

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA  
SOUZA FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA DE LOGÍSTICA**

**BRAIAN GUIMARÃES SIQUEIRA DOS REIS**

**LOGÍSTICA DOS TRANSPLANTES DE ÓRGÃOS E A INTRODUÇÃO DA INDÚSTRIA  
4.0 NOS PROCESSOS**

**MAUÁ  
2025**

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

**LOGÍSTICA DOS TRANSPLANTES DE ÓRGÃOS E A INTRODUÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0  
NOS PROCESSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à FATEC Mauá, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Tecnólogo em Logística.

Orientador(a): Prof. Me. Nelson Afonso Thomaz

Prof. Orientador: Me. Nelson Afonso Thomaz

MAUÁ - SP  
2025

Autorizo a reprodução e a divulgação deste trabalho, no todo ou em parte, por qualquer meio convencional ou eletrônico, exclusivamente para fins de estudo e pesquisa, desde que a fonte seja citada.

Catálogo-na-Publicação – Biblioteca Fatec Mauá

362.110687

R375L Reis, Braian Guimarães Siqueira dos.

Logística dos transplantes de órgãos e a introdução da indústria 4.0 nos processos / Braian Guimarães Siqueira dos Reis. – 2025.  
48 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Me. Nelson Afonso Thomaz.

Trabalho de conclusão de curso (Curso Superior de Tecnologia em Logística) – Faculdade de Tecnologia de Mauá.

Inclui referências.

1. Transplantes de órgãos. 2. Logística hospitalar. 3. Indústria 4.0. 4. Isquemia fria. 5. Transporte de órgãos. I. Thomaz, Nelson Afonso. II. Título.

CDD 23. : Logística hospitalar 362.110687  
Elaborada por Tatiana Sambinelli CRB-8 SP-011003/O

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE MAUÁ**

**LOGÍSTICA DOS TRANSPLANTES DE ÓRGÃOS E A INTRODUÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0  
NOS PROCESSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à FATEC Mauá, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Tecnólogo em Logística.

Aprovação em: 24/06/2025

---

Prof. Me. Nelson Afonso Thomaz  
FATEC Mauá  
Orientador (a)

---

Prof. Me. Samuel André de Oliveira Neto  
FATEC Mauá  
Avaliador (a)

---

Prof. Me. Douglas Leonardo de Lima  
FATEC Mauá  
Avaliador (a)

Dedico este trabalho aos meus familiares, por sempre me incentivar na constante busca por conhecimento. Sem a insistência de vocês, nada disso teria sido possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Prof. Me. Nelson Afonso Thomaz, pelas orientações e pelo total apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos avaliadores, Prof. Me. Samuel André de Oliveira Neto e Prof. Me. Douglas Leonardo de Lima, por participarem desde momento tão importante.

## RESUMO

O transplante de órgãos é um dos maiores avanços da medicina moderna, proporcionando uma nova chance de vida para milhares de pessoas. No Brasil, que possui o maior sistema público de transplantes do mundo, os processos logísticos desempenham papel essencial para o sucesso dos procedimentos. Este trabalho analisa os principais desafios enfrentados na logística do transporte de órgãos, especialmente no que se refere ao tempo de isquemia fria e às limitações estruturais do país. A pesquisa propõe a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0: Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e automação por meio de drones, como soluções para melhorar a rastreabilidade, reduzir perdas, e garantir maior eficiência e segurança no transporte intraestadual de órgãos para transplante. A metodologia utilizada foi qualitativa, exploratória e bibliográfica, com análises baseadas em dados secundários provenientes de fontes oficiais e literatura científica. Os resultados esperados apontam para a viabilidade do uso de tecnologias emergentes na modernização da logística de transplantes no Brasil, com impactos diretos na redução de tempo, desperdícios e na ampliação da taxa de sucesso dos procedimentos.

**Palavras chaves:** transplante de órgão; logística hospitalar; indústria 4.0; isquemia fria; transporte de órgãos.

## **ABSTRACT**

Organ transplantation is one of the greatest advances in modern medicine, offering a new chance at life for thousands of people. In Brazil, which has the largest public transplant system in the world, logistics processes play a crucial role in the success of procedures. This paper analyzes the main challenges faced in organ transportation logistics, especially regarding cold ischemia time and the country's structural limitations. The research proposes the application of Industry 4.0 technologies—Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and drone-based automation—as solutions to improve traceability, reduce losses, and ensure greater efficiency and safety in the intra-state transport of organs for transplantation. The methodology used was qualitative, exploratory, and bibliographic, with analyses based on secondary data from official sources and scientific literature. The expected results point to the feasibility of using emerging technologies to modernize transplant logistics in Brazil, with direct impacts on reducing time and waste, and increasing the success rate of procedures.

**Keywords:** organ transplantation; hospital logistics; Industry 4.0; cold ischemia; organ transportation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Fluxograma de transplante .....	12
Figura 02 – Tempo para liberação do corpo após a remoção, para a família para a família.....	29
Figura 03 – Simulação de cadastro de doador no sistema de captação de Receptor .....	35
Figura 04 – Simulação de base de dados da fila única nacional.....	35
Figura 05 – Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional aplicando a primeira filtragem .....	35
Figura 06 – Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional aplicando a segunda filtragem.....	36
Figura 07 – Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional analisando as gravidades dos casos.....	36
Figura 08 – Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional analisando a compatibilidade de altura e peso.....	36
Figura 09 – Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional identificando o receptor que está cadastrado a mais tempo .....	36
Figura 10 – Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional identificando o melhor receptor para o órgão .....	37
Figura 11 – Localização geográfica do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU/USP).....	38
Figura 12 – Localização geográfica do Hospital das Clínicas FMUSP.....	39
Figura 13 – Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU/USP) a Hospital das clínicas FMUSP .....	39
Figura 14 – Dados de medições da umidade captados pelo protótipo desenvolvido por Ferrasi.....	42
Figura 15 – Dados de medições de temperatura captados pelo protótipo desenvolvido por Ferrasi .....	42
Figura 16 – Dados de medições de luminosidade captados pelo protótipo desenvolvido por Ferrasi .....	43

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Tempo máximo de isquemia fria por órgãos .....	20
Quadro 02 - Comparativo entre transporte com veículo terrestre .....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Definição do problema</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>13</b>
1.2.1	Objetivo Geral .....	13
1.2.2	Objetivo Específicos .....	13
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Delimitação da pesquisa</b> .....	<b>14</b>
<b>1.5</b>	<b>Estruturação do trabalho</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Transplante de órgãos</b> .....	<b>16</b>
2.1.1	História .....	16
2.1.2	Ética e Bioética no transplante .....	17
2.1.3	Morte Encefálica .....	18
2.1.4	Tempo de isquemia fria e viabilidade dos órgãos .....	19
<b>2.2</b>	<b>Industria 4.0</b> .....	<b>21</b>
2.2.1	Contextualização histórica .....	21
2.2.2	Fundamentos da Indústria 4.0 .....	22
2.2.3	<i>Smart</i> Factories .....	22
2.2.4	Ferramentas da Industria 4.0 .....	23
2.2.4.1	Internet das Coisas (IoT) .....	24
2.2.4.2	Inteligência Artificial (IA) .....	25
2.2.4.3	Automação Logística .....	26
<b>2.3</b>	<b>Introdução da Industria 4.0 nos processos de transplantes</b> .....	<b>27</b>
2.3.1	Internet das Coisas (IoT) aplicada ao monitoramento de órgãos .....	27
2.3.2	Inteligência artificial na triagem de receptor .....	28
2.3.3	Automação e a utilização de Drones no transporte de órgãos .....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Tipo de pesquisa</b> .....	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Procedimentos técnicos adotado</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>Fontes e critérios de seleção</b> .....	<b>32</b>
<b>3.4</b>	<b>Estratégia de Análise</b> .....	<b>32</b>

<b>3.5</b>	<b>Limitações da pesquisa .....</b>	<b>32</b>
<b>3.6</b>	<b>Justificativa metodológica .....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO E RESULTADOS ESPERADOS .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Inteligência artificial na triagem de receptor .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Automação e a utilização de Drones no transporte de órgãos .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3</b>	<b>Internet das Coisas (IoT) aplicada ao monitoramento de órgãos .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>

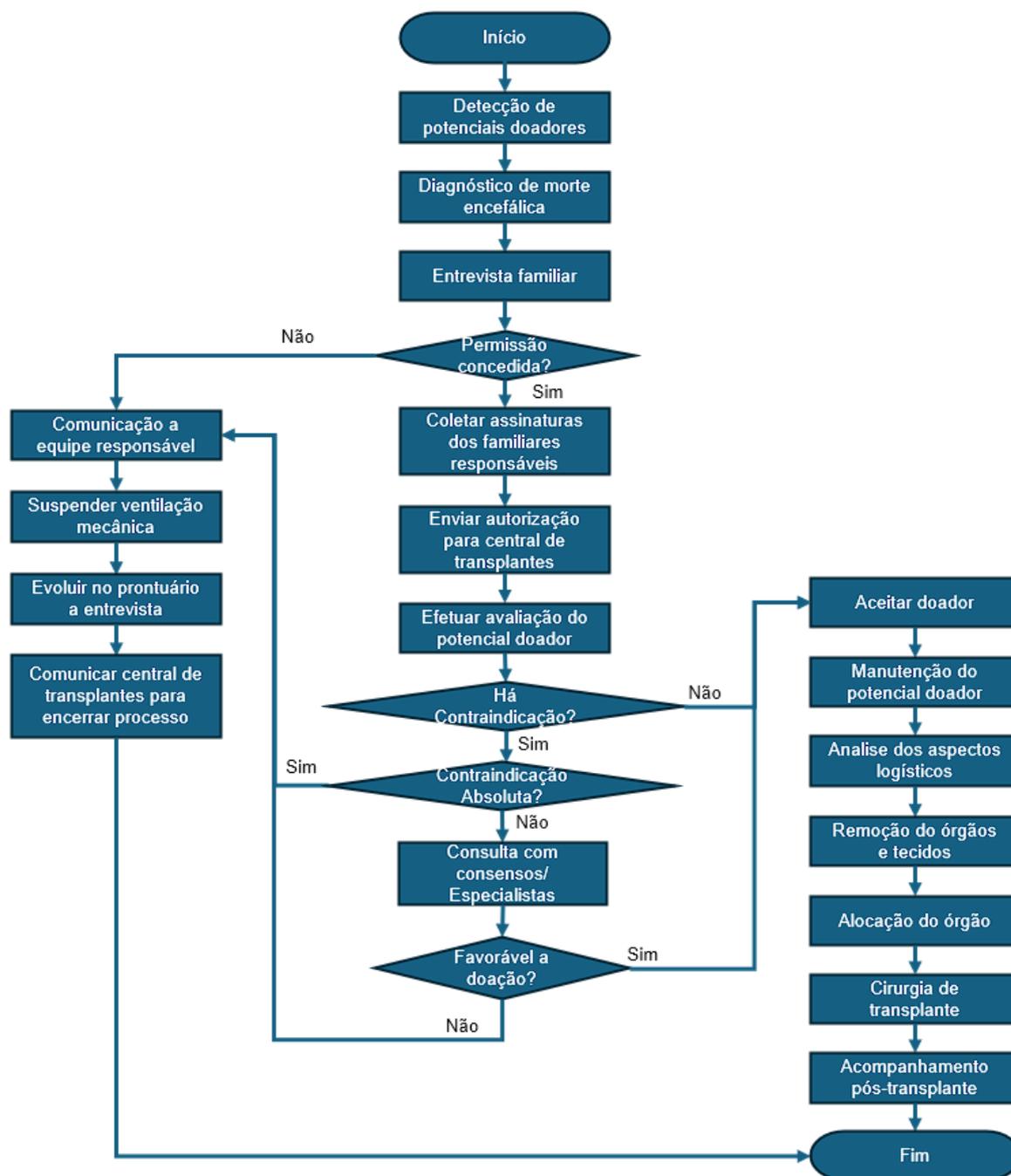
## 1 INTRODUÇÃO

Os transplantes de órgãos representam grandes avanços da medicina, possibilitando a recuperação da qualidade de vida e a sobrevivência de milhares de pessoas com falência terminal de órgãos vitais. No Brasil, esse procedimento é amplamente regulado e conduzido pelo Sistema Nacional de Transplantes (SNT), vinculado ao Ministério da Saúde, garantindo que todo o processo ocorra dentro dos critérios éticos e técnicos (M. S., 2024).

A logística do sistema de doações de órgãos é regida pela Central de Transplantes, departamento responsável por gerenciar a lista de fila única nacional, priorizando critérios como tempo de espera, compatibilidade e gravidade do paciente, evitando privilégios ou comércio ilegal de órgãos (Secretaria da comunicação Social, 2023).

O fluxo do transplante de órgãos no Brasil é altamente organizado e envolve diversas etapas, começando pela identificação do doador, passando pelo pareamento com o receptor, o transporte do órgão e, finalmente, o procedimento cirúrgico e o acompanhamento pós-operatório. (ABTO, 2022). Esse processo é fundamental para assegurar a segurança, rastreabilidade e viabilidade dos órgãos, conforme a figura 1 a seguir:

Figura 1 – Fluxograma de transplante de órgãos



Fonte: ABTO, 2022

Os processos de transplante devem ocorrer de forma padronizada e controlada, respeitando diretrizes técnicas que envolvem desde a retirada do órgão até sua entrega ao receptor. Aspectos como o tempo máximo de isquemia fria, as condições ideais de armazenamento e o transporte especializado são determinantes para o sucesso do procedimento (ANVISA, 2021).

## 1.1 Definição do problema

O transporte inadequado de órgãos para transplantes é um fator crítico, diretamente relacionado à viabilidade do procedimento. O tempo de isquemia, período em que o órgão permanece sem irrigação sanguínea, exige condições rigorosas de temperatura, armazenamento e agilidade no deslocamento. Apesar das diretrizes estabelecidas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), a infraestrutura precária e a ausência de controle térmico adequado durante o transporte ainda representam sérios desafios.

A citação abaixo ilustra a gravidade do problema:

“Ainda hoje, os órgãos são transportados de forma quase artesanal, naqueles coolers encontrados em supermercados, onde colocamos gelo e órgão lá dentro. Em alguns locais, não há nem termômetros para monitorarmos essa temperatura, correndo o risco, entre outros problemas, de o órgão congelar” (Sanches apud UFMG, 2024)

Diante desse cenário, este estudo busca responder à seguinte questão: Como a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 pode otimizar os processos logísticos e o transporte de órgãos para transplantes no Brasil, garantindo eficiência, segurança e redução de perdas durante o processo?

## 1.2 Objetivos

Esta subseção apresenta os objetivos que orientam o desenvolvimento do trabalho. Os objetivos foram divididos em duas categorias para facilitar o entendimento: O objetivo geral estabelece a meta principal do estudo, enquanto os objetivos específicos detalham as etapas para alcançá-la, conforme é apresentado nas subseções a seguir:

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os desafios logísticos dos transplantes no Brasil e propor soluções com base nas tecnologias da Indústria 4.0 para melhorar a eficiência e reduzir perdas no processo.

### 1.2.2 Objetivo Específicos

- Mapear o fluxo atual do transporte de órgãos, identificando os principais gargalos logísticos;

- Analisar como tecnologias da Indústria 4.0 (IoT, automação e inteligência artificial) podem ser aplicadas ao transporte de órgãos;
- Sugerir um modelo de integração tecnológica entre hospitais, centrais de transplantes e equipes de transporte.

### **1.3 Justificativa**

O Brasil possui o maior sistema público de transplantes do mundo, coordenado pelo Sistema Único de Saúde (SUS), que realiza cerca de 86% dos procedimentos no país (Ministério da Saúde, 2024). O país é referência em transplantes de rim, fígado e córneas, mas ainda enfrenta desafios estruturais e logísticos relevantes, que podem comprometer o sucesso do procedimento e resultar na perda de órgãos viáveis (Marinho, 2009).

Entre os principais gargalos, destacam-se a precariedade no armazenamento, o transporte ainda rudimentar, muitas vezes realizado em coolers não padronizados e sem monitoramento térmico, e a falta de integração entre os setores envolvidos - hospitais, centrais estaduais de transplantes e as equipes de transporte (ABTO, 2022; UFMG, 2024).

Diante deste cenário, a inserção das tecnologias da Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT) (Que será explicado no item 2.2.5.1. - Internet das Coisas (IoT)), inteligência artificial e automação logística surgem como alternativas para modernizar e otimizar esse processo, minimizando falhas humanas, reduzindo perdas e aumentando a taxa de sucesso nos transplantes.

Portanto, este trabalho se justifica pela necessidade urgente de detectar soluções inovadoras, visando não apenas o aprimoramento da logística, mas também o impacto direto na vida de milhares de pacientes que aguardam por um transplante.

### **1.4 Delimitação da pesquisa**

Este estudo será delimitado à análise dos processos logísticos de transporte de órgãos para transplantes no estado de São Paulo, com foco nos principais centros doadores: Hospital das Clínicas da FMUSP e Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU/USP). A pesquisa abordará as dificuldades encontradas no deslocamento intraestadual de órgãos, avaliando a possibilidade de integração de tecnologias da Indústria 4.0 para minimizar perdas e aumentar a eficiência logística.

## 1.5 Estruturação do trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em cinco capítulos, elaborados de forma a garantir coerência e progressão temática sobre a logística dos transplantes de órgãos humanos e a introdução das tecnologias da Indústria 4.0 neste contexto, conforme é apresentado abaixo:

- Capítulo 1 – Introdução: Apresenta o tema, a delimitação do problema, os objetivos (geral e específicos), a justificativa da pesquisa e a estrutura do trabalho. Este capítulo fundamenta a importância do estudo e estabelece as diretrizes que orientam todo o desenvolvimento da pesquisa.
- Capítulo 2 – Referencial Teórico: Reúne os principais conceitos e fundamentos teóricos que sustentam a discussão, como logística hospitalar, transplante de órgãos, tecnologias da Indústria 4.0 (IoT, drones, IA), e suas aplicações no contexto da saúde. Este capítulo serve de base para a análise crítica realizada nos capítulos posteriores, estabelecendo o diálogo entre teoria e prática.
- Capítulo 3 – Metodologia: Descreve o tipo de pesquisa (exploratória e qualitativa), os procedimentos adotados (pesquisa bibliográfica e documental) e os critérios de seleção das fontes. Este capítulo é fundamental para garantir a validade científica e a reprodutibilidade do estudo.
- Capítulo 4 – Análise e Discussão dos Resultados: Apresenta os resultados obtidos por meio da análise das fontes e discute a viabilidade da introdução de tecnologias da Indústria 4.0 na logística de transplantes. Explora dados do sistema brasileiro de saúde, desafios operacionais e exemplos práticos de aplicação tecnológica (como o uso de drones e dispositivos inteligentes).
- Capítulo 5 – Considerações Finais: Expõe as conclusões do trabalho, as principais recomendações para o setor público e privado, bem como sugestões para pesquisas futuras. Também inclui a reflexão sobre a aplicabilidade do estudo em outras regiões do Brasil, além da região central de São Paulo, com as devidas adaptações.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica a seguir tem como objetivo apresentar os principais fundamentos teóricos relacionados ao transplante de órgãos no Brasil, abordando temas essenciais como a definição do transplante, critérios para diagnóstico de morte encefálica, aspectos éticos e bioéticos, além dos direitos dos familiares envolvidos no processo. Também são discutidos os órgãos passíveis de doação, os tempos de isquemia fria, os fluxos logísticos intraestaduais e o papel de instituições de referência, como o Hospital das Clínicas da USP.

Além disso, o capítulo analisa os desafios estruturais e operacionais do sistema atual de transplantes, especialmente no que se refere à logística de transporte, responsável por perdas significativas de órgãos viáveis. Essas informações servem de base para a proposta central deste trabalho: demonstrar como tecnologias da Indústria 4.0, como IoT, inteligência artificial e automação logística, podem ser aplicadas para aprimorar os processos que envolvem o sistema nacional de transplantes.

### **2.1 Transplante de órgãos**

O transplante de órgãos é um procedimento cirúrgico de alta complexidade que consiste na substituição de um órgão ou tecido com comprometimento funcional por outro saudável, proveniente de um doador vivo ou falecido com diagnóstico confirmado de morte encefálica. Esse procedimento é amplamente reconhecido como uma das maiores conquistas da medicina moderna, sendo capaz de restaurar a função vital e prolongar significativamente a vida de pacientes com doenças terminais, especialmente nos casos de insuficiência renal, hepática, cardíaca e pulmonar (M. S., 2024; ABTO, 2022).

Além de ser um procedimento clínico, o transplante também representa uma intervenção social de grande impacto, pois reduz a morbimortalidade e melhora significativamente a qualidade de vida dos pacientes transplantados, permitindo seu retorno ao convívio familiar e social.

#### **2.1.1 História**

Os registros mais antigos de tentativas de transplante remontam à Antiguidade. Há evidências de que os egípcios e os romanos experimentaram formas rudimentares de substituição de tecidos, especialmente enxertos de pele. No entanto, essas práticas eram limitadas pelo desconhecimento da compatibilidade biológica e frequentemente resultavam

em falhas (Starzl, 1992).

Na Idade Média, os médicos começaram a explorar a possibilidade de transplantes de tecidos, principalmente enxertos de pele, para tratar feridas e deformidades. Um dos primeiros relatos bem documentados é atribuído a Gaspare Tagliacozzi, cirurgião italiano do século XVI, que realizou enxertos de pele utilizando tecidos do próprio paciente. Seu trabalho deu os primeiros indícios de rejeição imunológica, permitindo observar que tecidos transplantados de outra pessoa não eram aceitos pelo organismo receptor (Michler, 1996).

O primeiro passo decisivo para que os transplantes atingissem o patamar atual ocorreu no início do século XX, impulsionado pela descoberta dos grupos sanguíneos por Karl Landsteiner (1901, *apud* CHANDRA D; *et. al.*, 2013). Esse marco permitiu que médicos compreendessem a necessidade da compatibilidade entre doador e receptor, um fator essencial para o sucesso dos transplantes.

Na década de 1930, ocorreram algumas das primeiras tentativas de transplante renal em animais e humanos. Em 1933, o cirurgião russo Yurii Voronoy realizou o primeiro transplante de rim humano de um doador falecido, mas a incompatibilidade imunológica resultou na falha do enxerto (Rao *et al.*, 2012).

A partir da década de 1950, os transplantes começaram a apresentar melhores resultados. O primeiro grande sucesso ocorreu em 1954, quando o cirurgião Joseph Murray realizou um transplante de rim entre gêmeos idênticos, eliminando o risco de rejeição imunológica (Murray, 1992).

Um dos maiores desafios dos transplantes era a rejeição imunológica, já que o sistema imune do receptor identificava o órgão transplantado como corpo estranho. Esse problema começou a ser solucionado com o desenvolvimento dos imunossupressores.

Na década de 1970, o pesquisador Sir Roy Calne e sua equipe introduziram a ciclosporina, um medicamento revolucionário que reduziu significativamente a rejeição de órgãos transplantados (Calne *et al.*, 1978). Com essa descoberta, os transplantes passaram a apresentar altas taxas de sucesso, tornando-se procedimentos viáveis em larga escala.

### 2.1.2 Ética e Bioética no transplante

O transplante de órgãos levanta diversas questões éticas e bioéticas que envolvem desde a doação e alocação justa dos órgãos até o consentimento dos familiares. Os dilemas éticos surgem da necessidade de equilibrar a vida dos receptores com os direitos dos doadores, especialmente em casos de morte encefálica.

A bioética é um campo que busca aplicar princípios éticos às questões médicas e

biológicas, especialmente em casos complexos como o transplante de órgãos. Os quatro princípios fundamentais da bioética, segundo Beauchamp e Childress (2019), são:

1. Autonomia – O direito do paciente (ou da família) de tomar decisões informadas sobre a doação e o recebimento de órgãos;
2. Beneficência – O dever de maximizar os benefícios para o receptor e garantir a eficácia do procedimento;
3. Não maleficência – Evitar danos ao doador e ao receptor, garantindo segurança no processo;
4. Justiça – Distribuição equitativa de órgãos, garantindo que os critérios de seleção sejam justos e éticos.

No Brasil, o modelo vigente exige consentimento familiar após a confirmação da morte encefálica, conforme estabelecido pela legislação nacional e pelo Conselho Federal de Medicina (CFM, 2017). Mesmo que a pessoa tenha registrado sua vontade de doar, a autorização da família é obrigatória. Esse modelo respeita os direitos familiares, mas pode dificultar a doação diante da negativa por motivos culturais, religiosos ou por falta de informação (Morais & Moraes, 2012).

Algumas famílias têm dificuldade em aceitar a morte encefálica como morte real, o que pode gerar resistência à doação. Casos reais mostram como esses dilemas afetam a sociedade. O exemplo da americana Jahi McMath, diagnosticada com morte encefálica em 2013 nos EUA, ilustra isso. Mesmo após a confirmação clínica, a família recusou-se a desligar os aparelhos, mantendo a jovem conectada por anos, o que provocou intensos debates sobre os limites entre vida e morte e os critérios éticos da doação (Shewmon, 2021).

### 2.1.3 Morte Encefálica

A morte encefálica é um dos conceitos mais relevantes no contexto dos transplantes de órgãos, pois permite que órgãos vitais sejam doados enquanto ainda estão em condições ideais para o transplante. No entanto, seu reconhecimento e aceitação enfrentam desafios médicos, éticos e culturais, especialmente no que se refere à compreensão social do conceito de morte (Fins, 2015; Moraes & Moraes, 2012).

A morte encefálica ocorre quando há perda irreversível da função cerebral, incluindo a capacidade de manter funções vitais sem suporte artificial. Ou seja, ainda que o coração continue batendo com ajuda de ventilação mecânica, o cérebro não apresenta atividade elétrica ou metabólica (Conselho Federal de Medicina, 2017). Diferente do coma

ou do estado vegetativo persistente, o qual ainda há alguma atividade cerebral, a morte encefálica significa que o paciente está morto do ponto de vista médico, legal e ético (Harvard Medical School, 1968).

O conceito ganhou reconhecimento global com a publicação do Relatório de Harvard, em 1968, que estabeleceu critérios clínicos e técnicos para sua determinação. Desde então, países criaram protocolos rigorosos para evitar diagnósticos incorretos (Harvard Medical School, 1968).

No Brasil, os critérios oficiais estão definidos na Resolução nº 2.173/2017 do Conselho Federal de Medicina (CFM), que estabelece as seguintes etapas para confirmação da morte encefálica:

1. Presença de lesão encefálica irreversível, como traumatismo craniano, AVC extenso ou anóxia cerebral;
2. Ausência completa dos reflexos do tronco encefálico, como resposta pupilar à luz e reflexo de tosse;
3. Realização de exames clínicos por dois médicos independentes, incluindo o teste de apneia;
4. Confirmação por exames complementares, como eletroencefalograma ou doppler transcraniano, comprovando a ausência total de atividade cerebral.

A confirmação da morte encefálica representa um momento crucial para a doação de órgãos, pois órgãos como coração, pulmões, fígado, rins, pâncreas e intestino só podem ser obtidos de doadores com esse diagnóstico. Após a parada cardíaca, o fluxo sanguíneo cessa quase imediatamente, comprometendo a viabilidade dos órgãos (ABTO, 2022).

#### 2.1.4 Tempo de isquemia fria e viabilidade dos órgãos

Após a liberação dos familiares para o transplante, vem um dos pontos mais críticos de toda a operação: o tempo de isquemia fria. Esse termo refere-se ao período em que um órgão é mantido a baixas temperaturas (geralmente entre 0°C e 4°C), sem circulação sanguínea, entre a retirada do doador e a implantação no receptor (ABTO, 2022). Quanto menor o tempo de isquemia, maiores são as chances de sucesso, pois a deterioração celular ocorre de forma contínua, mesmo com refrigeração (Sánchez-Fueyo *et al.*, 2020).

Cada órgão possui um tempo máximo de isquemia fria aceitável, além do qual sua função pode ser severamente comprometida. Isso influencia diretamente a logística do transplante, definindo a velocidade necessária para transporte, recepção e implantação do

órgão.

A Associação brasileira de transplantes de órgãos apresenta os tempos máximos aproximados de isquemia fria que cada órgão pode ser disposto, representado abaixo em formato de tabela:

**Quadro 1** - Tempo máximo de isquemia fria por órgãos

Órgão	Tempo Máximo de Isquemia Fria
Coração	4 a 6 horas
Pulmão	4 a 8 horas
Intestino	6 a 8 horas
Fígado	12 a 18 horas
Pâncreas	12 a 24 horas
Rins	24 a 36 horas

Fonte: ABTO, 2022

Durante a isquemia fria, a falta de oxigênio e nutrientes leva à degradação progressiva do tecido, o que pode afetar a função do órgão transplantado. Esse processo ocorre em três fases principais (Calne *et al.*, 1978):

1. Fase Inicial: A redução de temperatura desacelera o metabolismo celular e retarda a morte celular imediata;
2. Fase de Armazenamento: Mesmo em frio, danos celulares acumulam-se com o tempo;
3. Fase de Reperfusão: Ao reestabelecer o fluxo sanguíneo, ocorre a lesão por reperfusão, caracterizada por uma resposta inflamatória intensa nas células previamente afetadas.

Estes estudos demonstram que o prolongamento do tempo de isquemia fria aumenta os riscos de complicações como disfunção primária do enxerto, rejeição aguda e necessidade de suporte pós-transplante (diálise ou ventilação mecânica, por exemplo).

Um estudo de Sánchez-Fueyo *et al.* (2020) revelou que pacientes que receberam um fígado com menos de 10 horas de isquemia fria apresentaram uma sobrevida 20% superior em comparação àqueles que receberam órgãos com isquemia prolongada.

Para minimizar os danos, têm sido adotadas estratégias avançadas como a perfusão normotérmica, que mantém os órgãos viáveis por mais tempo com circulação contínua de soluções nutritivas em temperatura corporal, além da melhoria nos processos logísticos e no transporte especializado (Starzl, 1992; França, 2023).

## 2.2 Indústria 4.0

As Revoluções Industriais podem ser definidas como um conjunto de transformações econômicas, tecnológicas e sociais que alteraram profundamente os modos de produção e de organização do trabalho. Essas mudanças foram impulsionadas, inicialmente, pela introdução de novas máquinas, pela utilização da energia a vapor e pela mecanização da produção, substituindo o trabalho manual artesanal pelo sistema fabril (Ballou, 2006).

Mais do que um fenômeno tecnológico, as revoluções industriais promovam uma reorganização das estruturas sociais e econômicas, intensificando a urbanização, a formação de novas classes sociais, como o proletariado industrial, e inaugurando o capitalismo industrial moderno (Hobsbawm, 2016).

As revoluções industriais são divididas em quatro grandes fases: Indústria 1.0, 2.0, 3.0 e 4.0, cada uma marcada por inovações tecnológicas disruptivas que transformaram profundamente os sistemas produtivos, os meios de transporte e comunicação, e a própria estrutura da sociedade. Segundo Schwab (2016), essas etapas não apenas aumentaram a eficiência industrial, mas também estabeleceram as bases para o mundo interconectado e digital em que vivemos hoje.

### 2.2.1 Contextualização histórica

A história da produção industrial é marcada por sucessivas revoluções tecnológicas que transformaram profundamente a economia e a sociedade. A Primeira Revolução Industrial, iniciada no século XVIII, trouxe a mecanização da produção por meio da energia a vapor, rompendo com o modelo artesanal tradicional (Hobsbawm, 2016).

A Segunda Revolução Industrial, no final do século XIX, consolidou o uso da eletricidade e da produção em massa, introduzindo linhas de montagem e elevando a produtividade industrial a níveis sem precedentes (CNI, 2016).

A partir da década de 1970, a Terceira Revolução Industrial impulsionou a automação com o advento da eletrônica, informática e telecomunicações, permitindo fábricas mais inteligentes e processos globais integrados (Ballou, 2006).

Hoje, vive-se a Quarta Revolução industrial, que se caracteriza pela fusão de tecnologias digitais, físicas e biológicas. Através de Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial (IA) e sistemas ciberfísicos, a Indústria 4.0 cria ambientes produtivos inteligentes e interconectados, capazes de analisar dados em tempo real e de tomar decisões autônomas (CNI, 2016).

Essa nova fase transcende o setor manufatureiro, influenciando a saúde, a

agricultura, a logística e o cotidiano das pessoas, configurando uma verdadeira transformação sistêmica na maneira como produtos e serviços são concebidos, fabricados e distribuídos.

### 2.2.2 Fundamentos da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 representa a quarta fase da Revolução Industrial e caracteriza-se pela integração de tecnologias digitais, físicas e biológicas aos processos produtivos, proporcionando maior autonomia, inteligência e flexibilidade às cadeias de produção. Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2016), a Indústria 4.0 promove uma nova lógica de manufatura, no qual fábricas, máquinas, produtos e pessoas se comunicam de forma interligada e descentralizada.

De acordo com Tessarini *et al.* (2018), a Indústria 4.0 é marcada pela convergência de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data, Computação em Nuvem, Inteligência Artificial (IA) e sistemas ciberfísicos, resultando em processos altamente personalizados, adaptáveis e conectados em tempo real.

Além disso, conforme análise de Lima F. e Gomes R. (2020), a Indústria 4.0 ultrapassa a simples automação industrial, pois estabelece ambientes inteligentes nos quais as decisões são tomadas com base em análises de dados automatizadas, ampliando a eficiência e possibilitando novos modelos de negócios.

No Brasil, o avanço da Indústria 4.0 é considerado estratégico para o aumento da competitividade industrial e para a inserção do país nas cadeias globais de valor. (CNI, 2016; Tessarini *et al.*, 2018).

### 2.2.3 *Smart Factories*

As *Smart Factories* ou Fabricas inteligentes é um conceito central da Indústria 4.0, caracterizado pela combinação de tecnologias digitais avançadas para criar um ambiente de produção altamente flexível, autônomo e auto-organizado.

Segundo Hozdić (2015), uma *Smart Factory* é um sistema de manufatura ciberfísico em que máquinas, dispositivos, sensores e pessoas estão totalmente interligados por meio da Internet das Coisas (IoT) e comunicam-se de forma contínua, promovendo eficiência máxima, adaptabilidade e otimização dos processos.

As principais características de uma *Smart Factory*, conforme Hozdić (2015), incluem:

- Comunicação em tempo real entre todos os componentes da fábrica;
- Monitoramento contínuo de produtos e processos via sensores inteligentes;
- Tomada de decisão autônoma baseada em dados coletados em tempo real;
- Adaptação dinâmica às mudanças no ambiente interno e externo.

Para Herrmann *et al.* (2018), as *Smart Factories* representam um novo paradigma produtivo que integra tecnologias como:

- Sistemas Ciberfísicos (CPS), para controlar e monitorar processos físicos;
- Internet das Coisas (IoT), conectando dispositivos, produtos e infraestruturas;
- Big Data e Analytics, para análise massiva de dados gerados pela operação;
- Inteligência Artificial (IA), para aprendizado e otimização automatizada.

Conforme os autores, essas fábricas são capazes de:

- Antecipar falhas, realizar manutenção preditiva e reduzir desperdícios;
- Personalizar a produção em grande escala (mass customization);
- Melhorar a eficiência energética e otimizar o uso de recursos.

A *Smart Factory* não apenas transforma o chão de fábrica, mas utiliza as ferramentas de tecnologias atuais e redefinem toda a gestão da produção, criando ambientes de manufatura adaptáveis, auto-otimizáveis e resilientes às mudanças rápidas do mercado (Herrmann *et al.*, 2018).

#### 2.2.4 Ferramentas da Indústria 4.0

A transformação promovida pela Indústria 4.0 é viabilizada por um conjunto de tecnologias habilitadoras que redefinem a forma como as empresas produzem, distribuem e se relacionam com o mercado. Dentre essas ferramentas, destacam-se: a Internet das Coisas (IoT), a Inteligência Artificial (IA) e os avanços em automação.

Cada uma dessas tecnologias desempenha um papel estratégico na construção de fábricas inteligentes, cadeias produtivas conectadas e processos operacionais mais eficientes, flexíveis e resilientes.

A Internet das Coisas (IoT) possibilita a conectividade entre dispositivos físicos e sistemas digitais, permitindo a coleta massiva de dados e a integração em tempo real de operações industriais. (CGEE, 2022).

A Inteligência Artificial (IA) contribui para a análise preditiva de dados, a otimização de processos, o suporte à tomada de decisões autônomas e a adaptação dinâmica das

operações, desempenhando um papel essencial na capacidade de autoaprendizado dos sistemas produtivos (CGEE, 2022).

A automação, por sua vez, envolve a aplicação de tecnologias avançadas para gerenciar, movimentar e distribuir produtos de maneira mais ágil e inteligente, utilizando robótica, veículos autônomos, sistemas de gestão de armazéns automatizados (WMS) e integração de plataformas digitais (CGEE, 2022).

#### 2.2.4.1 Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) é a rede de objetos físicos conectados à internet, capazes de coletar, transmitir e atuar sobre dados, proporcionando automatização, eficiência e monitoramento em tempo real de processos, ambientes e produtos (Gokhale *et al.* 2018).

De acordo com Gokhale *et al.* (2018), a IoT constitui um ecossistema onde sensores, atuadores, softwares e redes de comunicação que interagem entre si para tornar ambientes físicos mais inteligentes e responsivos. Esses sistemas permitem o usuário monitorar ambientes industriais e urbanos continuamente, automatizando decisões operacionais com base em dados coletados e assim aumentar a eficiência de recursos e reduzir desperdícios.

Para Gokhale *et al.* (2018), os principais elementos da IoT incluem:

- Sensores e dispositivos inteligentes: responsáveis pela coleta contínua de informações do ambiente físico;
- Redes de comunicação: transmitem os dados para plataformas de processamento (Wi-Fi, Bluetooth, LPWAN, 5G);
- Plataformas de análise e processamento: onde os dados são organizados, processados e utilizados para ações automáticas;
- Atuadores e sistemas de decisão autônoma: que reagem em tempo real com base nas análises.

Entretanto, como ressaltam Kranenburg e Bassi (2011), a expansão da IoT também impõe desafios éticos e sociais. A coleta massiva de dados pessoais e industriais levanta preocupações sobre segurança da informação, privacidade e responsabilidade tecnológica, exigindo a criação de normas claras, governança transparente e regulamentações internacionais que protejam os usuários e assegurem o uso ético dessas tecnologias.

Assim, para que o potencial revolucionário da IoT se realize de forma sustentável,

será fundamental equilibrar inovação tecnológica com responsabilidade ética, garantia de direitos fundamentais e promoção de um ecossistema digital seguro e confiável.

#### 2.2.4.2 Inteligência Artificial (IA)

A Inteligência Artificial (IA) é uma das ferramentas mais revolucionárias da Indústria 4.0, responsável por proporcionar autonomia decisória, análise preditiva de dados e otimização contínua dos processos industriais e logísticos.

Segundo Nunes, Lucon e Wolkart (2020), a IA pode ser entendida como o ramo da ciência da computação que busca criar sistemas capazes de simular capacidades humanas como aprender, raciocinar, perceber, adaptar-se e tomar decisões. Ao contrário dos sistemas tradicionais de programação, que executam tarefas previamente definidas, os sistemas de IA são dotados de capacidade de aprendizado e autonomia progressiva.

De acordo com Gomes (2017), a IA é estruturada a partir de conceitos como:

- Aprendizado de máquina (machine learning): sistemas que melhoram seu desempenho a partir da experiência adquirida;
- Redes neurais artificiais: modelos matemáticos inspirados no funcionamento do cérebro humano para reconhecer padrões;
- Sistemas especialistas: programas capazes de simular a decisão humana em áreas específicas do conhecimento;
- Processamento de linguagem natural (NLP): habilidade das máquinas de compreender e gerar linguagem humana.

Já para contexto da Indústria 4.0, Gomes (2017), destaca o uso da Inteligência Artificial para:

- Análise preditiva de dados: antecipar falhas de produção ou comportamento do mercado;
- Otimização de processos industriais: reduzindo custos e aumentando a eficiência;
- Automatização de decisões operacionais: sem a necessidade de intervenção humana direta;
- Desenvolvimento de sistemas de produção autônomos: adaptáveis a condições dinâmicas de demanda.

Tendo em vista a competitividade industrial do mercado atual, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2022), destaca o quão a IA se tornou uma ferramenta

essencial, informando também que setores como: Manufatura, Logística, Energia e Saúde, são os que mais podem se beneficiar da utilização desta ferramenta.

#### 2.2.4.3 Automação Logística

A automação é outro pilar fundamentais da Indústria 4.0, consistindo na aplicação de tecnologias que permitem a execução de processos de forma autônoma, minimizando a intervenção humana e maximizando a eficiência operacional. Segundo Freitas *et al.* (2016), a automação industrial é caracterizada pela utilização de sensores, sistemas computacionais, redes de comunicação e dispositivos robóticos que, integrados, garantem a otimização de tarefas repetitivas, a redução de erros e o aumento da produtividade.

Entre os principais benefícios da automação, Freitas *et al.* (2016) destacam:

- Redução de custos operacionais: processos automatizados tendem a demandar menos recursos humanos e energia;
- Melhoria da qualidade dos produtos e serviços: devido à padronização e controle rigoroso das etapas produtivas;
- Aumento da segurança no trabalho: ao retirar operadores de atividades de risco;
- Maior velocidade e precisão nas operações logísticas e industriais;
- Capacidade de operar 24 horas por dia, elevando a capacidade produtiva.

Conforme aponta Vazquez *et al.* (2024), na logística, a automação possibilita o controle preciso de fluxos de materiais, a rastreabilidade em tempo real de mercadorias e a adaptação rápida a mudanças na demanda.

Dentro desse contexto de inovação, os drones surgem como uma ferramenta avançada de automação logística. De acordo com Silva *et. al* (2024), os drones, veículos aéreos não tripulados, vêm sendo incorporados à logística para executar tarefas de entrega, inspeção, monitoramento e coleta de informações, principalmente em operações de alta urgência ou locais de difícil acesso.

Conforme Moura (2023), os drones possuem um grande potencial para a Indústria Marítima, auxiliando com monitoramento de equipamento, auxílio na segurança das operações e teste da qualidade do ar. Porém, além disso, podemos aplicar os drones em outros âmbitos, desde o seguimento industrial comum, até o da Saúde, por exemplo.

Segundo Silva *et. al.* (2024), algumas das aplicações de drones na logística são:

- Redução do tempo de entrega, especialmente na chamada "última milha";
- Acesso facilitado a áreas remotas, urbanas congestionadas ou zonas de risco;

- Monitoramento eficiente de grandes estoques, armazéns e pátios logísticos;
- Diminuição de custos de transporte, principalmente em pequenas cargas e entregas especializadas;
- Sustentabilidade ambiental, por utilizarem energia elétrica e reduzirem a emissão de carbono;
- Flexibilidade operacional, adaptando rotas e cargas conforme a necessidade em tempo real.

Além disso, o uso de drones contribui para melhorar a segurança de operações logísticas, reduzindo a exposição de trabalhadores a áreas perigosas, e potencializa a gestão integrada da cadeia de suprimentos no ambiente digitalizado da Indústria 4.0 (Vazquez *et al.* 2024).

## **2.3 Introdução da Indústria 4.0 nos processos de transplantes**

O sistema de transplantes de órgãos no Brasil, apesar de estruturado e consolidado em termos clínicos e organizacionais, ainda enfrenta obstáculos significativos, especialmente no que se refere à logística e à gestão eficiente do tempo, fatores que influenciam diretamente na taxa de sucesso dos procedimentos. Segundo Lottenberg *et al.* (2019), tecnologias emergentes como a Internet das Coisas (IoT), a Inteligência Artificial (IA) e os sistemas ciberfísicos têm o potencial de transformar os processos e saúde, tornando-os mais precisos, seguros e sustentáveis.

Com base em Schwab (2016), as tecnologias da Indústria 4.0 não apenas automatizam tarefas, mas criam sistemas autônomos capazes de tomar decisões baseadas em dados em tempo real. Esse avanço tecnológico pode ser incorporado diretamente à cadeia de transplantes, otimizando desde o pareamento entre doadores e receptores até o monitoramento das condições ambientais dos órgãos durante o transporte.

### **2.3.1 Internet das Coisas (IoT) aplicada ao monitoramento de órgãos**

A Internet das Coisas (IoT) é uma das tecnologias mais impactantes da Indústria 4.0, proporcionando a conexão entre objetos físicos e sistemas digitais por meio de sensores inteligentes, redes de comunicação e softwares de análise. De acordo com Lottenberg *et al.* (2019), essa tecnologia permite automatizar o monitoramento de processos críticos em tempo real, integrando dados que viabilizam decisões rápidas e

precisas, especialmente em ambientes como a área da saúde, no qual a rastreabilidade e a integridade das condições são fundamentais para o sucesso das operações clínicas.

Com a aplicação desta ferramenta nos processos, se tornaria possível conectar objetos físicos como caixas térmicas inteligentes, veículos de transporte, e sistemas hospitalares por meio de sensores e redes sem fio. Esses dispositivos permitiriam o acompanhamento em tempo real da localização, temperatura e condições ambientais dos órgãos transportados, assegurando que permaneçam dentro dos parâmetros ideais durante todo o percurso. Essa rastreabilidade contribuirá para mitigar riscos relacionados à isquemia fria e à deterioração do órgão (Lottenberg, *et al*, 2019).

No Brasil, estudos aplicados como o de Ferrasi (2023) demonstram a viabilidade de sistemas de IoT para o monitoramento de variações ambientais durante o transporte de órgãos, com sensores capazes de emitir alertas automáticos em caso de falhas térmicas, violação do recipiente ou atraso no trajeto. Esses dados, quando integrados a plataformas digitais, permitem que as centrais de transplantes tomem decisões rápidas, reprogramem rotas e preservem a qualidade do órgão até sua chegada ao receptor.

O grande diferencial da IoT está na sua capacidade de gerar dados contínuos e estruturados, que podem ser utilizados para alimentar sistemas de inteligência artificial, criando um ecossistema preditivo e responsivo em tempo real (Schwab, 2016). No contexto dos transplantes, isso representa um avanço crucial, permitindo um nível de controle antes impossível, especialmente em situações críticas de emergência.

### 2.3.2 Inteligência artificial na triagem de receptor

A Inteligência Artificial (IA) vem se consolidando como uma das tecnologias mais promissoras da Indústria 4.0 devido ao seu alto empenho, já sendo utilizando em diversos setores das empresas. De acordo com o CGEE (2022), a IA possibilita o processamento de grandes volumes de dados de forma autônoma, tornando-se uma estratégia em sistemas de alta complexidade como os transplantes de órgãos.

No processo de triagem de receptores, a IA atuaria por meio de algoritmos treinados para cruzar dados clínicos, laboratoriais e logísticos, auxiliando na seleção do paciente mais adequado para receber determinado órgão. Conforme é apontado por Lottenberg *et al.* (2019), essa tecnologia permite que fatores como compatibilidade imunológica, urgência médica, tempo de espera na fila e até prognósticos pós-operatórios sejam analisados simultaneamente, com maior rapidez e confiabilidade do que a análise exclusivamente humana.

Utilizando o projeto do CGEE (2022) como base, seria possível a integrar a IA aos

bancos de dados nacionais de transplantes, permitindo ampliar a equidade no sistema, eliminando vieses na tomada de decisão e assim garantir que critérios técnicos prevaleçam. Além disso, é de se considerar aspectos logísticos, como distância entre o doador e o receptor e tempo máximo de isquemia fria, tornando a distribuição mais eficiente e precisa.

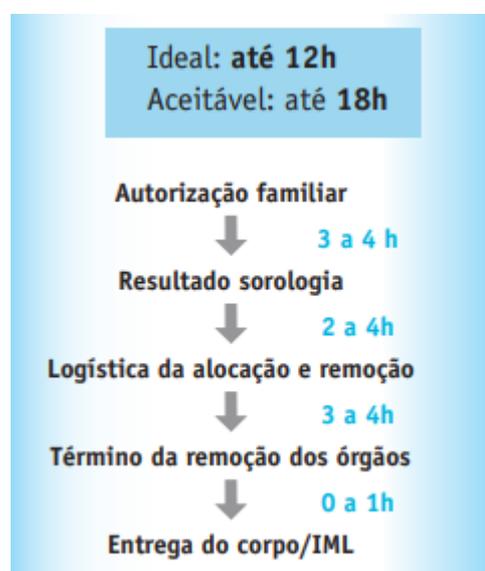
Outro diferencial da IA está em sua capacidade de aprendizado contínuo, onde conforme os sistemas são alimentados com dados de resultados clínicos reais, eles passam a “aprender” com os desfechos e a adaptar seus modelos preditivos. Esse ciclo de retroalimentação tende a aprimorar cada vez mais o processo de triagem, tornando-o não apenas automatizado, mas também evolutivo (Lottenberg, *et al.*, 2019).

### 2.3.3 Automação e a utilização de Drones no transporte de órgãos

A automação, conceito central na Indústria 4.0, representa a aplicação de tecnologias para tornar os processos mais eficientes, autônomos e conectados, onde na logística, esta ferramenta traz uma maior rastreabilidade de materiais, permitindo a gestão de transportes em tempo real, elementos fundamentais no transporte de órgãos humanos, onde o tempo de deslocamento e as condições de preservação são determinantes para o sucesso do transplante. (Freitas *et. al*, 2016)

Após a autorização da família e o resultado de sorologia, inicia-se uma das etapas mais críticas do processo: a logística de alocação e remoção dos órgãos. Os processos logísticos dos transplantes carregam sua importância devido à grande variação de tempo que as etapas anteriores podem levar, como é indicado pela figura 2 a seguir:

**Figura 02** – Tempo para liberação do corpo após a remoção, para a família ou para o IML



Sabendo que a logística tem muitas vezes o papel de reverter o tempo do cenário atual, os drones surgem como uma solução inovadora e altamente funcional para o transporte emergencial de órgãos, especialmente em contextos urbanos congestionados. Os drones oferecem vantagens como redução drástica no tempo de entrega, maior segurança no transporte de cargas delicadas, possibilidade de operação em áreas remotas, e diminuição do impacto ambiental quando comparados a modais convencionais (Silva *et al.*, 2024).

Além disso, como destacado por Vazquez *et al* (2024), a utilização de drones pode contribuir para otimizar a chamada “última milha” da entrega, um dos pontos mais críticos na logística de transplantes, ao permitir que órgãos sejam transportados diretamente até o hospital receptor, com mínima interferência do tráfego terrestre. Esses dispositivos, equipados com sensores, câmeras e sistemas GPS integrados à Internet das Coisas (IoT), permitem um monitoramento completo das condições ambientais durante o transporte, garantindo que a integridade do órgão seja mantida até o momento da cirurgia.

A automação desses processos também amplia a capacidade de resposta rápida das centrais de transplante, reduzindo o tempo entre a captação e o implante, o que pode aumentar significativamente a taxa de sucesso do procedimento. Para além da operação prática, o uso de drones se insere em um ecossistema digital que conecta dados clínicos, logísticos e geográficos em tempo real, promovendo uma cadeia logística mais ágil e inteligente.

A automação desses processos também amplia a capacidade de resposta rápida das centrais de transplante, reduzindo o tempo entre a captação e o implante, o que pode aumentar significativamente a taxa de sucesso do procedimento. De acordo com Lacerda *et. al* (2020), a integração de sistemas automatizados com drones permite monitoramento contínuo, rotas otimizadas e maior controle sobre a cadeia logística, reduzindo riscos associados à deterioração do órgão. Bellotti (2024) reforça que tecnologias emergentes vêm sendo propostas para garantir entregas em tempo recorde com segurança, o que é essencial no caso de órgãos que possuem baixa tolerância à isquemia fria. Além disso, Silva *et al.* (2023) destacam que o uso de drones representa uma alternativa viável para superar limitações geográficas e estruturais, contribuindo para um sistema de transplantes mais eficaz, acessível e resiliente.

### **3 METODOLOGIA DA PESQUISA**

Para elaboração de uma pesquisa científica, se encontra necessário um planejamento rigoroso e a aplicação de critérios de métodos, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados, como mostra a citação a seguir:

“A especificação da metodologia da pesquisa é a que abrange maior número de itens, pois responde, a um só tempo, às questões como?, com quê?, onde?, quanto?” (Lakatos; Marconi, 2003, p. 221)

As autoras ainda complementam que a metodologia corresponde a 5 aspectos: Método de abordagem, método de procedimento, técnicas, delimitação do universo e tipo de amostragem.

No entanto, a metodologia pode-se ser abordada de outras formas, como a divisão abordada por Gil (2002), que descreve a metodologia seguindo 4 aspectos: Tipo de pesquisa, população e amostra, coleta de dados e análise dos dados.

A fins de eficiência no desenvolvimento deste trabalho, optou-se por mesclar ambos os conceitos, apresentando uma metodologia com os elementos constitutivos: Tipo de pesquisa, procedimentos técnicos adotado, fontes e critérios de seleção, estratégias de análise e delimitações da pesquisa.

#### **3.1 Tipo de pesquisa**

Este trabalho se classifica como uma pesquisa qualitativa, exploratória e aplicada. Seguindo os conceitos de Gil (2002), a pesquisa utilizada neste trabalho é denominada como qualitativa, permitindo compreender fenômenos sociais e organizacionais, se enquadrando também como uma pesquisa exploratória, tendo como objetivo mapear e estudar os fluxos atuais dos transplantes de órgãos e seus pontos de melhorias e, por fim, se classificando como aplicada por trazer estudos de como a Indústria 4.0 podem evitar gargalos nos fluxos de transplantes.

#### **3.2 Procedimentos técnicos adotado**

Foram utilizados dois principais procedimentos técnicos:

- Pesquisa bibliográfica (Lakatos e Marconi, 2003): Levantamento bibliográfico sobre os assuntos, efetuando a análise de livros, artigos, notícias e pesquisas sobre

logística hospitalar, transplantes de órgãos e tecnologias da indústria 4.0;

- Pesquisa documental (Gil, 2002): Análise de documentos oficiais, como relatório do ministério da Saúde e ABTO (Associação Brasileira de Transplantes de órgãos).

### **3.3 Fontes e critérios de seleção**

As fontes foram selecionadas com base em:

- Relevância científica: Prioridade para autores consagrados e periódicos indexados;
- Fontes oficiais e confiáveis: Foi escolhido apenas fontes consolidadas como ABTO, SUS e OMS.

A pesquisa foi conduzida com base em fontes de elevada credibilidade acadêmica, dentre as quais destacam-se: Google Scholar, SciELO, PubMed e a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD), escolhidas em razão de sua solidez científica e ampla aceitação na comunidade acadêmica.

### **3.4 Estratégia de Análise**

A estratégia adotada para análise foi fundamentada na análise de conteúdo documental e bibliográfica, conforme apresentada por Lakatos e Marconi (2003), estruturada em três fases: Decomposição, generalização e crítica.

Inicialmente foi realizada a decomposição dos textos em suas ideias centrais, identificando os pontos chaves, após isso foi aplicada a generalização, onde foi feita a classificação dos elementos comuns entre os textos, formando proposições amplas, e por fim, foi constituída a análise crítica focando na objetividade, justificativa e fundamentação científica, avaliando a aplicabilidade real dos artigos no contexto proposto do trabalho.

### **3.5 Limitações da pesquisa**

As principais limitações desta pesquisa são:

- Ausência de coleta de dados empíricos primários: Não foi possível efetuar entrevistas com gestores hospitalares ou efetuar visitas técnicas para o maior entendimento dos processos;
- Natureza documental e bibliográfica: Como não foi possível efetuar visitas técnicas,

ficou limitada a validação de hipóteses com dados quantitativos em campo.

### **3.6 Justificativa metodológica**

A escolha por uma abordagem qualitativa, exploratória e bibliográfica foi motivada pela necessidade de aprofundar a compreensão teórica e prática sobre o tema, sem a necessidade da coleta de dados sensíveis ou clínicos.

## **4 DESCRIÇÃO E RESULTADOS ESPERADOS**

Este trabalho teve como objetivo investigar como as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem ser aplicadas para otimizar os processos relacionados ao sistema de transplantes de órgãos no Brasil. A partir de uma análise bibliográfica de artigos científicos, manuais técnicos e documentos oficiais, foi possível identificar gargalos logísticos relevantes, onde, partir disto, foi feito um levantamento sobre as ferramentas da indústria 4.0 e suas funcionalidades, a fim de fazer uma colocação crítica de como essas ferramentas podem contribuir para a melhora significativa dos processos logísticos dos transplantes

A partir disto, este capítulo tem como finalidade a aplicação dos conceitos abordados anteriormente de forma teórica, utilizando da análise qualitativa dos dados e proposição de cenários simulados e modelos operacionais.

### **4.1 Inteligência artificial na triagem de receptor**

Devido a inteligência artificial já estar sendo aplicada em diversos setores das empresas, hoje tem-se uma vasta gama de tipos de IA. No setor de Recursos Humanos, por exemplo, já existem sistemas inteligentes utilizados para o recrutamento e seleção de candidatos, realizando a triagem de perfis mais compatíveis com determinadas vagas.

Um exemplo de uma ferramenta capaz de executar essa atividade é o LinkedIn Recruiter, ferramenta que possui uma inteligência artificial capaz de utilizar algoritmos inteligentes para triar e destacar candidatos com maior compatibilidade para uma vaga, com base em um conjunto de filtros, habilidades técnicas, comportamentos digitais e dados de mercado. O sistema é capaz de cruzar milhares de perfis automaticamente, oferecendo recomendações personalizadas e auxiliando no preenchimento de cargos com maior agilidade e precisão (LinkedIn).

Essa mesma lógica pode ser aplicada durante o processo de triagem de receptores para transplantes de órgãos na fila única nacional, indicando variáveis como: tipo sanguíneo, gravidade do quadro clínico e tempo de espera na fila, destacando o receptor mais adequado para determinado órgão disponível. O modelo a seguir simula como esta ferramenta se comportaria diante do cenário apresentado:

Inicialmente seria feito o cadastro do doador no sistema de captação de receptores:

**Figura 03** – Simulação de cadastro de doador no sistema de captação de receptor

Nome do doador	Tipo sanguíneo	Altura e peso	Órgãos possíveis para doar	Hospital do diagnóstico morte encefálica	Endereço do hospital
João	A+	1,78 / 80 kg	Coração	Hospital HU/USP	Av. Prof. Lineu Prestes, 2565 - Butantã

Fonte: Adaptado de: IA/Linkedin/Excel

Após o cadastro, a Inteligência artificial do sistema seguiria com uma busca na base de dados da fila única nacional, com o objetivo de encontrar o receptor perfeito:

**Figura 04** – Simulação da base de dados da fila única nacional

Data de cadas	Nome do recé	Altura e peso	Tipo sanguíneo	Órgão	Gravidade do caso	Local onde reside
04/01/2025	Maria	1.56 / 40 kg	B-	Rim	Grave	Teresina, PI
12/01/2025	Paula	1.60 / 63 kg	AB+	Fígado	Moderada	Palmas, TO
15/01/2025	Fabricio	1.85 / 90 kg	A+	Coração	Moderada	São Paulo, SP
16/01/2025	Carla	1.73 / 66 kg	A-	Pâncreas	Grave	São Paulo, SP
27/01/2025	Guilherme	1.71 / 72 kg	B-	Coração	Leve	Belo Horizonte, MG
27/01/2025	Guilherme	1.71 / 72 kg	B-	Pulmão	Leve	Belo Horizonte, MG
02/02/2025	Brenda	1.72 / 90 kg	B+	Coração	Leve	São Paulo, SP
07/02/2025	Antonio	1.78 / 85 kg	O-	Rim	Moderada	Açu, RN
20/02/2025	José	1.85 / 80 kg	B-	Intestino	Grave	Sobral, CE
01/03/2025	Josinaldo	1.79 / 80 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
06/03/2025	Gustavo	1.77 / 81 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
11/03/2025	Manoela	1.59 / 60 kg	O+	Intestino	Leve	Caçador, SC
16/03/2025	Mateus	1.83 / 120 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
24/03/2025	Lucas	1.70 / 67 kg	A+	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ
11/03/2025	Gabriel	1.75 / 85 kg	O+	Rim	Leve	Caçador, SC
24/03/2025	Yuri	1.80 / 80 kg	B-	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ

Fonte: Adaptado de: IA/Linkedin/Excel

A inteligência artificial seguiria a ordem de filtragem a partir da lógica utilizada pelo Ministério da Saúde (Secretaria da comunicação Social, 2023): 1º órgão a qual o receptor necessita, 2º Tipo sanguíneo do receptor, 3º compatibilidade de altura e peso, 4º gravidade do caso clínico e 5º ordem cronológica de cadastro.

Como o exemplo apresentado simula um doador de coração com tipo sanguíneo A+, assim será aplicado:

**Figura 05** – Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional aplicando a primeira filtragem

Data de cadas	Nome do recé	Altura e peso	Tipo sanguíneo	Órgão	Gravidade do caso	Local onde reside
15/01/2025	Fabricio	1.85 / 90 kg	A+	Coração	Moderada	São Paulo, SP
27/01/2025	Guilherme	1.71 / 72 kg	B-	Coração	Leve	Belo Horizonte, MG
02/02/2025	Brenda	1.72 / 90 kg	B+	Coração	Leve	São Paulo, SP
01/03/2025	Josinaldo	1.79 / 80 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
06/03/2025	Gustavo	1.77 / 81 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
16/03/2025	Mateus	1.83 / 120 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
24/03/2025	Lucas	1.70 / 67 kg	A+	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ
24/03/2025	Yuri	1.80 / 80 kg	B-	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ

Fonte: Adaptado de: IA/Linkedin/Excel

**Figura 06** - Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional aplicando a segunda filtragem

Data de cadas	Nome do recé	Altura e peso	Tipo sanguíneo	Órgão	Gravidade do caso	Local onde reside
15/01/2025	Fabricio	1.85 / 90 kg	A+	Coração	Moderada	São Paulo, SP
01/03/2025	Josinaldo	1.79 / 80 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
06/03/2025	Gustavo	1,77 / 81 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
16/03/2025	Mateus	1.83 / 120 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
24/03/2025	Lucas	1.70 / 67 kg	A+	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ

Fonte: Adaptado de: IA/Linkedin/Excel

**Figura 07** - Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional analisando as gravidades dos casos

Data de cadas	Nome do recé	Altura e peso	Tipo sanguíneo	Órgão	Gravidade do caso	Local onde reside
15/01/2025	Fabricio	1.85 / 90 kg	A+	Coração	Moderada	São Paulo, SP
01/03/2025	Josinaldo	1.79 / 80 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
06/03/2025	Gustavo	1,77 / 81 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
16/03/2025	Mateus	1.83 / 120 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
24/03/2025	Lucas	1.70 / 67 kg	A+	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ

Fonte: Adaptado de: IA/Linkedin/Excel

**Figura 08** - Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional analisando a compatibilidade de altura e peso

Data de cadas	Nome do recé	Altura e peso	Tipo sanguíneo	Órgão	Gravidade do caso	Local onde reside
15/01/2025	Fabricio	1.85 / 90 kg	A+	Coração	Moderada	São Paulo, SP
01/03/2025	Josinaldo	1.79 / 80 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
06/03/2025	Gustavo	1,77 / 81 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
16/03/2025	Mateus	1.83 / 120 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
24/03/2025	Lucas	1.70 / 67 kg	A+	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ

Fonte: Adaptado de: IA/Linkedin/Excel

**Figura 09** - Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional identificando o receptor que está cadastrado a mais tempo

Data de cadas	Nome do recé	Altura e peso	Tipo sanguíneo	Órgão	Gravidade do caso	Local onde reside
15/01/2025	Fabricio	1.85 / 90 kg	A+	Coração	Moderada	São Paulo, SP
01/03/2025	Josinaldo	1.79 / 80 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
06/03/2025	Gustavo	1,77 / 81 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
16/03/2025	Mateus	1.83 / 120 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
24/03/2025	Lucas	1.70 / 67 kg	A+	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ

Fonte: Adaptado de: IA/Linkedin/Excel

Por fim, após a aplicação de todos os filtros, a Inteligência artificial seria capaz de localizar o melhor receptor do órgão doado:

**Figura 10** – Simulação da atuação da inteligência artificial na base de dados da fila única nacional identificando o melhor receptor para o órgão

Data de cada	Nome do recé	Altura e peso	Tipo sanguíneo	Órgão	Gravidade do caso	Local onde reside
15/01/2025	Fabrizio	1.85 / 80 kg	A+	Coração	Moderada	São Paulo, SP
01/03/2025	Josinaldo	1.79 / 80 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
06/03/2025	Gustavo	1.77 / 81 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
16/03/2025	Mateus	1.83 / 120 kg	A+	Coração	Grave	São Paulo, SP
24/03/2025	Lucas	1.70 / 67 kg	A+	Coração	Leve	Cabo Frio, RJ

Fonte: Adaptado de: IA/Linkedin/Excel

Os sistemas inteligentes da saúde também poderão ser programados para priorizar outros pontos, como: pacientes com maior probabilidade de sucesso no transplante e até mesmo localização geográfica, permitindo um processo mais transparente, técnico e equitativo, como já sugere Lottenberg *et al.* (2019), contribuindo para a redução de erros humanos, e otimizando um recurso escasso como os órgãos para transplante.

Com a aplicação de sistemas de inteligência artificial, a triagem de receptores apresentará um avanço significativo na gestão da fila única nacional. Com a utilização de algoritmos precisos e automatizados, se torna possível a maior agilidade na identificação dos receptores compatíveis, respeitando os critérios técnicos e clínicos com mais eficiência.

Os resultados esperados com a implementação dessa tecnologia é a redução no tempo de resposta entre a captação e transporte do órgão, diminuindo a taxa de descarte de órgãos por atraso logístico, aumentando as chances de sucesso do transplante, posicionando assim, a inteligência artificial como uma aliada estratégica na construção de um sistema de transplantes mais eficientes.

## 4.2 Automação e a utilização de Drones no transporte de órgãos

Diante das crescentes demandas por eficiência e agilidade no sistema de transplantes de órgãos, a automação logística, surge como uma solução promissora dentro do escopo da Indústria 4.0, sendo a utilização da mobilidade aérea por meio de drones. Nesse contexto, os drones se destacam por sua capacidade de realizar entregas emergenciais com mais precisão e rapidez, superando gargalos como o trânsito urbano, permitindo uma melhor gestão do tempo de isquemia fria.

Um exemplo internacional bem-sucedido de transporte autônomo de material biomédico com drones foi realizado na Itália em 2020, em uma parceria entre Leonardo, Telespazio e o Hospital Infantil Bambino Gesù, O projeto contava com o apoio da Autoridade Nacional de Aviação Civil italiana (ENAC) e consistiu na entrega de cargas médicas entre as unidades hospitalares de S. Marinella e Palidoro, com drones voando

por mais de 32 km em modo automatizado e além da linha de visão do operador (BVLOS), evidenciando a viabilidade, segurança e inovação do modelo adotado (Resgate Aeromédico, 2020).

Com o objetivo de analisar a viabilidade da utilização de drones no transporte de órgãos para transplantes na região metropolitana de São Paulo, será apresentada uma simulação logística baseada no caso descrito no tópico 4.1. Nesse contexto, considera-se um doador fictício, denominado “João”, diagnosticado com morte encefálica no Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU/USP), localizado no bairro do Butantã – SP, conforme ilustrado na Figura 10 a seguir.

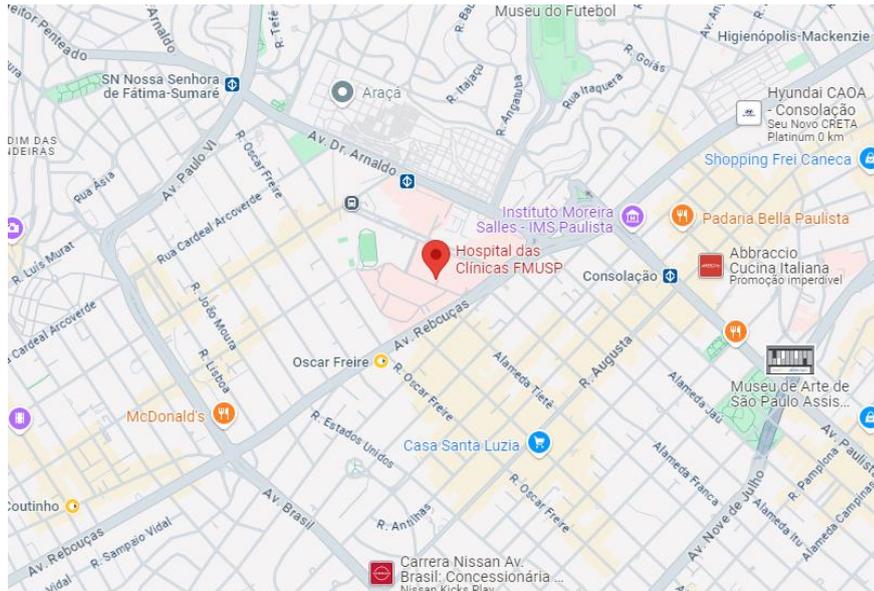
**Figura 11** – Localização geográfica do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU/USP)



Fonte: Google Maps - Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU/USP)

Será proposto que o seu receptor compatível, Josinaldo, esteja internado em estado grave no Hospital das Clínicas FMUSP, localizada na região de Cerqueira César, conforme apresentado na figura 12:

**Figura 12 – Localização geográfica do Hospital das Clínicas FMUSP**



Fonte: Google Maps - Hospital das Clínicas FMUSP

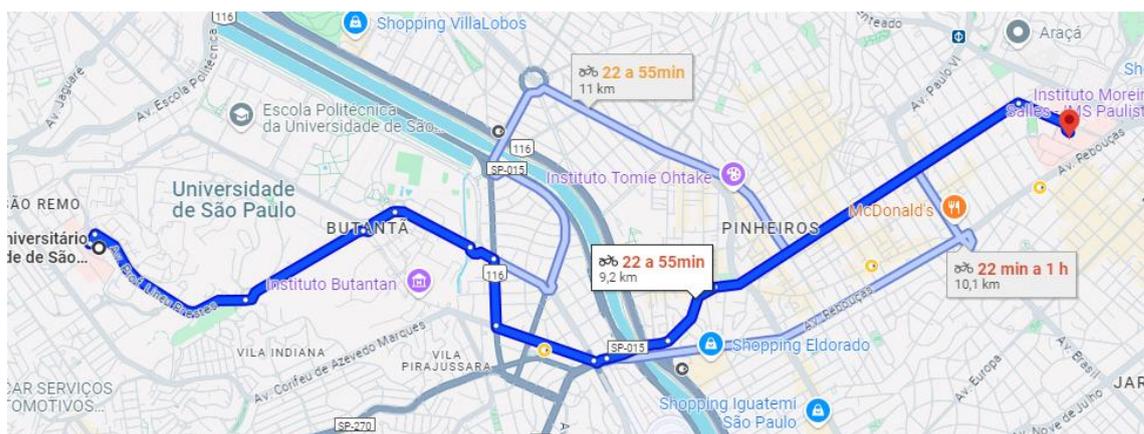
Afins de comparação, será demonstrado o primeiro cenário simulando a entrega do órgão no formato que já ocorre atualmente, utilizando um veículo terrestre para efetuar a entrega.

Para se chegue a um tempo de transporte de órgãos mais assertivo, no primeiro cenário foram apontados os seguintes parâmetros:

- A rota foi selecionada utilizando o recurso ROTAS do aplicativo Google maps, selecionado a rota com menor tempo e quantidade de KM;
- Para melhor comparação, o veículo utilizado será a moto, devido a sua eficiência no transporte de pequenas cargas.

Após a definição dos parâmetros a cima, foi possível identificar a seguinte rota:

**Figura 13 –Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU/USP) a Hospital das Clínicas FMUSP**



Fonte: Google Maps - Rota do Hospital HU/USP a Hospital das clínicas FMUSP

Devido às condições de trânsito, o aplicativo Google maps apresentou um tempo estimado de trajeto entre 22 e 55 minutos para o percurso. Para fins comparativos, considerou-se a média entre esses valores, resultando em um tempo estimado de 39 minutos para o transporte terrestre.

No segundo cenário, irá ser simulado o tempo de rota utilizando um drone como veículo. Para que essa tecnologia atenda a distância entre o Hospital HU/USP a Hospital das clínicas FMSP, foi utilizado o drone Dji Matrice 300 RTK da marca DJI, drone esse com alcance de transmissão de até 15 km, com a capacidade máxima de carga de 2,7 kg e velocidade máxima de 8 m/s sem carregar cargas (BH Drone, 2025). Considerando uma margem de segurança para o transporte de material sensível, foi adotada uma velocidade média estimada de 6 m/s.

Para viabilizar a comparação, realizou-se a conversão da velocidade do drone para quilômetros por hora:

- A distancia da rota será a mesma considerada no primeiro cenário (9,2 KM);
- 6 metros por segundo equivalem a 360 metros por minuto;
- Multiplicando-se por 60, obtém-se 21.600 metros por hora, ou seja, 21,6 km/h.

Com base nessa velocidade e considerando a mesma distância do cenário anterior (9,2 km), o tempo estimado para o trajeto aéreo com o drone seria de aproximadamente 25 minutos.

A seguir, apresenta-se um quadro comparativo entre os dois modais analisados:

**Quadro 2 – Comparativo entre transporte com veículo terrestre**

<b>Critério</b>	<b>Drone DJI Matrice 300 RTK</b>	<b>Motocicleta convencional</b>
Tipo	Aéreo autônomo	Terrestre urbano
Distância operacional	Até 15 km	Ilimitada
Velocidade considerada	6 m/s (~21,6 km/h)	Média estimada pelo tráfego
Tempo estimado (trajeto)	25 minutos	39 minutos
Capacidade máxima de carga	2,7 kg	Aproximadamente 10 kg

Fonte: BH Drone, 2025

A análise comparativa entre os dois modais evidencia o potencial transformador da utilização dos drones no contexto do transporte emergencial de órgãos. A redução do tempo do trajeto em 14 minutos na simulação representa um impacto significativo na preservação da viabilidade do órgão diante das limitações de tempo de isquemia fria.

Com o uso de drones no transporte de órgãos, espera-se alcançar uma redução do tempo de entrega e uma maior confiabilidade e previsibilidade nas rotas, tendo em vista

que elas serão diretas e pré-estabelecidas, trazendo mais segurança para esse processo.

### 4.3 Internet das Coisas (IoT) aplicada ao monitoramento de órgãos

Como uma maneira de integrar as demais ferramentas da já apresentadas anteriormente, a IOT capacita a conexão de objetos físicos à internet, permitindo a coleta, compartilhamento e processamento de dados em tempo real. Com essa nova camada de tecnologia, se torna possível conectar dispositivos entre si para que possam interagir de maneira autônoma. (Gokhale *et al.*, 2018).

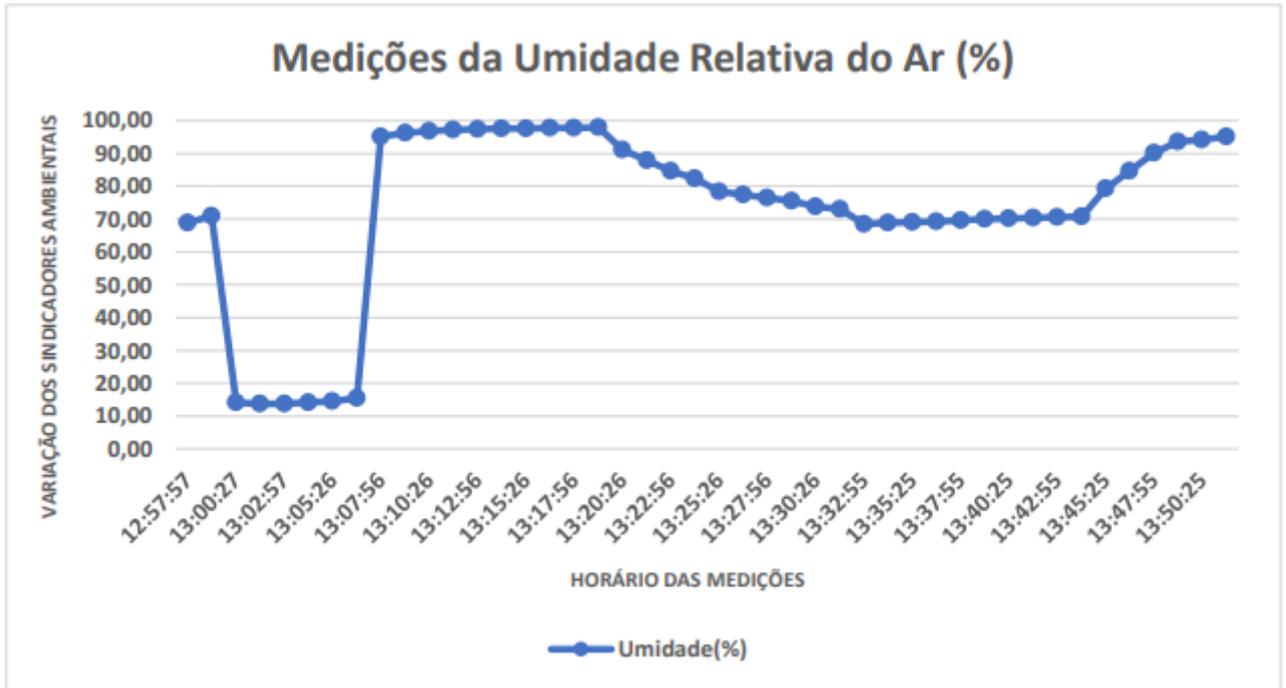
Nas operações portuárias modernas, chamadas de *SmartPorts*, a IOT se tornou o ponto chave para todo o seu funcionamento. Portos como os de Hamburgo na Alemanha aplicam o conceito a muitos anos, implementando sensores em pontos específicos do porto, permitindo a rastreabilidade das cargas, controle de tráfego interno e monitoramento de condições ambientais, otimizando o uso de energia.

Trazendo os conceitos dos *SmartPorts* para a área da saúde, é possível imaginar a criação de uma rede de transplantes conectadas, onde sensores e dispositivos ligados à internet possibilitam o rastreamento de caixas térmicas que carregam órgãos, com o monitoramento constante de temperatura, umidade e tempo de isquemia, além da emissão de alertas caso haja alguma violação de parâmetros ideais.

Utilizando como base a tese de Ferrasi (2023), é possível analisar um exemplo prático da aplicação da Internet das coisas no monitoramento no transporte de materiais biológicos. O pesquisador desenvolveu um dispositivo físico capaz de captar a temperatura, umidade e luminosidade de materiais biológicos por meio de sensores conectados a um microcontrolador ESP32 e uma placa NodeMCU.

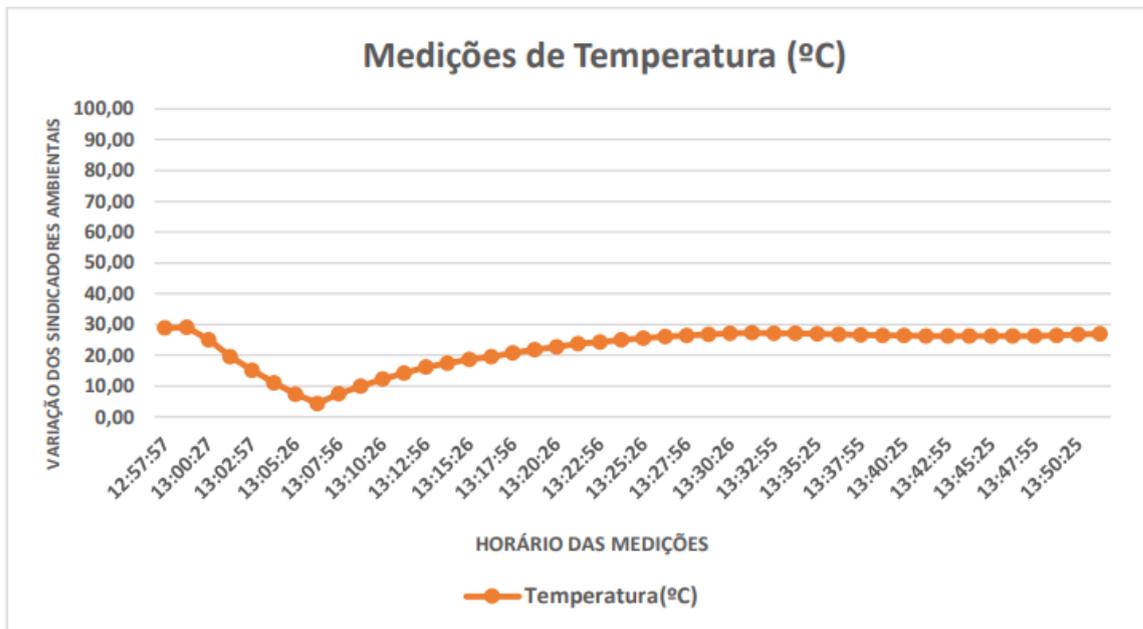
O protótipo desenvolvido mede temperaturas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ , umidade relativa de 0 a 100% e luminosidade variável de acordo com a luz incidente. Os dados captados foram armazenados em um cartão microSD, porém devido a capacidade do microcontrolador ESP32 e a placa NodeMCU, o protótipo poderia se conectar em uma rede WIFI.

**Figura 14** – Dados de medições da umidade captados pelo protótipo desenvolvido por Ferrasi



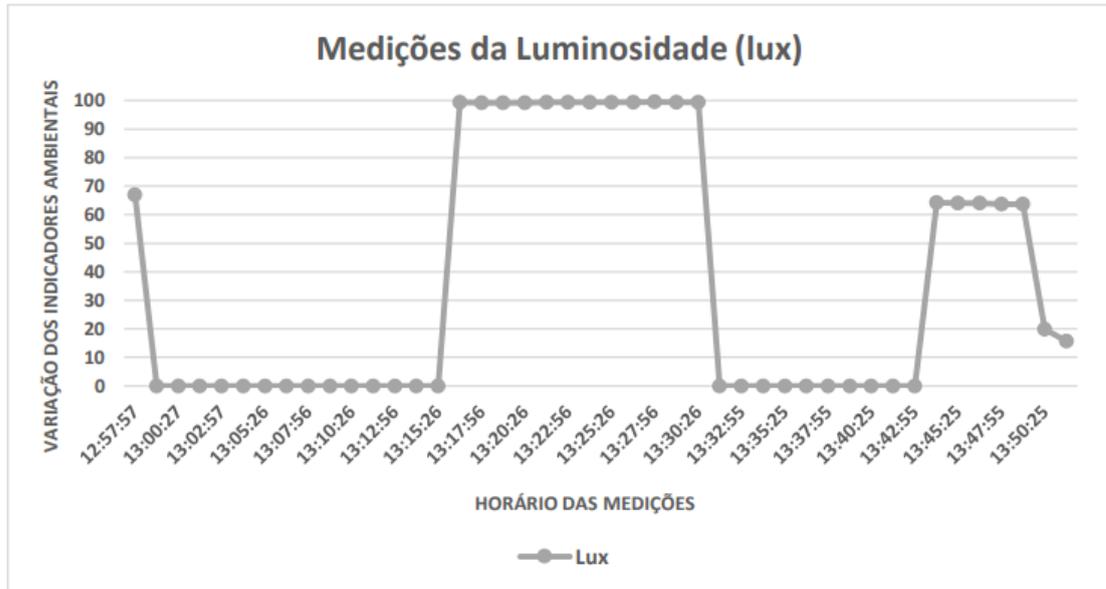
Fonte: Ferrasi, 2023

**Figura 15** – Dados de medições de temperatura captados pelo protótipo desenvolvido por Ferrasi



Fonte: Ferrasi, 2023

**Figura 16** – Dados de medições de luminosidade captados pelo protótipo desenvolvido por Ferrasi



Fonte: Ferrasi, 2023

A integração desse dispositivo à internet permitiria o monitoramento remoto e em tempo real das condições térmicas e ambientais às quais o órgão está exposto durante o transporte. Além disso, ao ser mesclado com o uso de drones, como apresentado na subseção 4.2, esse sistema poderia ser programado para emitir alertas automáticos caso parâmetros críticos sejam ultrapassados — como aumento repentino da temperatura ou falha no isolamento térmico.

Essa combinação entre IoT e drones logísticos proporcionaria respostas mais rápidas por parte das equipes médicas e logística, reduzindo os riscos de comprometimento do órgão e elevando as chances de sucesso do transplante, sobretudo em contextos urbanos congestionados ou de difícil acesso.

Com a introdução da Internet das Coisas (IoT) nos processos logísticos e clínicos dos transplantes de órgãos, espera-se uma transformação significativa na forma como as operações são conduzidas, especialmente no que diz respeito ao monitoramento, rastreabilidade e segurança das condições de transporte, assegurando assim que os órgãos, cheguem ao destino em condições ideais.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho analisou criticamente os principais gargalos logísticos no processo de transplante de órgãos no Brasil, identificando gargalos quanto a falta de integração na cadeia logística, não monitoramento do órgão durante o processo de isquemia fria e limitações na infraestrutura de transporte. Apesar dos avanços, a ausência de soluções tecnológicas em larga escala ainda compromete a eficiência, a rastreabilidade e a agilidade necessárias para o sucesso dos transplantes.

Nesse contexto, a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0: Internet das Coisas (IoT), a Inteligência Artificial (IA) e a automação logística revelou-se uma estratégia altamente promissora para otimizar os processos logísticos relacionados ao transporte de órgãos. A IoT permite o monitoramento em tempo real de variáveis críticas como temperatura, umidade e tempo de transporte; a IA pode ser utilizada na triagem automatizada de receptores com base em múltiplos critérios clínicos; e a automação, com destaque para o uso de drones, viabiliza entregas mais rápidas e precisas, reduzindo significativamente o risco de perdas.

Embora o estudo tenha se concentrado na região central de São Paulo, devido à sua relevância hospitalar e infraestrutura tecnológica consolidada, os conceitos, ferramentas e soluções propostos podem ser adaptados e replicados em outras regiões do país, respeitando as especificidades geográficas e logísticas.

Deduz-se que a incorporação das tecnologias da Indústria 4.0 representa um caminho viável, eficiente e necessário para modernizar o sistema de transplantes brasileiro. Além de melhorar os índices de sucesso cirúrgico, essas inovações contribuem diretamente para a redução de perdas de órgãos, o aumento da segurança no transporte e a promoção de um sistema de saúde mais ágil, integrado e centrado na preservação da vida.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 504, de 27 de maio de 2021. Regulamenta as boas práticas na operação de estabelecimentos que realizam atividades com tecidos, células e órgãos humanos para uso terapêutico. **Diário Oficial da União**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRANSPLANTES DE ÓRGÃOS (ABTO). **Manual dos Transplantes**. São Paulo, v. 2022.

BALLOU, R. H. **Logística empresarial**: transportes, administração de materiais e distribuição física. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

BEAUCHAMP, T. L.; CHILDRESS, J. F. **Principles of Biomedical Ethics**. 8. ed. Oxford University Press, 2019.

BELLOTTI, H. B. **Sistema EOS**: uma proposta para otimização do tempo para transporte de órgãos humanos. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=573445>. Acesso em: 14 maio 2025.

BH DRONE. **Drone DJI Matrice 300 RTK**. Disponível em: <https://www.bhdronefilmagens.com.br/drone-dji-matrice-300-rtk/prod-9301969>. Acesso em: 14 maio 2025.

CALNE, R. Y.; THIRU, S.; MCCASTER, P. **Cyclosporin A in patients receiving renal allografts from cadaver donors**. *The Lancet*, v. 312, n. 8104, 1978.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Segmentos ou nichos com maior potencial para o desenvolvimento tecnológico nacional**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2022.

CHANDRA D, S.; RAI S.; IYENGER S.; JAIN B.; **SAO S.. PREVALENCE AND DISTRIBUTION OF ABO AND RH-D ANTIGENS ALONG WITH ITS SUBGROUPS & RARE TYPES IN GREATER GWALIOR REGION**. Disponível em: [https://www.scirp.org/pdf/OJBD\\_2013062515582075.pdf](https://www.scirp.org/pdf/OJBD_2013062515582075.pdf). Acesso em: 13 abr. 2025

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Desafios para a Indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: 2016. Disponível em: [https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/d6/cb/d6cbfbba-4d7e-43a0-9784-86365061a366/desafios\\_para\\_industria\\_40\\_no\\_brasil.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/d6/cb/d6cbfbba-4d7e-43a0-9784-86365061a366/desafios_para_industria_40_no_brasil.pdf). Acesso em: 13 abr. 2025.

CONSELHO FEDERAL DE MEDICINA (CFM). Resolução nº 2.173/2017 – Define os critérios para o diagnóstico de morte encefálica. **Diário Oficial da União**, 15 dez. 2017. Disponível em: <https://portal.cfm.org.br/noticias/cfm-atualiza-resolucao-com-criterios-de-diagnostico-da-morte-encefalica>. Acesso em: 13 abr. 2025.

FERRASI F. A. **TECNOLOGIAS PARA A CAPTAÇÃO AUTÔNOMA DE DADOS NO MONITORAMENTO DE VARIAÇÕES AMBIENTAIS**: Uma abordagem na perspectiva da Internet das Coisas (IoT) Aplicada ao Transporte de Amostras Biológicas 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/34a9ad95-3f0b-4ddf-a918-5b9a433433a3/download>. Acesso em: 12 maio 2025.

FINS, J. J. **Brain Death and the Cultural Divide**. *The Hastings Center Report*, v. 45, n. 6, 2015. DOI: 10.1002/hast.504

FRANÇA, R. T. **Logística de transplante de órgãos humanos: uma análise integrada com a Indústria 4.0**. *Revista Brasileira de Logística*, v. 12, n. 2, p. 88–103, 2023

FREITAS, M. M. B. C.; FRAGA, M. A. F.; SOUZA, G. P. L. **Logística 4.0: conceitos e aplicabilidade: uma pesquisa-ação em uma empresa de tecnologia para o mercado automobilístico**. *Caderno PAIC*, v. 17, n. 1, p. 237–261, 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa** (4. ed.). São Paulo: Atlas, 2002.

GOKHALE, P.; BHAT, O.; BHAT, S. **Introduction to IoT**. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, v. 5, n. 1, 2018. DOI: 10.17148/IARJSET.2018.517.

GOMES, D. S. Inteligência Artificial: conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 1, 2017. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/51841234/49-148-1-PB-libre.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

GOOGLE MAPS. Hospital Das Clínicas FMUSP. Endereço: Av. Dr. Enéas Carvalho de Aguiar, 255 - Cerqueira César, São Paulo - SP, 05403-000. Disponível em: <https://maps.app.goo.gl/ugxVvXx1noN1Mgw57>. Acesso em: 22 maio 2025.

GOOGLE MAPS. Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU/USP). Endereço: Av. Prof. Lineu Prestes, 2565 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-000. Disponível em: <https://maps.app.goo.gl/2YePHMTCLCfsgj2M7>. Acesso em: 22 maio 2025.

GOOGLE MAPS. Rota Hospital Universitário da Universidade de São Paulo a Hospital Das Clínicas FMUSP (HU/USP). Disponível em: <https://maps.app.goo.gl/7Nw3SNnxGE3S87Bv6>. Acesso em: 22 maio 2025.

HARVARD MEDICAL SCHOOL. **A definition of irreversible coma: report of the Ad Hoc Committee of the Harvard Medical School to examine the definition of brain death**. *JAMA*, v. 205, n. 6, 1968.

HERRMANN, F. Smart Manufacturing Systems. **MDPI**, Alemanha, v. 6, n. 4, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-8954/6/4/38>. Acesso em: 13 abr. 2025.

HOBSBAWM, E. J. **A Era das Revoluções: Europa, 1789-1848**. 24. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2016.

HOZDÍĆ, E. **Smart Factory for Industry 4.0: A Review**. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, v. 7, n. 1, 2015. Disponível em: [https://modtech.ro/international-journal/vol7no12015/Hozdic\\_Elvis.pdf](https://modtech.ro/international-journal/vol7no12015/Hozdic_Elvis.pdf). Acesso em: 13 abr. 2025.

KRANENBURG, R.; BASSI, A. **Internet of Things: A critique of ambient technology and the all-seeing network of RFID**. *Journal of Internet Services and Applications*, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2011. DOI: [10.1186/2192-1121-1-9](https://doi.org/10.1186/2192-1121-1-9).

LACERDA, L.; GENARO, M. R. C.; BRITO, M. L. C. **A logística do transporte de órgãos para transplante no Brasil**. *Revista NEADS*, v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: <http://neads.btv.ifsp.edu.br/ojs/index.php/revneads/article/download/18/5>. Acesso em: 14 maio 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. v. 7, p. 221, 2003 São Paulo: Atlas.

Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0: uma análise bibliométrica. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, SP, v. 19, p. e0200023, 2020. DOI: 10.20396/rbi.v19i0.8658766. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rbi/article/view/8658766>. Acesso em: 1 jul. 2025.

LINKEDIN CORPORATION. **LinkedIn Recruiter** – Encontre os melhores talentos para a sua empresa. Disponível em: <https://business.linkedin.com/pt-br/talent-solutions/recruiter>. Acesso em: 14 maio 2025.

LOTTEBERG, C.; SILVA, P. E.; KLAJNER, S. **A revolução digital na saúde: como a inteligência artificial e a internet das coisas tornam o cuidado mais humano, eficiente e sustentável**. São Paulo: Elsevier, 2019.

MARINHO, A. **A situação dos transplantes de órgãos no Brasil**. Brasília: IPEA, 2009. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1564/1/TD\\_1389.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1564/1/TD_1389.pdf). Acesso em: 13 abr. 2025.

MICHLER, R. E. **Tagliacozzi and the History of Autogenous and Allogenic Tissue Transplantation**. *Plastic and Reconstructive Surgery*, v. 97, n. 7, 1996.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Sistema Nacional de Transplantes**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/saes/snt/transplantes>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MORAIS, T. R.; MORAIS, M. R. Doação de órgãos: é preciso educar para avançar. **Scielo**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 95, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.org/pdf/sdeb/2012.v36n95/633-639/pt>. Acesso em: 13 abr. 2025.

MOURA, D. A. **Porto Inteligente: Smart Port, a Logística 4.0 Sustentável**, 2023. Disponível em [https://www.researchgate.net/publication/375552698\\_PORTO\\_INTELIGENTE\\_SMART\\_P  
ORT\\_-\\_A\\_LOGISTICA\\_40\\_SUSTENTAVEL](https://www.researchgate.net/publication/375552698_PORTO_INTELIGENTE_SMART_PORT_-_A_LOGISTICA_40_SUSTENTAVEL). Acesso em: 14 abr. 2025

MURRAY, J. E. **Surgery of the Soul: Reflections on a Curious Career**. Science History Publications, 1992.

NUNES, D.; LUCON, P. H. S.; WOLKART, E. N. **Inteligência Artificial: impactos no direito processual e na democracia**. Belo Horizonte: JusPodivm Digital, 2020. Disponível em: [https://juspodivmdigital.com.br/cdn/arquivos/jus2159\\_previa-do-livro.pdf](https://juspodivmdigital.com.br/cdn/arquivos/jus2159_previa-do-livro.pdf). Acesso em: 28 abr. 2025.

RAO, P. S.; MERION, R. M.; ASCHER, N. L. **Historical evolution of renal transplantation in the United States**. *Transplantation Reviews*, v. 26, n. 2, 2012.  
RESGATE AEROMÉDICO. **Drones a serviço da saúde: na Itália**, Leonardo, Telespazio e

o Hospital Infantil de Roma iniciam testes. Resgate Aeromédico, 28 out. 2020. Disponível em: <https://www.resgateaeromedico.com.br/drones-a-servico-da-saude-na-italia-leonardo-telespazio-e-o-hospital-infantil-de-roma-iniciam-testes/>. Acesso em: 19 maio 2025.

SÁNCHEZ-FUEYO, A. *et al.* **Impact of Cold Ischemia Time on Liver Transplantation Outcomes.** Liver Transplantation, v. 26, n. 2, 2020. DOI: 10.1002/lt.25617

SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL. **Como funciona a lista de transplantes de órgãos no Brasil.** Governo do Brasil, 10 ago. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/fatos/brasil-contra-fake/noticias/2023/08/como-funciona-a-lista-de-transplantes-de-orgaos-no-brasil>. Acesso em: 14 maio 2025.

SCHWAB, Klaus. **A Quarta Revolução Industrial.** São Paulo: Edipro, 2016

Shewmon DA, Salamon N. **The Extraordinary Case of Jahi McMath.** Perspect Biol Med. 2021;64(4):457-478. doi: 10.1353/pbm.2021.0036. PMID: 34840151.

SILVA, B. B. da; NASCIMENTO, J. V. do; SANTANA, T. A. dos S. **Logística e drones: um estudo de aplicabilidade na era digital.** ETEC, 2024.

SILVA, L. V. A.; OLIVEIRA, M. V.; SANTOS, R. A. **A logística do transporte de órgãos para transplante no litoral norte.** ETEC, São Sebastião, 2023. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/19211/1/A%20LOG%3%8DSTICA%20DO%20TRANSPORTE%20DE%20C3%93RG%3%83OS%20PARA%20TRANSPLANTE%20NO%20LITORAL%20NORTE.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.

STARZL, T. E. **The Puzzle People: Memoirs of a Transplant Surgeon.** University of Pittsburgh Press, 1992.

TESSARINI, G.; SALTORATO, P. **Impactos da indústria 4.0 na organização do trabalho: uma revisão sistemática da literatura.** Revista Produção Online, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 743–769, 2018. DOI: 10.14488/1676-1901.v18i2.2967. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/2967>. Acesso em: 27 abr. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG). **UFMG deposita patente para dispositivo usado em transporte de órgãos para transplante.** UFMG, 11 abr. 2024. Disponível em: <https://ufmg.br/comunicacao/assessoria-de-imprensa/release/ufmg-deposita-patente-para-dispositivo-usado-em-transporte-de-orgaos-para-transplante>. Acesso em: 13 abr. 2025.

VAZQUEZ, F. J. B.; SILVA, H. H. da; SOUSA, V. da S. e. **Indústria 4.0 na Logística 4.0.** Dataset Reports, v. 3, n. 1, p. 160–172, 2024.