenção mensal é da responsabilidade do nosso departamento. Por ser executada internamente, optou-se pela implementação de uma *checklist*, de modo a garantir o correto preenchimento da OT (figura 28).

<p>1. Calibração background passou?</p> <p>Tipo: Sim / Não</p> <p>Grupo/Parte:</p> <p>Obrigatório: <input checked="" type="radio"/> Sim</p> <p>Iterações: ---</p>	<p>5. Apagar resultados equipamento</p> <p>Tipo: Sim / Não</p> <p>Grupo/Parte:</p> <p>Obrigatório: <input checked="" type="radio"/> Sim</p> <p>Iterações: ---</p>
<p>2. Número de horas da lâmpada</p> <p>Tipo: Número</p> <p>Grupo/Parte:</p> <p>Obrigatório: <input checked="" type="radio"/> Sim</p> <p>Iterações: ---</p>	<p>6. Backup calibrações para servidor?</p> <p>Tipo: Sim / Não</p> <p>Grupo/Parte:</p> <p>Obrigatório: <input checked="" type="radio"/> Sim</p> <p>Iterações: ---</p>
<p>3. Erros?</p> <p>Tipo: Texto</p> <p>Grupo/Parte:</p> <p>Obrigatório: <input checked="" type="radio"/> Sim</p> <p>Iterações: ---</p>	<p>7. Observações</p> <p>Tipo: Texto</p> <p>Grupo/Parte:</p> <p>Obrigatório: <input type="radio"/> Não</p> <p>Iterações: ---</p>
<p>4. Restart equipamento</p> <p>Tipo: Sim / Não</p> <p>Grupo/Parte:</p> <p>Obrigatório: <input checked="" type="radio"/> Sim</p> <p>Iterações: ---</p>	

Figura 28 - Checklist das tarefas do plano de manutenção preventiva mensal do tipo de equipamento PCR.

5.2.6. Contratos de Manutenção

Os contratos de manutenção são acordos estabelecidos com entidades externas especializadas, com o objetivo de assegurar a operacionalidade e o desempenho contínuo de determinados equipamentos. Estes contratos especificam os serviços abrangidos, os prazos de resposta, os custos envolvidos e as responsabilidades de ambas as partes.

Estes contratos incluem, regra geral, uma visita anual para manutenção preventiva, a substituição de componentes sujeitos a desgaste, e o fornecimento de relatórios técnicos após cada intervenção. Em alguns casos, o contrato também prevê manutenção corretiva, com prazos de resposta previamente definidos. A gestão destes contratos é da responsabilidade do nosso departamento, que assegura a sua renovação dentro dos prazos estipulados.

No *software* Fractal One, há uma secção para registar esses contratos, permitindo a inserção de dados e a configuração de alertas por e-mail. Por exemplo, é possível configurar um alarme para notificar a equipa com 30 dias de antecedência do término da vigência do contrato. Até ao momento, foram criados mais de sessenta contratos de manutenção.

5.3. Procedimento Operacional Padrão (*Standard Operating Procedures - SOP*)

Com o objetivo de aprimorar a utilização do *software* foi elaborado um Procedimento Operacional Padrão (*Standard Operating Procedure – SOP*) para o Fractal One. Esse documento reúne, de forma detalhada, os procedimentos e instruções necessários para a criação de equipamentos, localizações e fornecedores, além de orientar sobre a configuração de planos e contratos de manutenção, entre outras funcionalidades essenciais.

A elaboração desse SOP visa garantir a padronização das atividades, facilitar o treinamento de novos colaboradores e assegurar a continuidade dos processos, mesmo em situações de substituição de equipa. Além disso, a documentação promove maior eficiência operacional, reduzindo falhas decorrentes do uso incorreto do *software*. O documento será periodicamente revisado e atualizado conforme a evolução do *software* ou mudanças nos fluxos de trabalho internos.

Capítulo 6 – Resultados e Discussão

6.1. Caso de estudo I

Para a avaliação do nível do risco de acordo com o valor de RPN foi considerado o referencial representado na tabela 16.

Tabela 16 - Classificação do nível do Risco por RPN.

Risco	RPN
<i>Crítico</i>	51-100
<i>Médio</i>	26-50
<i>Baixo</i>	1-25

A implementação do FMEA revelou que os riscos críticos do ultracongelador -80°C (tabela 17) estão relacionados com falhas elétricas e problemas no sistema de refrigeração, ambos com um RPN de 60. A falha no acionamento do equipamento pode ocorrer devido a cortes de energia elétrica ou baixa tensão de alimentação, colocando em risco a conservação das amostras biológicas. Além disso, o entupimento do sistema de refrigeração, causado pela subida do óleo, pode comprometer a eficiência térmica do equipamento, prejudicando a manutenção da temperatura adequada. Para mitigar esses riscos, recomenda-se a implementação de um sistema de energia interrupta (*Uninterruptible Power Supply* - UPS) para evitar que o equipamento se desligue inesperadamente, além da instalação de um gerador de emergência para garantir o funcionamento contínuo em caso de falha prolongada da rede elétrica. Monitorizar regularmente a tensão elétrica e inspecionar conexões elétricas são medidas preventivas essenciais para evitar oscilações que possam danificar o equipamento.

No que diz respeito ao sistema de refrigeração, é fundamental realizar manutenções preventivas periódicas para evitar o acúmulo de óleo nos tubos capilares e monitorizar a pressão e a temperatura do sistema para detetar anomalias antecipadamente.

Tabela 17 - Modos de falha e causas com risco crítico.

Modo de falha	Causa	RPN
Não liga ou tentativas de acionamento sem sucesso	Corte de energia elétrica	60
	Baixa tensão de alimentação	60
Entupimento	Subida do óleo	60

Na tabela 18 são apresentados riscos médios e estão associados a problemas térmicos, estruturais e elétricos, com RPN variando entre 27 e 48. O sobreaquecimento, identificado como um dos riscos mais relevantes, pode ocorrer devido à acumulação de sujidade no filtro (RPN 48) ou à ventilação insuficiente (RPN 45 e 30), comprometendo a eficiência da refrigeração e aumentando o risco de falha do equipamento. Além disso, a deformação causada por embates e o bloqueio das rodas devido ao acúmulo de sujidade ou ferrugem (ambos com RPN 48) podem dificultar a mobilidade do equipamento, prejudicando processos de manutenção e limpeza. No que diz respeito à integridade estrutural, falhas na trava da porta devido a força excessiva (RPN 36) e quebras provocadas por impacto físico (RPN 36) podem comprometer o isolamento térmico, aumentando o consumo energético e dificultando a regulação da temperatura interna. Problemas no sistema de refrigeração, como perda de gás refrigerante por corrosão nos tubos (RPN 32) e refluxo do líquido devido a congelamento (RPN 32), representam riscos adicionais à estabilidade térmica do equipamento.

Para mitigar esses riscos, recomenda-se a limpeza e substituição periódica dos filtros para garantir uma ventilação adequada, evitando o sobreaquecimento. Além disso, inspeções regulares das rodas e da estrutura do equipamento devem ser realizadas para prevenir bloqueios e danos causados por impactos. Manutenções preventivas no sistema de refrigeração são essenciais para evitar a corrosão dos tubos e garantir um fluxo contínuo do gás refrigerante. Quanto à parte elétrica, medidas como a verificação dos terminais corroídos e a estabilização da alimentação elétrica podem prevenir falhas no motor e mau funcionamento do painel tátil.

Tabela 18 - Modos de falha e causas com risco médio.

Modo de falha	Causa	RPN
Sobreaquecimento	Filtro sujo	48
Deformada	Embate	48
Rodas presas	Acúmulo de sujeira ou ferrugem	48
Sobreaquecimento	Ventilação insuficiente	45
Trava quebrada ou danificada	Força excessiva aplicada ao tentar abrir ou fechar a porta	36
Quebra	Impacto físico	36
Perda de gás refrigerante	Fissuras ou buracos no tubo devido a corrosão ou danos mecânicos	32
Refluxo do líquido	Congelamento	32
Desgaste excessivo	Atrito constante com o chão	32
Motor queimado	Sobretensão elétrica	30
Sobreaquecimento	Ventilação insuficiente	30
	Quantidade insuficiente de gás refrigerante	30
Cabo com mau contacto	Terminais corroídos ou sujos	30
Touch screen não funciona	Exposição a temperaturas extremas ou humidade	27

Por fim, na tabela 19 verificamos os modos de falha avaliados com nível de risco baixo e corresponde ao desgaste natural dos componentes, falhas elétricas e falta de manutenção preventiva, com RPNs variando entre 8 e 24. A obstrução causada pelo acúmulo excessivo de impurezas (RPN 24) pode comprometer o desempenho do sistema de ventilação, reduzindo a eficiência da refrigeração. Além disso, falhas na alimentação elétrica, como cabo desconectado (RPN 24) ou danificado por impactos ou roedores (RPN 12), podem impedir o funcionamento adequado do equipamento, levando à perda de informações no display.

No que diz respeito ao desgaste mecânico, problemas como fissuras e descolamento devido a impacto físico ou degradação natural (RPN 24 e 18), além de danos no manípulo causados por uso frequente (RPN 24), podem afetar a estrutura do equipamento, comprometendo a utilização e vedação térmica. A fraca qualidade de imagem do painel LCD (RPN 24), associada a cabos de conexão danificados, pode dificultar a leitura de informações essenciais para a monitorização do equipamento. Para minimizar esses riscos, recomenda-se a realização de limpezas periódicas para evitar a obstrução de componentes, bem como inspeções regulares nos cabos e conexões elétricas para garantir a integridade do fornecimento de energia. A substituição preventiva de peças sujeitas a desgaste, como manípulos e borrachas de vedação, pode contribuir para a longevidade do equipamento e a manutenção da sua eficiência operacional. Além disso, a troca e limpeza regular de filtros (RPN 8) são medidas simples, porém eficazes, para manter a qualidade do ar no sistema de refrigeração. A adoção dessas estratégias permitirá aumentar a fiabilidade do equipamento e reduzir pequenas falhas que, se acumuladas, podem impactar negativamente o seu desempenho.

Tabela 19 - Modos de falha e causas com risco baixo.

Modo de falha	Causa	RPN
Obstrução	Acúmulo excessivo de impurezas	24
Sem qualquer tipo de informação	Cabo de alimentação desconectado	24
Desgaste e Fissuras	Impacto físico e desgaste natural	24
Fraca qualidade de imagem	Cabos de conexão danificados	24
Manípulo solto	Danos no mecanismo interno de fixação	24
Manípulo danificado	Desgaste com o uso frequente	24
Desgaste e Fissuras	Impacto físico e desgaste natural	24
Descolamento	Falha no mecanismo de fixação da borracha	18
Cabo com mau contacto	Conexões soltas	15
Cabo cortado ou danificado	Ações externas (impactos, roedores, etc.)	12
Sem qualquer tipo de informação	Sem bateria	12
Acúmulo de gelo	Falta de manutenção regular	10
Mau contacto	Uso incorreto e desnecessário	9
Tempo de vida útil no limite	Falta de manutenção preventiva	8
Filtro saturado	Longo período sem troca ou limpeza	8

6.2. Caso de estudo II

Com base nos critérios definidos na secção 4.2, foram atribuídas siglas aos mesmos (tabela 20) para facilitar a apresentação e compreensão dos resultados.

Tabela 20 - Critérios e suas respectivas siglas.

Designação	Critério
C ₁	Preço total
C ₂	Transmissão de dados por GSM
C ₃	Hardware compatível com sondas atuais
C ₄	Alarmes por sms
C ₅	Frequência de medição
C ₆	Assistência técnica
C ₇	Calibração das sondas

Para determinar a intensidade de importância de um critério em relação a outro, foi utilizado o referencial proposto por Saaty (tabela 1, secção 2.5). Os valores atribuídos na matriz de julgamentos (tabela 21) foram definidos com base na minha análise crítica e conhecimento técnico do contexto específico de monitorização remota em ambientes laboratoriais, adquiridos ao longo do estágio no IMM. Esta avaliação teve em conta as necessidades práticas identificadas, os requisitos funcionais observados e os desafios técnicos enfrentados pela instituição.

Tabela 21 - Matriz de julgamentos (Matriz A).

Critérios	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
C ₁	1	1/3	3	1/3	6	5	7
C ₂	3	1	4	1	7	6	8
C ₃	1/3	1/4	1	1/4	3	2	5
C ₄	3	1	4	1	7	6	8
C ₅	1/6	1/7	1/3	1/7	1	1/2	2
C ₆	1/5	1/6	1/2	1/6	2	1	3
C ₇	1/7	1/8	1/5	1/8	1/2	1/3	1

Pela análise da tabela 21 podemos observar que os critérios mais importantes são o critério C₂ (Transmissão de dados por GSM) e o C₄ (Alarmes por SMS) uma vez que receberam valores altos em relação a outros critérios, indicando que são considerados os mais relevantes na tomada de decisão. Por outro lado, o critério de menor importância é o C₇ (Calibração das sondas) dado que tem os menores valores comparativos, sugerindo que tem menor peso na tomada de decisão. Por fim, o critério C₁ (Preço total) também se destaca com um peso relevante, mas não supera C₂ e C₄.

De seguida, obteve-se a matriz A normalizada representada na tabela 22 com base na equação 1 da secção 2.5. Os valores obtidos da soma dos valores de cada coluna da tabela 22 são 7.8429, 3.0179, 13.0333, 3.0179, 26.50, 20.8333 e 34.00 para C₁, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆ e C₇ respetivamente.

Tabela 22 - Tabela da matriz A normalizada.

Crítérios	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	C₆	C₇
C₁	0.1275	0.1105	0.2302	0.1105	0.2264	0.2400	0.2059
C₂	0.3825	0.3314	0.3069	0.3314	0.2642	0.2880	0.2353
C₃	0.0425	0.0828	0.0767	0.0828	0.1132	0.0960	0.1471
C₄	0.3825	0.3314	0.3069	0.3314	0.2642	0.2880	0.2353
C₅	0.0213	0.0473	0.0256	0.0473	0.0377	0.0240	0.0588
C₆	0.0255	0.0552	0.0384	0.0552	0.0755	0.0480	0.0882
C₇	0.0182	0.0414	0.0153	0.0414	0.0189	0.0160	0.0294

Ainda é realizado a média de cada linha da matriz A normalizada para obter o vetor de prioridades de cada critério (tabela 23).

Tabela 23 - Vetor de Prioridades dos critérios.

Crítério	Peso
C ₁ - Preço total	0.1787
C ₂ - Transmissão de dados por GSM	0.3057
C ₃ - Hardware compatível com sondas atuais	0.0916
C ₄ - Alarmes por sms	0.3057
C ₅ - Frequência de medição	0.0374
C ₆ - Assistência técnica	0.0551
C ₇ - Calibração das sondas	0.0258

Por observação da tabela 23, os critérios mais relevantes são a Transmissão de dados por GSM (30,57%) e Alarmes por SMS (30,57%), indicando que são fatores decisivos na escolha do *software*. O Preço total (17,87%) tem um peso considerável, mas não é o mais determinante. Critérios como Hardware compatível com sondas atuais (9,16%), Assistência técnica (5,51%), Frequência de medição (3,74%) e Calibração das sondas (2,58%) possuem pesos menores, apresentando menor influência na tomada de decisão.

Segundo a equação 4 da secção 2.5, o próximo passo consiste em determinar a razão de consistência (RC). Para este caso de estudo o valor do IR é 1.32. Para o valor de IC inicialmente é necessário fazer a multiplicação da matriz A com o vetor de prioridades:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.3333 & 3 & 0.3333 & 6 & 5 & 7 \\ 3 & 1 & 4 & 1 & 7 & 6 & 8 \\ 0.3333 & 0.25 & 1 & 0.25 & 3 & 2 & 5 \\ 3 & 1 & 4 & 1 & 7 & 6 & 8 \\ 0.1667 & 0.1429 & 0.3333 & 0.1429 & 1 & 0.5 & 2 \\ 0.2 & 0.1667 & 0.5 & 0.1667 & 2 & 1 & 3 \\ 0.1429 & 0.1250 & 0.2 & 0.125 & 0.5 & 0.3333 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.1787 \\ 0.3057 \\ 0.0916 \\ 0.3057 \\ 0.0374 \\ 0.0551 \\ 0.0258 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.3383 \\ 2.3132 \\ 0.6557 \\ 2.3132 \\ 0.2643 \\ 0.3909 \\ 0.1832 \end{bmatrix}$$

em seguida, procedemos à divisão do resultado obtido anteriormente pelo vetor dos pesos dos critérios e obtemos o $\lambda_{\text{máx}}$:

$$\begin{bmatrix} 7.4891 \\ 7.5681 \\ 7.1581 \\ 7.5681 \\ 7.0593 \\ 7.0880 \\ 7.0966 \end{bmatrix}$$

Ainda calculamos a média do $\lambda_{\text{máx}}$ obtendo o valor de 7.2896. Deste modo, o valor do índice de consistência é

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} = \frac{7.2896 - 7}{7 - 1} = 0.0483$$

Aplicando a equação 4 obtemos que:

$$RC = \frac{0.0483}{1.32} = 0.0366$$

Como o valor obtido do RC é inferior a 0.1, a matriz de julgamentos é considerada consistente.

Os próximos passos são calcular as matrizes de comparação entre as alternativas A_1 e A_2 para cada critério. Na tabela 24 observa-se o critério C_1 (Preço total) onde a alternativa A_1 é considerada sete vezes mais favorável que A_2 . Esse resultado indica que a empresa A apresenta uma vantagem significativa em relação ao custo total.

Tabela 24 - Matriz do critério C_1 .

Alternativas	A_1	A_2
A_1	1	7
A_2	1/7	1

Por outro lado, a tabela 25 referente aos critérios C_2 (Transmissão de dados por GSM), C_4 (Alarmes por SMS) e C_5 (Frequência de medição), verifica-se que as duas alternativas foram avaliadas como equivalentes. Isso sugere que, para esses critérios A_1 e A_2 possuem desempenhos semelhantes, sem que um se sobressaia sobre o outro.

Tabela 25 - Matriz do critério C_2, C_4 e C_5 .

Alternativas	A_1	A_2
A_1	1	1
A_2	1	1

A tabela 26 apresenta a matriz de comparação para o critério C_3 (Hardware compatível com sondas atuais), onde a alternativa A_1 é nove vezes mais favorável que A_2 .

Tabela 26 - Matriz do critério C_3 .

Alternativas	A_1	A_2
A_1	1	9
A_2	1/9	1

Ainda, na tabela 27, referente ao critério C_6 (Assistência técnica), a alternativa A_1 mantém uma vantagem sobre a A_2 , sendo cinco vezes mais favorável.

Tabela 27 - Matriz do critério C_6 .

Alternativas	A_1	A_2
A_1	1	5
A_2	1/5	1

Por fim, a tabela 28 apresenta a comparação para o critério C₇ (Calibração das sondas), onde A₁ é quatro vezes mais favorável que A₂.

Tabela 28 - Matriz do critério C₇.

Alternativas	A ₁	A ₂
A ₁	1	4
A ₂	1/4	1

Posteriormente são realizados os mesmos cálculos para normalizar cada matriz e obtêm-se os seguintes pesos para cada alternativa de acordo com cada critério na tabela 29.

Tabela 29 - Peso de cada critério em relação a cada alternativa.

Alternativas	Crítérios						
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
A	0.8750	0.5	0.9	0.5	0.5	0.8333	0.8
B	0.1250	0.5	0.1	0.5	0.5	0.1667	0.2

Para terminar realiza-se a multiplicação dos pesos de cada critério (tabela 23) com o peso das alternativas para cada critério (tabela 29) e obteve-se para a Empresa A 0.6298 (63%) e para a Empresa B 0.3702 (37%). Deste modo conclui-se que a Empresa A é a melhor escolha para a aquisição de um *software* de monitorização remota para equipamentos e salas críticos.

6.3. Caso de estudo III

Uma das grandes vantagens da implementação de um *software* de gestão da manutenção é a capacidade de obter Indicadores-chave de desempenho. Esses indicadores permitem uma análise detalhada do desempenho dos equipamentos e dos processos de manutenção, possibilitando a tomada de decisões mais informadas e estratégicas.

Para este caso de estudo, são apresentados três exemplos de KPIs que ajudam a compreender os principais desafios enfrentados na manutenção dos equipamentos do iMM em 2023, nomeadamente:

- Equipamentos com maior número de Manutenções Corretivas
- Principais causas que contribuíram para o atraso das reparações
- Fornecedor responsável pelo maior número de Manutenções Corretivas

Equipamentos com maior número de Manutenções Corretivas

A figura 29 ilustra a quantidade de manutenções corretivas realizadas e estão organizadas por tipo e classificação 1. A partir da observação do gráfico, identificam-se os equipamentos com maior número de intervenções corretivas, respetivamente:

1. Câmaras de Biossegurança Classe 2 (22 intervenções)
2. Arcas/Ultracongeladores -80°C (18 intervenções)
3. Incubadoras de CO₂ (8 intervenções)

Estes equipamentos são essenciais para o funcionamento dos laboratórios do IMM, e a sua utilização contribui significativamente para o seu desgaste. O elevado número de reparações pode ser explicado por três fatores principais:

- Quantidade: uma parte significativa do parque de equipamentos do IMM é composta por estes equipamentos. A título de exemplo, para câmaras de Biossegurança Classe 2 atualmente temos 64 em operação.
- Intensidade de utilização: muitos destes equipamentos funcionam de forma contínua — 24 horas por dia, 7 dias por semana — o que naturalmente aumenta o desgaste e aumenta a probabilidade de falhas.
- Idade: diversos equipamentos já se encontram em utilização há vários anos, o que proporciona falhas mais frequentes e exige um acompanhamento técnico constante.

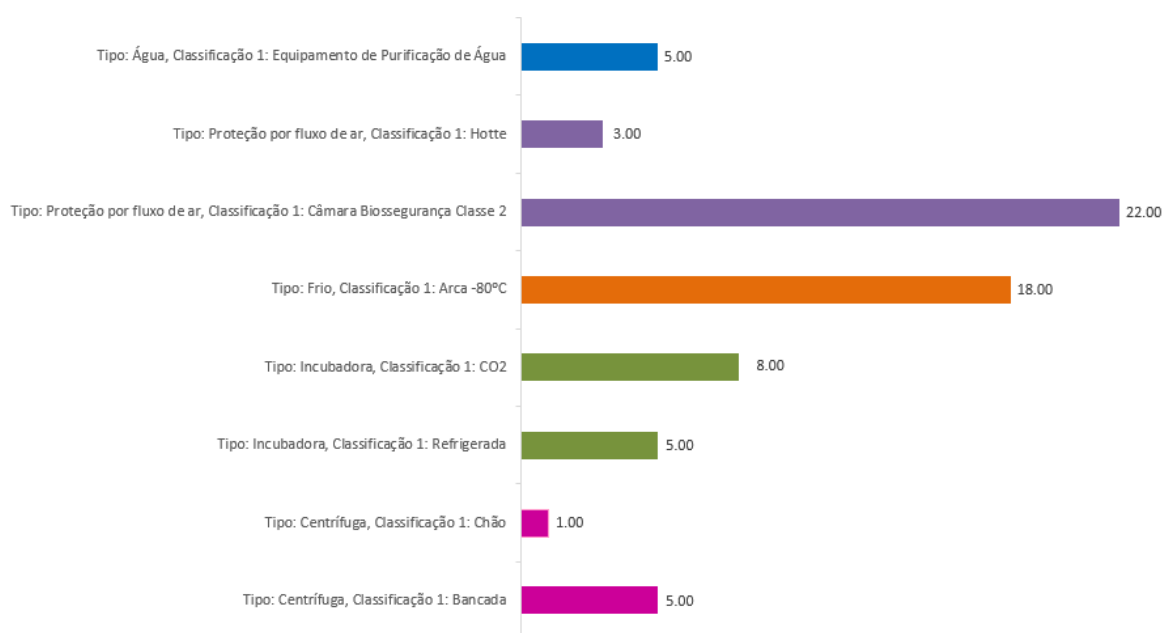


Figura 29 - Manutenções corretivas por Tipo e Classificação 1.

Principais causas que contribuíram para o atraso das reparações

A figura 30 apresenta os fatores que mais contribuíram para o aumento do tempo de reparação dos equipamentos. A causa predominante foi o prazo de entrega das peças, que tem sido significativamente afetado por fatores externos. Nos últimos anos, desafios logísticos globais tornaram-se mais evidentes. Após a pandemia de COVID-19, os prazos de entrega de equipamentos e componentes aumentaram consideravelmente devido a problemas na cadeia de abastecimento. Além disso, conflitos em diferentes regiões do mundo continuam a impactar negativamente a produção e distribuição de peças, dificultando a rápida reposição de componentes essenciais para a manutenção dos equipamentos.

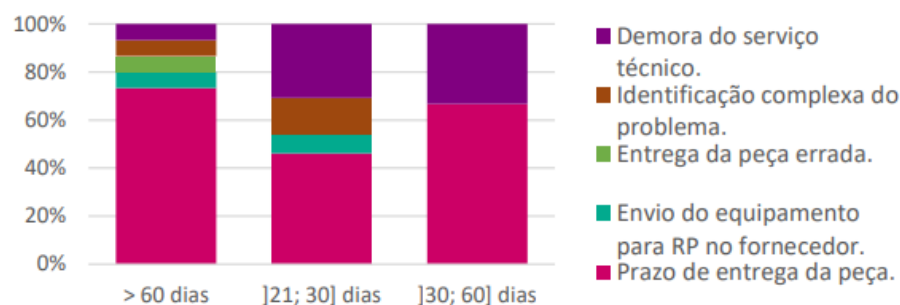


Figura 30 - Causas para demora das reparações.

Estudos confirmam que o prazo de entrega de peças é um dos principais entraves à eficiência da manutenção hospitalar. De acordo com Iadanza et al. (2019), o tempo de inatividade de equipamentos como mesas cirúrgicas e máquinas de anestesia foi significativamente influenciado pela demora na obtenção de peças. As mesas cirúrgicas, em particular, apresentaram maiores tempo médio de reparação (MTTR - *mean time to repair*), atribuídos em grande parte à dependência de acessórios e componentes que requerem reposição frequente.

Esse cenário evidencia como a logística de fornecimento afeta diretamente a disponibilidade de equipamentos críticos, com impacto potencial sobre a segurança do paciente e a continuidade dos serviços clínicos.

Em relação à demora na entrega das peças, soluções como a criação de stocks mínimos estratégicos e o planejamento baseado em dados históricos de falhas podem ser essenciais para mitigar esses problemas.

Neste sentido o Fractal One apresenta um módulo denominado de Armazéns que poderá mitigar estes problemas.

Fornecedor responsável pelo maior número de Manutenções Corretivas

A figura 31 apresenta a relação entre os fornecedores e o volume de manutenções corretivas realizadas. Como esperado, os fornecedores responsáveis pela manutenção dos equipamentos com maior número de avarias também lideram o ranking de intervenções. Os principais fornecedores e seus respectivos equipamentos são:

- Stechcomply - Manutenção e Reparação das câmaras de biossegurança classe 2.
- Caltecnica e Frilabo - Manutenção e Reparação dos ultracongeladores -80°C e incubadoras.

A frequência das intervenções desses fornecedores reflete a necessidade contínua de manutenção desses equipamentos críticos para o funcionamento das operações laboratoriais.

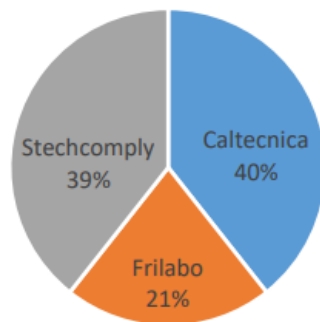


Figura 31 - Fornecedor com maior número de reparações.

Capítulo 7 – Conclusões e Perspetivas Futuras

O método FMEA é normalmente utilizado para melhorar a competitividade de uma empresa, a qualidade da produção, a redução dos custos e os prazos de entrega.

A competitividade do IMM está diretamente ligada à produção de ciência de elevado nível. O armazenamento adequado de amostras biológicas é essencial para garantir a reprodutibilidade e a integridade dos estudos. A análise FMEA permitiu identificar riscos operacionais do ultracongelador, prevenindo falhas que poderiam comprometer a continuidade da pesquisa e afetar o prestígio da instituição. Em relação à qualidade das amostras armazenadas depende da estabilidade das condições de armazenamento, especialmente da temperatura. O FMEA identificou possíveis modos de falha, como variações de temperatura, falha no compressor e variações de energia, permitindo a implementação de medidas preventivas. No que diz respeito à otimização de custos operacionais, a análise indicou que manutenções corretivas geram gastos elevados devido à necessidade de substituição urgente de componentes. Com a implementação de um plano de manutenção preventiva baseado nos riscos identificados, os custos podem ser reduzidos e os investimentos podem ser redirecionados para outras áreas estratégicas do IMM.

A previsibilidade e fiabilidade dos equipamentos são fundamentais para que os planos das pesquisas sejam cumpridos sem atrasos. Falhas inesperadas no ultracongelador podem comprometer experiências em curso, impactando negativamente o tempo de resposta para publicação de estudos e conclusão de projetos. A análise FMEA possibilitou a definição de estratégias que minimizam paragens não programadas, garantindo a continuidade das atividades científicas.

É de salientar que embora o método FMEA seja uma ferramenta robusta, existem algumas limitações que precisam ser reconhecidas, tais como a atribuição das classificações de Ocorrência, Severidade e Detetabilidade que pode ser subjetiva, variando conforme a experiência e o conhecimento dos envolvidos na análise.

Para futuras aquisições de ultracongeladores, seria vantajoso considerar sistemas de refrigeração sem a utilização de compressores. A adoção de tecnologias inovadoras, como os sistemas de refrigeração baseados no motor de pistão livre Stirling, pode trazer benefícios significativos para a gestão de risco e o desempenho operacional. Ao contrário dos sistemas convencionais em cascata, que utilizam dois compressores e funcionam com ciclos de ligar/desligar, os equipamentos com motor Stirling operam por modulação contínua, com um controlo totalmente adaptativo. Esta característica permite uma maior estabilidade térmica e reduz o risco de falhas associadas a variações de temperatura. Adicionalmente, não utilizam gases refrigerantes hidrofluorcarbonetos (HFC) nem óleo. A menor complexidade mecânica

destes sistemas traduz-se numa probabilidade mais baixa de avarias, reduzindo a necessidade de intervenções corretivas. Consequentemente, aumenta a fiabilidade dos equipamentos e prolonga-se a sua vida útil (Stirling Ultracold, n.d.).

A tomada de decisões é um fator crucial para o sucesso de qualquer empresa, sendo essencial para orientar a organização de forma eficaz no presente e no futuro. No contexto da seleção de um *software* de monitorização remota para o iMM, uma análise cuidadosa dos critérios envolvidos foi fundamental para assegurar que a solução escolhida atendesse adequadamente às necessidades operacionais da instituição.

O método AHP foi aplicado para apoiar essa decisão. O AHP é uma ferramenta robusta que permite comparar diferentes alternativas com base em uma série de critérios definidos previamente, utilizando um processo estruturado de julgamento e ponderação. Neste caso específico, os critérios utilizados foram: preço total, transmissão de dados por GSM, compatibilidade de hardware com sondas atuais, alarmes por SMS, frequência de medição, assistência técnica e calibração das sondas.

A atribuição de siglas aos critérios, como mostrado na tabela 20, facilitou a organização e a apresentação dos resultados. Os critérios foram avaliados com base em uma matriz de julgamentos (tabela 21), onde a importância relativa de cada critério foi atribuída de acordo com uma análise crítica, levando em consideração a experiência técnica adquirida durante o estágio no iMM. O método de Saaty foi utilizado para estabelecer uma comparação entre os critérios, resultando em uma matriz de julgamentos ponderada e posteriormente normalizada (tabela 22).

Após a normalização, foi calculado o vetor de prioridades, apresentado na tabela 23, onde os critérios mais importantes foram identificados. A transmissão de dados por GSM (C_2) e os alarmes por SMS (C_4) destacaram-se como os fatores mais relevantes, com 30,57% de peso cada um, seguidos pelo preço total (C_1) com 17,87%. Critérios como hardware compatível com sondas (C_3), assistência técnica (C_6), frequência de medição (C_5) e calibração das sondas (C_7) apresentaram pesos menores, refletindo uma menor influência na decisão final.

A consistência da matriz de julgamentos foi verificada através do cálculo da razão de consistência (RC), que resultou em um valor de 0,0366, inferior ao limiar de 0,1, indicando que a matriz de julgamentos é consistente. Isso reforça a fiabilidade dos resultados obtidos durante o processo de avaliação.

A análise comparativa das alternativas A_1 (empresa A) e A_2 (empresa B) foi realizada para cada critério, resultando em matrizes de comparação que mostraram as preferências relativas entre as alternativas. Por exemplo, no critério de preço total (C_1), a alternativa A_1 foi considerada sete vezes mais favorável que A_2 , enquanto em critérios como transmissão de

dados por GSM (C₂), alarmes por SMS (C₄) e frequência de medição (C₅), ambas as alternativas foram avaliadas de forma equivalente.

Os pesos das alternativas em relação a cada critério foram calculados, conforme apresentado na tabela 29. A multiplicação desses pesos pelos valores obtidos na tabela 23 permitiu a obtenção de uma pontuação final para cada alternativa. A empresa A obteve uma pontuação de 0,6298 (63%), enquanto a empresa B ficou com 0,3702 (37%), indicando que a empresa A é a melhor escolha para a aquisição do *software* de monitorização remota, de acordo com os critérios e a análise realizada.

A implementação do *software* de gestão da manutenção possibilitou a obtenção de indicadores-chave de desempenho, fundamentais para a análise do desempenho dos equipamentos e dos processos de manutenção do iMM em 2023.

Os principais resultados da análise dos KPIs destacam três aspectos. Primeiro, as Câmaras de Biossegurança Classe 2, Ultracongeladores -80°C e Incubadoras de CO₂ foram os equipamentos com mais manutenções corretivas, devido à sua alta utilização, quantidade e idade. Segundo, o maior fator de atraso nas reparações foi o prazo de entrega das peças, exacerbado por problemas logísticos globais. Por fim, Stechcomply, Caltecnica e Frilabo foram os fornecedores responsáveis pela maioria das manutenções corretivas.

Embora o CMMS seja essencial para otimizar os processos de gestão da manutenção, existem alguns problemas comuns que podem dificultar o processo de implementação (Sullivan et al., 2010):

- Escolha inadequada do *software*;
- Formação inadequada dos responsáveis, sobre o uso adequado do CMMS;
- Falta de compromisso na implementação e utilização adequada do CMMS. Deve ser mantido pelo menos um responsável a conduzir e encorajar a utilização continuada.

Além disso, é importante avaliar outros KPIs críticos, como o tempo médio entre reparações (MTTR - *mean time to repair*) e o tempo médio entre falhas (MTBF - *mean time between failures*), que podem fornecer uma visão mais aprofundada ajudando a identificar tendências e otimizar ainda mais os processos de manutenção do iMM.

Capítulo 8 – Referências Bibliográficas

Alsayouf, I. (2007). The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *International Journal of Production Economics*, 105(1), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057>

Assis, R. (2014). *Apoio à decisão em manutenção na gestão de ativos físicos* (2ª ed.). LIDEL.

Balaraju, J., Raj, M. G., & Murthy, C. S. (2019). Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine—A case study. *Journal of Sustainable Mining*, 18(4), 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.08.002>

Bhushan, N., & Rai, K. (2004). *Strategic decision making: Applying the analytic hierarchy process*. Springer.

Cabral, J. P. (2016). *Gestão da manutenção de equipamentos, instalações e edifícios* (4.ª ed.). Lidel.

Carnero, M. C., & Novés, J. L. (2006). Selection of computerised maintenance management system by means of multicriteria methods. *Production Planning & Control*, 17(4), 335–354. <https://doi.org/10.1080/09537280600704085>

Clarke, C. (2005). *Automotive production systems and standardisation: From Ford to the case of Mercedes-Benz* (1ª ed.). Physica-Verlag Heidelberg.

Colin, E. C. (2007). *Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas*. Livros Técnicos e Científicos.

Coughlin, K., & Posencheg, M. A. (2019). Quality improvement methods—Part II. *Journal of Perinatology*, 39(7), 1000–1007. <https://doi.org/10.1038/s41372-019-0382-1>

Cruzan, R. (2020). *Manager's guide to preventive building maintenance*. River Publishers. <https://doi.org/10.1201/9781003151500>

Fernandes, J. M. R., & Rebelato, M. G. (2006). Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA. *Gestão & Produção*, 13(2), 245–259.

Fractal. (n.d.). O que é um software de manutenção? *Fractal*. Acedido a 19 de fevereiro de 2025 em <https://www.fractal.com/pt-br/guias-manutencao/o-que-e-software-de-manutencao>

Gulati, R., & Smith, R. (2009). *Maintenance and reliability best practices* (2nd ed.). Industrial Press.

Godinho, P., Costa, J. P., Fialho, J., & Afonso, R. (2011). Some issues about the application of the analytic hierarchy process to R&D project selection. *Global Business and Economics Review*, 13(1), 26–41.

Hammond, J. S., Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1999). *Smart choices: A practical guide to making better life decisions*. Random House LLC.

Iadanza, E., Gonnelli, V., Satta, F., Gherardelli, M., & Wang, B. (2019). Evidence-based medical equipment management: A convenient implementation. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 57(10), 2215–2230. <https://doi.org/10.1007/s11517-019-02021-x>

Improta, G., Russo, M. A., Triassi, M., Converso, G., Murino, T., & Santillo, L. C. (2018). Use of the AHP methodology in system dynamics: Modelling and simulation for health technology assessments to determine the correct prosthesis choice for hernia diseases. *Mathematical Biosciences*, 299, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2018.03.004>

IPQ – Instituto Português da Qualidade. (2009). *NP EN 13460: Manutenção – Documentação para a manutenção*. Instituto Português da Qualidade.

Itieffe. (n.d.). Refrigerant circuit: The bases. *Itieffe*. Acedido a 4 de setembro de 2024 em <https://www.itieffe.com/en/refrigeration/refrigerant-circuit-the-bases/>

ManWinWin. (n.d.). Como selecionar o software de gestão da manutenção? *ManWinWin*. Acedido a 19 de fevereiro de 2025 em <https://www.manwinwin.com/pt/selecionar-o-software-de-gestao-da-manutencao/>

Mota, M. M. (2023a). Ambiente científico vibrante. *Instituto de Medicina Molecular João Lobo Antunes*. Acedido a 4 de setembro de 2024 em <https://imm.medicina.ulisboa.pt/pt-pt/acerca/imm/#ambiente-cientifico-vibrante>

Mota, M. M. (2023b). Visão, missão e valores. *Instituto de Medicina Molecular João Lobo Antunes*. Acedido a 4 de setembro de 2024 em <https://imm.medicina.ulisboa.pt/pt-pt/acerca/imm/#visao-missao-e-valores>

NP EN 13306. (2021). *Norma Portuguesa - Manutenção - Terminologia de manutenção* (2ª ed.). Instituto Português da Qualidade.

Panasonic Healthcare Co., Ltd. (n.d.). *Service manual: Ultra-low temperature freezer MDF-DU502VH / MDF-DU702VH*. Biomedical Division. Acedido a 4 de setembro de 2024 em <https://www.manualslib.com/manual/1630600/Panasonic-Mdf-Du702vh.html>

Pintelon, L., & Van Puyvelde, F. (1997). Maintenance performance reporting systems: Some experiences. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 3(1), 4–15. <https://doi.org/10.1108/13552519710161508>

Powell, S., Molinolo, A., Masmila, E., & Kaushal, S. (2019). Real-time temperature mapping in ultra-low freezers as a standard quality assessment. *Biopreservation and Biobanking*, 17(2), 139–142. <https://doi.org/10.1089/bio.2018.0108>

Rosales, J. (2023). Antes e depois da implementação de um CMMS. *Fractal*. Acedido a 19 de fevereiro de 2025 em <https://www.fractal.com/pt-br/blog/o-antes-e-depois-de-um-cmms>

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6), 19–43. <https://doi.org/10.1287/inte.24.6.19>

Saaty, T. L. (2004). Decision making – The analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>

Shamayleh, A., Awad, M., & Abdulla, A. O. (2019). Criticality-based reliability-centered maintenance for healthcare. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 26(2), 311–334. <https://doi.org/10.1108/JQME-10-2018-0084>

Sobral, J., Teixeira, D., Morais, H., & Neves, M. (2017). Methodology to assess medical processes based on a Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). In *Proceedings of the 2017 IEEE 5th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ENBENG.2017.7889469>

Stirling Ultracold. (s.d.). Vídeos [Canal YouTube]. YouTube. Acedido a 5 de maio de 2025, em <https://www.youtube.com/@StirlingUltracold/videos>

Sullivan, G. P., Pugh, R., Melendez, A. P., & Hunt, W. D. (2010). *Operations & Maintenance Best Practices – A Guide to Achieving Operational Efficiency (Release 3)*. United States. <https://doi.org/10.2172/1034595>

Taherdoost, H. (2017). *Decision making using the analytic hierarchy process (AHP): A step-by-step approach*. *International Journal of Economics and Management Systems*, 2, 244–250

World Health Organization. (2003). *Medical device regulations: Global overview and guiding principles*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42744>

World Health Organization. (2008). *Maintenance manual for laboratory equipment: Chapter 18*.

Zeleny, M., & Cochrane, J. L. (1982). *Multiple criteria decision making*. McGraw-Hill.

Zhang, Z., & Chu, X. (2011). Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 38(1), 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.046>

Anexos

A.1 – Princípio de refrigeração do ultracongelador -80°C em estudo.

Segundo Itieffe (n.d.), não existem máquinas capazes de produzir frio, mas sim máquinas que retiram calor de fluídos ou corpos (ar, água, metais, etc.), sendo este o princípio básico de funcionamento de um sistema de refrigeração. A figura 32 representa o circuito de refrigeração do equipamento em estudo, com a particularidade de ser um sistema em cascata.

Este sistema é subdividido em dois circuitos independentes que se complementam. Um dos circuitos diz respeito a temperaturas baixas, representado pelas setas *low temp* e é responsável por diminuir a temperatura no interior do equipamento. Por sua vez, o outro circuito é um sistema de temperaturas altas, representado pelas setas *high temp*. Este último tem como função fazer com que o primeiro não tenha uma variação muito grande de temperatura e, ainda, dissipar o calor absorvido. Note-se que é necessário ter um refrigerante dentro do compressor cuja temperatura de solidificação seja bastante baixa, de modo a permitir a sua circulação pelo circuito. No circuito *High*, o respetivo refrigerante começa o percurso no compressor com a letra H. Neste ponto o compressor exerce pressão sobre o refrigerante, o que faz com que este passe de um gás de baixa pressão para um gás de alta pressão, para que o mesmo possa circular no sistema. A partir daqui o gás efetua o seu percurso sempre com tendência de diminuição de temperatura, passando pelo pré-condensador, tubo de armação e condensador. É no condensador que muda de estado gasoso para líquido, porém mantém a sua alta pressão. Em seguida, o líquido depara-se com o desidratador/secador, sendo este responsável por eliminar as partículas de água que vão sendo formadas ao longo do tempo. Após esta etapa, o líquido chega aos tubos capilares onde, novamente, sofre uma diminuição de pressão e, conseqüentemente, de temperatura, até chegar ao condensador em cascata. Neste condensador, os dois circuitos entram em contacto, ou seja, há uma transferência de energia em forma de calor, no sentido de *Low* para *High*. O circuito *Low* funciona de forma semelhante ao circuito *High*, contudo, uma das particularidades é ter um refrigerante diferente. Deste modo, inicia o seu percurso também num compressor (letra L) sendo que, em seguida, atravessa o condensador em cascata dissipando parte da energia sob forma de calor para o sistema *High*. Posteriormente, depara-se com um desidratador seguido de um tubo capilar até chegar ao interior do equipamento. Nesta zona, e dada a temperatura inferior no interior da arca, dá-se início ao arrefecimento da mesma através de um evaporador. Finalmente, o refrigerante segue de volta para o compressor e é repetido o ciclo.

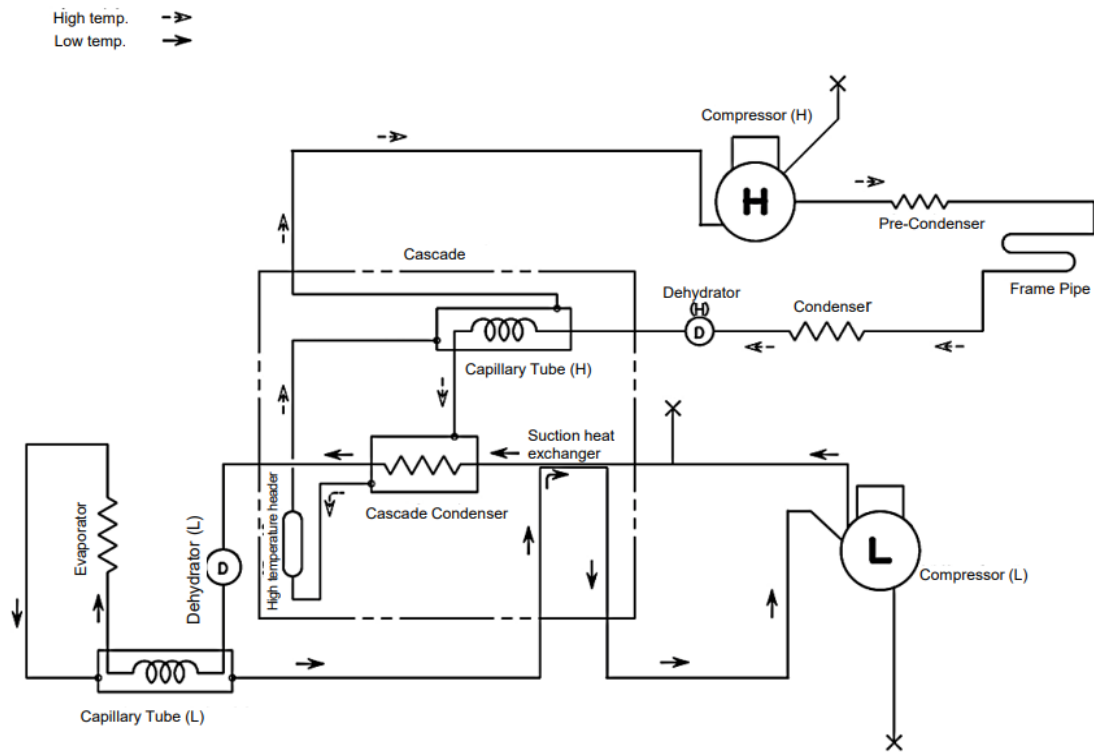


Figura 32 - Representação esquemática do circuito de refrigeração do equipamento em estudo (Panasonic Healthcare, n.d.).