



Ministério da Educação
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia de Produção



UMA ABORDAGEM DE REDES DE FILAS PARA ANÁLISE DE CADEIA DE SUPRIMENTOS DE SANGUE

CAROLINA REIS GUALBERTO

Belo Horizonte MG
2024

Carolina Reis Gualberto

UMA ABORDAGEM DE REDES DE FILAS PARA ANÁLISE DE CADEIA DE SUPRIMENTOS DE SANGUE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais na linha de pesquisa "Otimização e Simulação de Sistemas Logísticos e de Grande Porte" como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestra em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof. Dra. Lásara Fabrícia Rodrigues

Belo Horizonte - MG
2024

G899a Gualberto, Carolina Reis.
Uma abordagem de redes de filas para análise de cadeia de suprimentos de sangue [recurso eletrônico] / Carolina Reis Gualberto. - 2024.
1 recurso online (68 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Lásara Fabrícia Rodrigues.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 67-68.

Bibliografia: f. 58-66.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Sangue - Teses.
3. Algoritmos - Teses. I. Rodrigues, Lásara Fabrícia.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 658.5(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

FOLHA DE APROVAÇÃO

Uma abordagem de redes de filas para análise de cadeia de suprimentos de sangue

CAROLINA REIS GUALBERTO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E INTERVENÇÃO EM SISTEMAS SOCIOTÉCNICOS, linha de pesquisa Otimização e Simulação de Sistemas Logísticos e de Grande Porte.

Prof(a). Lásara Fabrícia Rodrigues - Orientador

UFMG

Prof(a). Irce Fernandes Gomes Guimarães

UFOP

Prof. João Flávio de Freitas Almeida

UFMG

Belo Horizonte, 11 de novembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **João Flavio de Freitas Almeida, Professor do Magistério Superior**, em 11/11/2024, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lásara Fabrícia Rodrigues, Professora do Magistério Superior**, em 11/11/2024, às 12:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Irce Fernandes Gomes Guimarães, Usuária Externa**, em 14/11/2024, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0,

informando o código verificador **3718216** e o código CRC **A392B066**.

Este trabalho é dedicado especialmente a minha mãe Terezinha e ao meu pai Rubens.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, por nunca me abandonar, sempre estando ao meu lado, me dando forças e me fazendo acreditar que tudo é possível mesmo diante das dificuldades.

Agradeço especialmente a minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Lásara Fabrícia Rodrigues, pela valiosa orientação, confiança, incentivo, paciência e amizade dedicados durante toda essa jornada, além de toda a experiência compartilhada.

Aos meus pais, Terezinha Reis Gualberto e Rubens Gualberto Pinto, por toda força, amor incondicional, apoio pessoal e profissional, união, amizade e carinho.

Aos colegas do laboratório de simulação e do departamento, pelos conhecimentos compartilhados, pela confiança e parceria, que tornaram essa batalha menos árdua.

Um agradecimento especial ao Adrian Gabriel Fideles Paixão pelo convívio diário, apoio nos momentos de dificuldade, pelas conversas, brincadeiras e distrações, tornando a caminhada mais leve e prazerosa.

Agradeço a toda a equipe do HEMOSC pela confiança e prontidão em fornecer os dados, além de estarem sempre disponíveis para ensinar e compartilhar seus conhecimentos sobre a hemorrede.

À CAPES e a FAPEMIG pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

“Não é o crítico que importa; nem aquele que aponta onde foi que o homem tropeçou ou como o autor das façanhas poderia ter feito melhor. O crédito pertence ao homem que está por inteiro na arena da vida, cuja face está manchada pela poeira, pelo suor e pelo sangue; que luta bravamente; que decepciona; que erra e tenta de novo e de novo, porque sabe que não há esforço sem erros e decepções; mas que, na verdade, se empenha em seus feitos; que conhece o entusiasmo, as grandes paixões; que se entrega em uma causa digna; que, na melhor das hipóteses, conhece no final o triunfo de uma grande conquista e que, na pior, se fracassar, ao menos fracassa ousando grandemente.”

Trecho do discurso “Cidadania em uma Republica” proferido na Sorbonne por Theodore Roosevelt em 23 de abril de 1910.

Resumo

O sangue é essencial para a vida do ser humano, uma vez que é utilizado em diversos procedimentos em que a reposição sanguínea se faz necessária. Nesse sentido, a gestão eficaz da cadeia de suprimentos sanguínea é essencial para garantir o atendimento adequado aos pacientes e minimizar o seu descarte. No entanto, a natureza perecível dos produtos sanguíneos torna essa gestão ainda mais desafiadora. A Pesquisa Operacional é uma ferramenta valiosa para lidar com essa complexidade, contudo poucos estudos utilizam essa ferramenta ao analisar cadeias de suprimentos sanguíneas brasileiras. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma abordagem baseada em rede de filas para avaliar cadeias de suprimento sanguíneo, com foco na configuração de hemorredebras brasileiras. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo para analisar as possíveis combinações de quantidades e localização de estações de produção que utiliza o método aproximado de decomposição para avaliar as medidas de desempenho de cada uma das configurações analisadas. Os resultados mostram as configurações de unidades de produção sugeridas para cada quantidade de unidades instaladas ao considerar o menor *lead time* médio de bolsas em transporte e aguardando em fila por transporte. Os resultados também indicam aumento de *lead time* ao aumentar a centralização das unidades de produção e sugerem um padrão de eliminação das unidades de produção nas configurações, mesmo testando todas as combinações de configuração. Mais ainda, uma das unidades está presente em todas as melhores configurações alcançadas e outra unidade apenas na configuração que utiliza a descentralização total. Também foram analisados cenários alternativos baseados nas projeções de crescimento populacional que indicam necessidade de aumento na quantidade coletada nos próximos anos para manter os níveis de estoque apresentado no cenário original, sugerindo necessidade de adotar estratégias como campanhas de coleta, instalação de unidades em outros municípios e utilização de unidades móveis.

Palavras-chave: cadeia de suprimentos de sangue; rede de filas; método aproximado de decomposição; abordagem algorítmica.

Abstract

Blood is essential to human life as it is used in various procedures that require blood replacement. Effective management of the blood supply chain is critical to ensuring appropriate patient care and minimizing waste. However, the perishable nature of blood products makes this management even more challenging. Operations Research (OR) is a valuable tool to deal with this complexity. However, few studies have used OR techniques to analyze Brazilian blood supply chains. The objective of this work is to develop an approach based on queue networks to evaluate blood supply chains, focusing on the configuration of Brazilian blood networks. To this end, an algorithm was developed to analyze the possible combinations of quantities and locations of production facilities, using the approximate decomposition method to evaluate the performance measures of each analyzed configuration. The results show the suggested configuration of production stations for each number of units installed, taking into account the shortest average transport time of blood bags. The results also indicate an increase in lead time as the centralization of production units increases and suggest a pattern of eliminating production units in configurations, even when all configuration combinations are tested. In addition, one of the units is included in all the best configurations achieved and another unit only in the configuration that uses total decentralization. Alternative scenarios based on population growth projections were also analyzed and indicated the need to increase the collection in the coming years in order to maintain the inventory levels of the original scenario, suggesting the need to adopt strategies such as collection campaigns, setting up units in other municipalities and using mobile units.

Keywords: blood supply chain; queueing network; approximate decomposition method; algorithmic approach.

Lista de figuras

Figura 1 – Fluxo de informações e produtos na cadeia de suprimentos sanguínea	20
Figura 2 – Possíveis transições para o estado n no intervalo de tempo Δt	35
Figura 3 – Processos básicos na computação das medidas de desempenho da estação j .	38
Figura 4 – Rede de Suprimentos da HEMOX	43
Figura 5 – Configuração da Rede de Filas para a HEMOX	44
Figura 6 – Projeção da população idosa e população doadora em Santa Catarina	53
Figura 7 – Percentuais de alcance do estoque ideal	55

Lista de tabelas

Tabela 1 – Vida útil dos Hemocomponentes	22
Tabela 2 – Descrição da Notação	38
Tabela 3 – Dados HEMOX	49
Tabela 4 – Distância entre as localidades candidatas (km)	49
Tabela 5 – Melhores configurações para cada quantidade de unidades de produção	50
Tabela 6 – Melhores configurações obtidas utilizando a Rede de Jackson	51
Tabela 7 – Análise de outras instâncias	52
Tabela 8 – Cenários Alternativos Analisados	53

Lista de Algoritmos

1	Abordagem Algorítmica	45
---	-----------------------------	----

*

Lista de abreviaturas e siglas

FIFO	First-in-first-out ou "primeiro a entrar, primeiro a sair"
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LIFO	Last-in-first-out ou "último a entrar, primeiro a sair"
HEMOSC	Hemocentro de Santa Catarina
HEMOX	Cadeia de suprimentos sanguínea adaptada de uma hemorrede de referência brasileira
NAT	Nucleic Acid-Amplification Testing ou, em português, Teste de Ácido Nucleico
PO	Pesquisa Operacional

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Justificativa	17
1.4	Organização da Dissertação	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Cadeia de Suprimentos Sangue	19
2.2	Aplicações de Pesquisa Operacional em Cadeias de Suprimento de Sangue	24
2.3	Rede de Filas	34
2.3.1	Métodos Aproximados de Decomposição em Redes de Filas Genéricas	36
3	METODOLOGIA	42
3.1	Caracterização do Sistema Analisado	42
3.2	Rede de Filas para a HEMOX	44
3.3	Modelagem	45
4	RESULTADOS	48
4.1	Cenário Analisado	48
4.2	Experimentos Numéricos	49
4.3	Análise de Sensibilidade	51
4.4	Cenários Alternativos	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	Referências	58
	Anexos	67
A	Autorização HEMOSC	67
B	Projeções Utilizadas Nos Cenários Alternativos	68

1 Introdução

Neste capítulo é apresentado uma contextualização do problema sob a perspectiva brasileira. Além disso, são apresentados os objetivos a serem alcançados, a justificativa do trabalho, bem como, a estrutura desta dissertação.

1.1 Contextualização

O sangue é essencial para a vida do ser humano, uma vez que é utilizado em diversos procedimentos em que a reposição do sangue se faz necessária, como cirurgias, tratamento de doenças crônicas, traumatismos, anemias, hemorragias, hemodialisés, transplantes de órgãos, procedimentos de emergências e no tratamento de outras disfunções. Contudo, a reposição sanguínea ou de outro hemocomponente é realizada de acordo com o diagnóstico clínico, a necessidade e a compatibilidade entre o doador e o receptor.

Além disso, a oferta e demanda de hemocomponentes (produtos gerados nos serviços de hemoterapia, a partir do sangue, por meio de processos físicos) não é balanceada, especialmente em cenário de crescente demanda por hemocomponentes bem como a redução da população doadora (SEIFRIED *et al.*, 2011). Segundo a WHO (2014), a taxa de pessoas elegíveis que realmente doam sangue é inferior a 20% em países de renda média e baixa. Outro fator é o custo incorrido ao longo do processo com mão de obra, testes, fracionamento (separação do sangue total em subprodutos), armazenamento e distribuição. Não obstante, carência de algum hemocomponente no momento adequado, conhecidos como ruptura ou falta de estoque, pode suscitar consequências fatais, pois representa o não atendimento de algum paciente Magalhães *et al.* (2024). Sendo assim, gerenciar adequadamente cadeias de suprimentos sanguínea se faz necessário, uma vez que essas cadeias lidam com produtos perecíveis com oferta e demanda estocásticas e devem, ao mesmo tempo, reduzir o desperdício minimizando os custos.

Mudanças na demografia mundial também vêm preocupando estudiosos de cadeia de suprimentos de sangue, uma vez que os padrões de consumo e doações do insumo variam de acordo com a idade dos usuários (YU *et al.*, 2020). No Brasil, de acordo IBGE (2022), entre 2012 e 2021, o número de pessoas abaixo de 30 anos de idade no país caiu 5,4%, enquanto houve um aumento em todos os grupos acima dessa faixa etária no período. Com isso, pessoas de 30 anos ou mais passaram a representar 56,1% da população total em 2021 em comparação com 50,1% em 2012. Nesse período, a parcela de pessoas com 60 anos ou mais saltou de 11,3% para 14,7% da população. Com o aumento da expectativa de vida da população, pesquisas avaliam o aumento da demanda por transfusão sanguínea e concluem que: (i) o envelhecimento da população está relacionado ao aumento da demanda e redução da oferta de sangue já que estudos apontam que entre 48% e 62% das transfusões sanguíneas são realizadas em pessoas com mais de 65 anos de

idade (GREINACHER et al., 2017; VOLKEN et al., 2018; OLIVEIRA; REIS, 2020); (ii) a maior parte das doações são feitas por pessoas jovens (GREINACHER; FENDRICH; HOFFMANN, 2010; GREINACHER et al., 2016; GREINACHER et al., 2017; ZUCOLOTO et al., 2019).

Portanto, faz-se necessário pesquisas e novas metodologias que contribuam para um gerenciamento eficiente da cadeia de suprimento de sangue visto que cenários de escassez sanguínea estão previstos para as próximas décadas no Brasil e no mundo. Além disso, em função da incerteza na oferta e demanda de sangue, a gestão da cadeia ainda é mais desafiadora e complexa. Por este motivo, desenvolver novas metodologias de gerenciamentos e ferramentas de apoio a decisão é de grande relevância tanto para a sociedade que se beneficiará da implementação de cadeias de suprimento de sangue mais eficientes quanto para a ciência que poderá evoluir ao analisar modelos e aplicá-los nas cadeias de suprimento de sangue.

Sendo assim, o gerenciamento da cadeia de suprimento de sangue é complexo, pois a característica perecível dos produtos sanguíneos, impacta nos níveis de desperdício e escassez de bolsas de sangue (ABBASI; HOSSEINFARD, 2014). Essa perecibilidade acontece por razões biológicas e químicas já que os componentes têm vida útil limitada fora do corpo humano em função do metabolismo das células, degradação do plasma ao longo do tempo, riscos de contaminação bacteriana e necessidade de armazenado em temperaturas específicas (AABB, 2020). Portanto é necessário o uso de ferramentas que auxiliem o gerenciamento e a tomada de decisão em cadeias de suprimentos de sangue. Nessa perspectiva, a Pesquisa Operacional (PO) vem sendo amplamente utilizada por permitir a implementação de técnicas matemáticas, principalmente quando comportamentos aleatórios estão presentes.

No contexto brasileiro, estudos sobre a cadeia de suprimento de sangue com a aplicação da PO também são escassos. Entretanto, pode-se citar: (i) Ferreira, Carmo e Oliveira (2019) implementam um sistema para gerenciar os níveis de estoque nos bancos de sangue e direcionar as campanhas de coleta, objetivando maximizar o atendimento à demanda e minimizar o descarte em função dos prazos de validade dos produtos; (ii) Soares et al. (2020) analisam a expansão de coletas externas para complementar o estoque das bolsas de sangue e evitar escassez; (iii) Ribeiro (2022) utiliza a simulação a eventos discretos para avaliar a configuração atual da rede de suprimentos do estado de Santa Catarina e cenários alternativos de aumento de demanda e centralização da produção de hemoderivados (produtos obtidos em escala industrial, a partir do fracionamento do plasma por processos físico-químicos); (iv) Magalhães et al. (2024), que avalia o gerenciamento de estoque de hemocomponentes com objetivo de determinar níveis mínimos de estoques considerando níveis de perda e ruptura pré-estabelecidos.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma abordagem algorítmica utilizando rede de filas para analisar as possíveis combinações de quantidades e localização de unidades de produção

em Cadeias de Suprimentos de Sangue. Pretende-se utilizar esse algoritmo para melhorar o funcionamento das operações e minimizar as perdas e escassez em toda a cadeia.

Especificamente, é proposto:

- Adaptar método aproximado de decomposição para avaliar rede de filas genéricas em cadeia de suprimentos de sangue;
- Integrar o método aproximado de decomposição a uma abordagem algorítmica para avaliar as possíveis combinações de quantidades e localização de estações de produção;
- Utilizar a abordagem desenvolvida para avaliar medidas de desempenho de cada configuração analisada da cadeia de suprimentos de sangue;
- Analisar cenários alternativos de configuração da cadeia considerando as alterações nos padrões de doação e demanda esperados em função da mudança na pirâmide etária entre 2030 e 2070.

1.3 Justificativa

A gestão eficaz da cadeia de suprimentos sanguínea é fundamental para garantir o acesso adequado aos hemocomponentes, minimizar o desperdício e atender às demandas crescentes de sangue nos diferentes serviços de saúde. Este processo complexo é influenciado por uma série de fatores, incluindo a oferta e demanda de sangue, a demografia da população, a precibilidade dos produtos sanguíneos e os avanços tecnológicos na medicina. São listadas algumas motivações da pesquisa.

- **Demografia em mudança:** com o envelhecimento da população, a demanda por transfusões sanguíneas tende a aumentar, uma vez que cerca metade das transfusões são realizadas em pessoas com mais de 60 anos de idade (ZUCOLOTO et al., 2019). No entanto, a maioria das doações é feita por pessoas mais jovens. Essa disparidade entre a oferta e a demanda é agravada pela redução da população doadora, conforme evidenciado pela diminuição do número de pessoas elegíveis que realmente doam sangue, especialmente em países de renda média e baixa (WHO, 2014). Portanto, é crucial desenvolver estratégias para lidar com esse desequilíbrio demográfico e garantir um suprimento adequado de sangue para as populações em envelhecimento.
- **Impacto econômico e de saúde:** a escassez de sangue pode ter consequências fatais, já que a falta de hemocomponentes no momento adequado pode resultar no não atendimento de pacientes em situações críticas, como cirurgias, tratamento de doenças crônicas e emergências médicas. Além disso, o processo de reposição sanguínea envolve custos significativos, desde a coleta e armazenamento até a distribuição dos hemocomponentes. Portanto, uma gestão eficiente da cadeia de suprimentos

sanguínea não apenas salva vidas, mas também contribui para a melhoria do uso dos recursos financeiros na área da saúde.

- **Desafios logísticos e tecnológicos:** a cadeia de suprimentos sanguínea enfrenta desafios logísticos únicos devido à natureza perecível dos produtos sanguíneos. A necessidade de garantir a qualidade e a segurança dos hemocomponentes ao longo de todo o processo, desde a coleta até a transfusão, requer o uso de tecnologias avançadas e sistemas de rastreamento eficazes. Além disso, as mudanças nas práticas médicas e nos padrões de consumo de sangue exigem constantes adaptações na gestão da cadeia para garantir a eficiência e a eficácia do processo de suprimento sanguíneo.

- **Contribuição da Pesquisa Operacional:** a PO oferece ferramentas e técnicas matemáticas que podem ser aplicadas para resolver problemas complexos de gestão da cadeia de suprimentos sanguínea. Essas abordagens permitem a modelagem de comportamentos aleatórios e a otimização de processos, ajudando a tomar decisões logísticas em relação ao gerenciamento de estoques, distribuição e alocação de recursos (ABBASI; HOSSEINIFARD, 2014). No contexto brasileiro, há escassez de estudos sobre a cadeia de suprimento de sangue com a aplicação da PO.

Diante desses desafios e considerando a importância vital do sangue na medicina moderna, a implementação de estratégias de gestão e a condução de pesquisas inovadoras na área da cadeia de suprimentos sanguínea são essenciais para garantir o acesso equitativo aos hemocomponentes e melhorar a qualidade do acesso aos serviços de saúde prestados à população.

1.4 Organização da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. O capítulo em curso introduz, contextualiza e apresenta a justificativa, além dos objetivos desta pesquisa. O segundo capítulo apresenta a revisão de literatura dessa dissertação descrevendo as características de cadeias de suprimento de sangue, as aplicações de Pesquisa Operacional nessa cadeia e os principais conceitos e derivações utilizados sobre rede de filas. O terceiro capítulo descreve a cadeia de suprimentos sanguínea, a rede de filas associada e o algoritmo proposto para avaliar combinações de quantidades e localização de estações de produção. No quarto capítulo tem-se os dados da configuração inicial bem como os resultados para esta configuração além da análise de sensibilidade e cenários alternativos de aumento de demanda. Ao final, no quinto capítulo, tem-se as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros da dissertação.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo fornece: (i) uma descrição das características de cadeias de suprimento de sangue, considerando os hemocomponentes, as etapas, instalações e níveis de planejamento; (ii) um levantamento de estudos com aplicações quantitativas em PO em cadeias de suprimento de sangue; (iii) conceitos e derivações sobre rede de filas e métodos aproximados de decomposição em redes de filas genéricas.

2.1 Cadeia de Suprimentos Sangue

Na literatura clássica, cadeia de suprimentos representa uma rede de organizações que produzem valor na forma de produtos e serviços interligadas por esforços de interação e troca de informações entre os participantes, desde a compra de matéria-prima, passando pela transformação dessa matéria em produtos intermediários e depois em produtos finais, até a entrega deste último ao cliente final, com a finalidade de criar valor para um determinado cliente ou público (LEE; BILLINGTON, 1995; CHRISTOPHER, 1998; BALLOU, 2006). Mais recentemente, Islam, Shen e Badsha (2022) descreve a cadeia de suprimentos como um sistema que trabalha na produção e entrega de um produto acabado ao usuário final, incluindo a movimentação do produto por toda a cadeia desde o início do fornecimento das matérias-primas em que prestadores de serviços trabalham juntos para manter a qualidade do produto e a proteção de informações, equipamentos e instalações em todas os processos da cadeia de suprimentos.

Apesar das cadeias sanguíneas apresentarem similaridades com as cadeias de suprimento tradicionais, algumas particularidades as diferem até mesmo das cadeias de suprimentos de produtos perecíveis, principalmente em relação ao impacto social que pode ser gerado. O sangue é um produto altamente perecível e que possui diversos componentes com prazos de validade diferente. Mais ainda, têm-se altas taxas de desperdícios em função do curto prazo de validade dos componentes sanguíneos (PIERSKALLA, 2005). Existe também uma grande dificuldade em realizar o seu planejamento devido à alta variabilidade no suprimento, local e data de coleta. Além disso, as demandas e ofertas são aleatórias e possuem características estocásticas o que torna a busca por soluções ainda mais complexa.

Osório, Brailsford e Smith (2015) informam que diferentes configurações da cadeia de suprimentos sanguínea podem ser encontradas, desde bancos de sangue internos em hospitais até múltiplos centros de coleta, processamento e distribuição que atendem a diversos pontos de demanda. A estratégia varia conforme as políticas de saúde de cada país. Contudo, os mesmos autores argumentam que os objetivos permanecem os mesmos, ou seja, atender a demanda por hemoderivados com custo e desperdício mínimos.

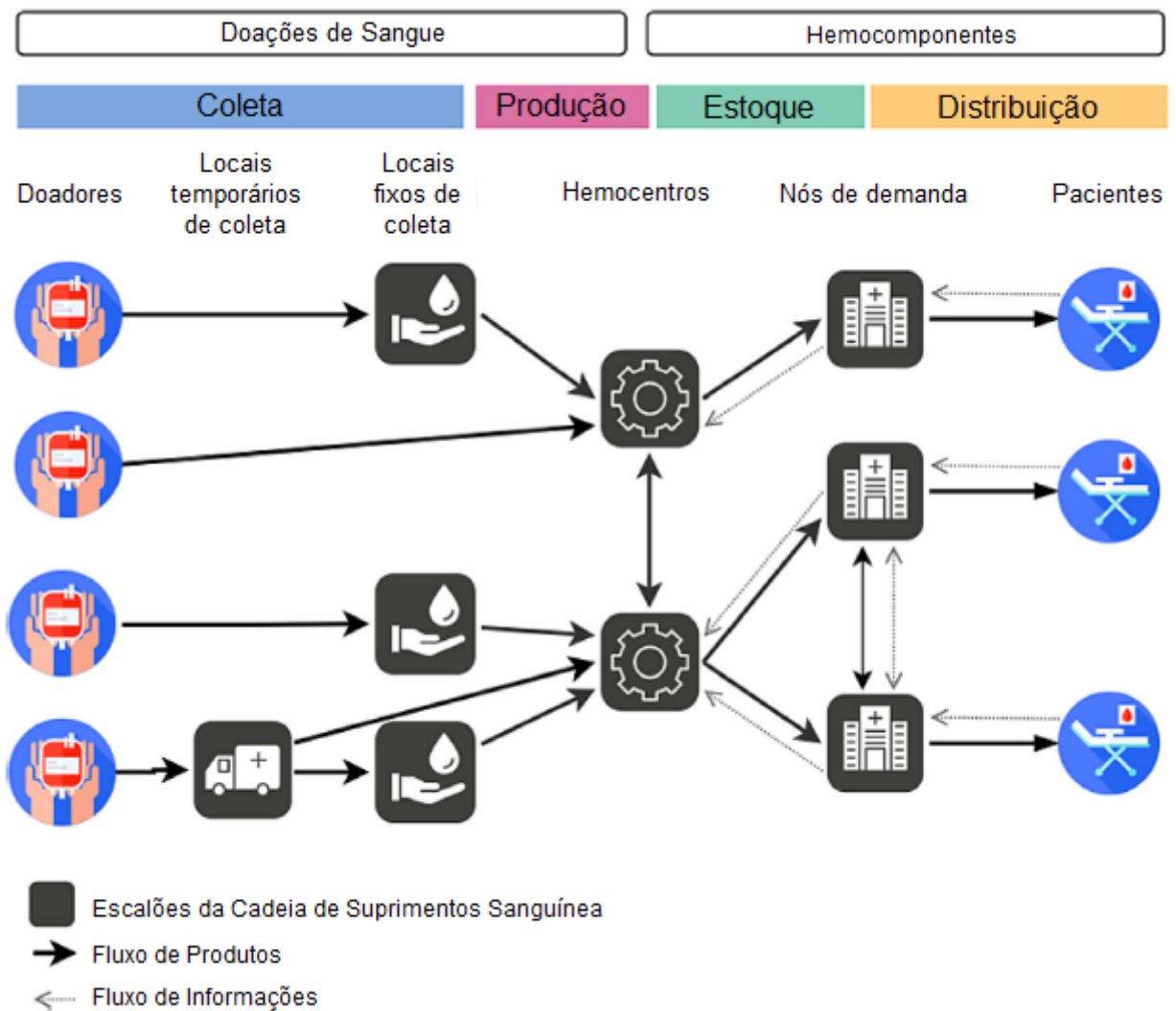


Figura 1 – Fluxo de informações e produtos na cadeia de suprimentos sanguínea
 Fonte: adaptado de [Meneses, Santos e Barbosa-Póvoa \(2023\)](#)

A cadeia de suprimento de sangue é composta por quatro processos principais: coleta, produção, estoque e distribuição que são apoiados por diferentes instalações, conforme Figura 1. Sendo assim, o processo inicia-se com um candidato à doação sanguínea disposto a realizar uma doação. No Brasil, a doação é ato voluntário e sigiloso no qual é vedado ao doador receber qualquer benefício advindo de sua doação, conforme é descrito na Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017 ([BRASIL, 2017](#)). A doação pode ser realizada com doação de sangue total (usando uma punção em veia no braço do doador) ou por aférese (o sangue é retirado usando um equipamento especializado que separa os componentes do sangue por centrifugação e depois devolve o restante dos componentes para o corpo do doador). A coleta por aféreses permite a retirada de componente específicos, contudo, ela é utilizada somente em alguns casos devido ao seu alto custo e maior tempo de duração de coleta ([OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015](#)). Após a doação, o paciente é encaminhado para realização da hidratação e alimentação e, em seguida, é liberado para voltar a sua rotina. Os custos neste processo consistem, principalmente,

no custo da bolsa de coleta de sangue, custo com pessoal habilitado para fazer o procedimento, custo de utilização de ferramentas e custos operacionais associados a cada etapa do processo coleta (PIRABÁN; GUERRERO; LABADIE, 2019).

Após a coleta, a bolsa de sangue é encaminhada para o processo de produção em que o sangue é processado em hemocomponentes obtidos através de processos físicos, como a centrifugação e o congelamento (MAGALHÃES et al., 2024). Com relação à notação aos hemocomponentes extraídos a partir de uma bolsa de sangue, os glóbulos vermelhos representam 63,4% do total de produtos transfundidos, seguido pelo plasma com 17,8%, as plaquetas com 13,6% e o crioprecipitado com 5% (DHHS, 2011).

Paralelamente ao processamento de hemocomponentes, são realizados nas amostras coletadas no processo de testes sorológicos, exames imunohematológicos e exames para especificar o tipo sanguíneo (ARC, 2017). Essa etapa também inclui um período chamado de quarentena, em que os produtos são isolados enquanto as amostras são testadas para identificar doenças e outras anomalias (OSÓRIO et al., 2017). Caso os resultados dos testes e dos exames apresentem alguma anomalia é necessário realizar o descarte da bolsa de sangue, caso contrário, o sangue e os hemocomponentes permanecem armazenados para serem enviados para a produção de hemoderivados ou para atender alguma solicitação específica.

Após a produção, ocorre o armazenamento dos hemocomponentes. Pirabán, Guerrero e Labadie (2019) afirmam que a gestão de estoque deve garantir a suficiência de hemoderivados na cadeia de suprimentos sanguínea e que este processo tem recebido maior atenção na literatura, principalmente devido ao curto prazo de validade de alguns produtos, como as plaquetas. O autor argumenta ainda que a literatura sobre o tema propõe o uso de políticas clássicas de estoque e suas modificações para determinar a quantidade a ser pedida e a periodicidade. A periodicidade mais utilizada na cadeia de suprimentos sanguínea para verificação dos níveis de estoque é um dia (OSÓRIO et al., 2017). Duan e Liao (2013), Duan e Liao (2014) apresentam política de inventário em que a quantidade por pedido é determinada considerando apenas o número de itens em estoque e, em seguida, pelo cálculo da proporção de itens com vencimento próximo em relação ao total de itens disponíveis e, caso essa proporção exceda um determinado limite, um reabastecimento adicional igual ao número total de itens com vencimento próximo é acionado. Importante ressaltar que além das entregas programadas de rotina, os pontos de demanda (hospitais, clínicas conveniadas, agências transfusionais e outros) podem solicitar: (i) pedidos emergenciais para atender a demanda quando não há produto disponível em estoque e (ii) pedidos emergenciais para reabastecer o estoque esgotado (KATSALIAKI, 2008; BLAKE et al., 2013).

Por fim, ocorre a distribuição dos hemocomponentes. Osório, Brailsford e Smith (2015) argumentam que este processo é altamente complexo, pois o sangue é transportado não apenas entre hemocentros e hospitais, mas também entre os hemocentros nos países em que existem sistemas regionais ou mesmo nacionais. Neste sentido, Osório, Brailsford e Smith (2015) afirmam

que os processos de distribuição podem variar consideravelmente conforme a configuração dos pontos de demanda na cadeia de suprimento de sangue, pois em locais onde há um serviço regional de sangue, este pode ser transportado de um hemocentro para outro se houver falta em um local e excesso de oferta em outro. Geralmente, os hospitais fornecem pedidos diários de sangue do seu centro de sangue local, com base em dados históricos, tabelas de especificações, previsões e conhecimento clínico (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015). O processo de distribuição na cadeia de suprimento de sangue deve lidar com situações complexas, pois, em alguns casos, não é desejável manter estoques em hospitais de baixa demanda para produtos escassos como AB negativo (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015). Em outras palavras, o estoque deve ser mantido em hemocentros e enviado aos hospitais em casos de emergência, com pouca antecedência.

Além dos processos e fluxos apresentados na Figura 1, cadeias de suprimento de sangue devem se preocupar com quantidade de doações, avaliando necessidade de deslocamento de equipes para a realização de coletas externas e incentivo a doação por meio de campanhas. Essas cadeias também são responsáveis pelo descarte do sangue, hemocomponentes e de todos os materiais oriundos do processamento.

A cadeia de suprimento de sangue é iniciada com os doadores de sangue e é finalizada nos pontos de demanda com as transfusões sanguíneas de hemocomponentes para os pacientes. A transfusão sanguínea é regularmente utilizada em casos de cirurgias, acidentes e em condições como leucemia. Lowalekar e Ravichandran (2013) explicam que: (i) as hemácias são necessárias para pacientes que sofrem de anemia falciforme, sangramento gastrointestinal ou insuficiência renal; (ii) as plaquetas são utilizadas em pacientes com distúrbios hemorrágicos, casos de leucemia e àqueles submetidos a terapia contra o câncer ou cirurgia de coração aberto; (iii) já o plasma é administrado às vítimas de traumas, queimaduras e aos pacientes com distúrbios de coagulação. A Tabela 1 apresenta as características dos hemocomponentes.

Tabela 1 – Vida útil dos Hemocomponentes

Hemocomponente	Vida útil	Condições de Armazenamento
Concentrado de Plaquetas	5 dias	Temperatura ambiente (20-24°C) com agitação constante
Concentrado de Hemácias	35 a 42 dias	Temperatura controlada entre 2-6°C
Plasma Fresco Congelado	12 meses	Temperatura entre -25°C e -18°C
	24 meses	Temperatura abaixo de -25°C

Fonte: Adaptado de MINISTÉRIO DA SAÚDE (2015)

Importante ressaltar que no processo de transfusão, o paciente geralmente recebe o mesmo tipo sanguíneo que possui, porém, em casos de indisponibilidade é possível realizar a transfusão de acordo com a compatibilidade sanguínea existente entre o paciente e o doador, utilizando a relação entre grupos sanguíneos ABO (A, B, AB, O) em conjunto com o fator Rhesus (Rh) que pode ser classificado como positivo ou negativo, resultando em oito tipos diferentes de sangue.

A saúde e a segurança dos pacientes dependem de questões de planejamento, coordenação e cooperação ao longo da cadeia de suprimentos e entre os processos observados na Figura 1. Nesse sentido, é importante associar as decisões em cada nível de planejamento (estratégico, tático e operacional) com as etapas de cadeias de suprimento de sangue. Essa decomposição em níveis de decisão é necessária, pois um modelo integrado em larga escala, que considera toda a rede e as decisões de planejamento simultaneamente, é considerado complexo por ser difícil de obter informações de boa qualidade devido ao grande volume de dados (MENESES; SANTOS; BARBOSA-PÓVOA, 2023).

No nível estratégico, as decisões estão relacionadas ao projeto de rede, ou seja, a concepção e estrutura da cadeia de abastecimento, criando uma base para o desenvolvimento da cadeia de suprimentos, uma vez que o horizonte de planejamento é de vários anos e tem altos custos associados (MENESES; SANTOS; BARBOSA-PÓVOA, 2023). Com relação a centralização ou descentralização da cadeia de fornecimento de sangue, Osório et al. (2018) afirmam que as economias de escala tendem a favorecer os grandes centros de produção, contudo apesar dos benefícios da centralização, muitos exemplos da cadeia de fornecimento de sangue descentralizada podem ser encontrados. As razões para manter uma estrutura descentralizada diferem de país para país, embora grandes distâncias, altos custos e dificuldades de transporte tendem a favorecer sistemas descentralizados e revelar a necessidade de hemocentros locais para evitar o risco de ruptura de estoque, além de promover o desenvolvimento econômico local. Além disso, o planejamento de rede impacta: (i) o planejamento tático ao influenciar diretamente no planejamento de coleta e produção em função do tamanho/capacidade das instalações; (ii) o planejamento da distribuição, pois a alocação entre as instalações é relevante para definir as rotas principais e as políticas de transbordo, possuindo como fator limitante a capacidade da frota de distribuição (MENESES; SANTOS; BARBOSA-PÓVOA, 2023).

No nível tático, as decisões estão relacionadas ao planejamento dos processos de coleta, produção e distribuição, além do gerenciamento de estoque. Com relação a coleta, Osório, Brailsford e Smith (2015) afirmam que as decisões incluem definições de políticas, planejamento de campanhas de coleta, alocação de pessoal e pontos de coleta e estabelecimento de metas em relação à quantidade semanal ou mensal de sangue a ser coletada nas diferentes instalações de coleta, geralmente dentro de uma estrutura anual, relacionando as políticas de coleta e planejamento de recursos, para garantir a produção de hemocomponentes capaz de fornecer um suprimento eficaz na cadeia sanguínea. As decisões táticas no planejamento da produção geralmente se referem ao planejamento do uso das capacidades, *layout* de instalações, incorporando alocação de pessoal e planos mestres de produção, uma vez que tal decisão não é facilmente reversível (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015). Meneses, Santos e Barbosa-Póvoa (2023) acrescentam que nas decisões táticas para o processo de produção, é preciso incluir o nível de serviço desejado nos pontos de demanda. As decisões táticas para a distribuição incluem o roteamento e alocação que são influenciados pelas escolhas dos tipos de veículos, capacidade e pessoal (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015; MENESES; SANTOS; BARBOSA-PÓVOA, 2023). Com rela-

ção às políticas de estoque, as decisões táticas referem-se à definição de políticas de estoque e alocação de pessoal (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015) e quantidades de pedidos de cada hemoderivado pelos nós de demanda para os hemocentros que, então, orientam as decisões operacionais de quando e quantos produtos pedir (MENESES; SANTOS; BARBOSA-PÓVOA, 2023).

Por fim, no nível operacional, as decisões estão relacionadas ao agendamento de coleta, programação da produção, programação do transporte e atendimento da demanda. No processo de coleta, as decisões compreendem questões sobre agendamento, métodos de coleta que podem variar por doador e rotas de coleta Osório, Brailsford e Smith (2015) e determinação de metas de coleta diária ou semanal de tipos sanguíneos específicos para produzir produtos específicos para atender às necessidades de armazenamento e utilização (MENESES; SANTOS; BARBOSA-PÓVOA, 2023). As decisões operacionais para o processo de produção se referem ao planejamento diário, como agendamento de equipe, formas para fracionamento do sangue, cronograma e agendamento de exames (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015; MENESES; SANTOS; BARBOSA-PÓVOA, 2023). O planejamento no curto prazo da distribuição implica no agendamento de veículos, embalagem, transbordos entre diferentes pontos e atendimento a restrições de janela de tempo (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015). Meneses, Santos e Barbosa-Póvoa (2023) afirmam que no planejamento da distribuição de curto prazo são definidos quando e para onde cada veículo vai e o que ele carrega, devendo ser considerado as capacidades de transporte e pedidos, reais ou previsões, de curto prazo dos nós de demanda. Por fim, no que tange o processo de estoque e atendimento da demanda, as decisões operacionais estão relacionadas às quantidades diárias a serem solicitadas e direcionadas a cada local, como atender pedidos especiais e/ou quais produtos específicos devem ser emitidos para atender as demandas com o hemocomponente adequado no momento adequado (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015).

2.2 Aplicações de Pesquisa Operacional em Cadeias de Suprimento de Sangue

Conforme mencionado, características da cadeia de suprimento de sangue, como perecibilidade, tipos sanguíneos e incerteza de oferta e demanda, afetam as decisões em todas as etapas da cadeia adicionando complexidade ao processo de tomada de decisão. Portanto, é necessário o uso de ferramentas que auxiliem e apoiem a tomada de decisão. Nessa perspectiva, a PO vem sendo amplamente utilizada por permitir a implementação de técnicas matemáticas, principalmente quando comportamentos aleatórios estão presentes.

Osório, Brailsford e Smith (2015) afirmam que a maior parte da literatura em cadeia de suprimento de sangue está focada em estudos concentrados em apenas um dos processos da cadeia. Em consonância, no estudo de Pirabán, Guerrero e Labadie (2019), 85% dos trabalhos

encontrados na literatura consideravam apenas um processo da cadeia de suprimento sanguínea, mas o autor afirma que, no entanto, publicações recentes visam conectar toda a cadeia de suprimento sanguínea. Sendo assim, seguem alguns trabalhos encontrados na literatura sobre um dos processos da cadeia de suprimentos de sangue envolvendo PO. Os artigos estão organizados por processo da cadeia de suprimentos de sangue: coleta, produção, armazenagem e distribuição.

No processo de coleta de sangue, se inicia a cadeia de suprimento sanguínea, a partir da obtenção das bolsas de sangue. Desta forma, [Alfonso et al. \(2012\)](#) analisam o processo de coleta de sangue realizada em unidades de coletas fixas e temporárias na França objetivando conciliar o planejamento de recursos humanos e o fluxo de doadores de forma a reduzir o tempo de espera dos doadores e os custos de coleta de sangue. Foi utilizada a rede de Petri para descrever diferentes processos de coleta de sangue, comportamentos de doadores e os requisitos de recursos humanos aliada com a simulação de eventos discretos de forma a considerar os dados estocásticos, como, por exemplo, o tempo de processamento.

[Lizarazo, Xie e Augusto \(2012\)](#) abordam o problema de agendamento de consultas de doadores de plasma e plaquetas objetivando minimizar o tempo total de espera de todos os doadores de um dia, considerando tanto os doadores agendados quanto doadores sem agendamento. Nessa pesquisa, foi proposto primeiramente um modelo de rede de Petri para representar os processos de coleta de sangue em um local fixo considerando os protocolos de coleta de sangue e os requisitos de recursos. Com base nesta rede de Petri, o sistema foi modelado utilizando redes de filas abertas e simulação. Em seguida, o problema de agendamento de consultas de doadores de plasma e plaquetas em um horizonte de planejamento finito foi abordado utilizando programação não linear inteira mista, a fim de minimizar o tempo total de espera de doadores, agendados e aleatórios. No modelo, os tempos de espera dos doadores que chegam em cada período de tempo são aproximados pelas medidas de desempenho de estado estacionário correspondentes da rede de filas abertas.

[Brummelen, Kort e Dijk \(2015\)](#) desenvolveram uma abordagem utilizando teoria de filas e um algoritmo para calcular uma distribuição de atraso total e tempos de espera em locais de coleta de sangue independentemente das taxas de chegada, taxas de serviço e número de funcionários na Holanda. Posteriormente, [Brummelen, Kort e Dijk \(2018\)](#) aproximam o estudo anterior à realidade ao considerar os parâmetros do sistema como não estacionários e uma estrutura de rede de filas.

[Osório et al. \(2018\)](#) apresentam um modelo de programação linear inteira estocástica e multiobjetivo que considera a coleta de sangue total e por aférese para vários hemocomponentes e diferentes tecnologias para a produção na cidade de Bogotá, Colômbia. O objetivo do modelo é minimizar os custos e determinar o número de doadores necessários, apoiando a tomada de decisão ao considerar diferentes níveis de centralização e diferentes métodos de coleta e produção. Importante ressaltar que a função de custos dos autores compreende os custos fixos das instalações, custos variáveis de coleta e produção, custos variáveis de manuseio, custos de

estoque e transporte, bem como penalidades por falta de estoque.

Özener e Ekici (2018) analisaram o problema de coleta de sangue e transporte das bolsas de sangue utilizando frota de veículos responsáveis por encaminhar as bolsas de sangue dos locais de coleta para um centro de processamento centralizado. A programação linear inteira mista em conjunto com quatro heurísticas diferentes foi utilizada para maximizar a quantidade de sangue coletada a partir do agrupamento de locais nos quais apenas um veículo é responsável pelo atendimento de cada agrupamento.

Yu et al. (2018) utilizam a heurística Simulated Annealing para otimizar o roteamento de coleta de sangue com janela de tempo. No estudo dos autores, o banco de sangue envia um veículo para os locais de coleta e este veículo retorna para o banco de sangue, respeitando a perecibilidade sanguínea para que seja feito o processamento.

Soares et al. (2020) desenvolvem um modelo markoviano para avaliar a possibilidade de aumentar as coletas externas como forma de complementar as doações feitas nos hemocentros minimizando os descartes de bolsas de sangue, os níveis de escassez e os custos gerais com coleta interna e externa, armazenamento, produção, transporte.

Ghasemi et al. (2022) analisam uma cadeia de suprimentos de sangue em dois níveis, abordando a incerteza durante a pandemia de COVID-19. Utilizando uma abordagem da teoria dos jogos de Stackelberg, eles desenvolveram um novo modelo de programação linear inteira mista que minimiza os custos totais e maximiza o desempenho da etapa de doação. Os dados de um estudo de caso real na província de Mazandaran, no Irã, são utilizados para validar a aplicabilidade e o desempenho do modelo proposto.

Aghsami et al. (2023) propõem um modelo matemático que minimiza os custos totais e maximiza a satisfação do doador ao reduzir o tempo de espera no sistema. O modelo aborda vários aspectos da cadeia, tais como localização de centros de coleta, alocação de doadores aos centros de coleta, controle de estoque no centro de sangue principal, escassez e deterioração de sangue e sistemas de filas em centros de coleta ao longo de um horizonte de planejamento. Eles apresentaram um caso real conduzido em Teerã que foi resolvido usando um algoritmo meta-heurístico para ilustrar a aplicabilidade do modelo.

O estudo de Hosseini-Motlagh, Samani e Faraji (2024) apresenta uma abordagem para lidar com as flutuações dinâmicas no comportamento dos doadores de sangue, especialmente em ambientes urbanos com condições diárias incertas. Foi proposto um plano de coleta atualizável baseado em horizonte rolante de planejamento utilizando uma estratégia operacional que atualiza continuamente as estratégias de coleta de sangue. Então, para mitigar a incerteza em vários parâmetros, como comportamento dos doadores, demanda, tempo de transporte e custo operacional, os autores desenvolveram uma abordagem utilizando otimização robusta.

Diglio et al. (2024) propõem um modelo matemático, centrado na primeira etapa da cadeia de suprimentos de sangue italiana, ou seja, na coleta de sangue. Os principais objetivos consistem

na minimização de custos de transporte e racionalização do número e tipo de instalações, através do fechamento ou alteração do tipo de instalação. Os resultados indicaram que a ferramenta proposta possibilita a simulação de diferentes configurações de sistemas.

Após a coleta do sangue ocorre o processo de produção. Nesse processo ocorrem os testes das amostras e o fracionamento das bolsas de sangue em hemocomponentes. O processo de produção é uma das menos abordadas na literatura, em termos de estudos na cadeia de suprimentos sanguínea (PIRABÁN; GUERRERO; LABADIE, 2019).

Bar-Lev et al. (2009) analisaram os tempos de permanência em uma rede de filas abertas. Essa rede utilizava um nó de processamento para representar as etapas de controle e testes de qualidade e um nó para testes adicionais, com chegadas de Poisson no nó de processamento em exames de sangue. Caso sejam constatadas anomalias no nó de processamento, o cliente é destinado para o nó de testes adicionais, caso contrário, o cliente sai do sistema. Nesse estudo, caso o sangue não seja aprovado nos testes, ou seja, seja reprovado no segundo teste, é possível que ele seja encaminhado para um próximo nó de testes adicionais e assim em diante. Os autores realizaram várias aproximações para a distribuição do tempo total de permanência na rede.

O processo de estoque é mais estudado em termos de estudos na cadeia de suprimentos sanguínea (PIRABÁN; GUERRERO; LABADIE, 2019). Neste sentido, Osório, Brailsford e Smith (2015) afirmam que a partir de 1960, pesquisadores começaram a desenvolver novas metodologias para estudar as políticas de estoque de hemoderivados. As duas políticas mais usadas na cadeia de suprimentos de sangue são a política *first-in-first-out* (FIFO) (por exemplo, em Blake et al. (2013), Abdulwahab e Wahab (2014), Gunpinar e Centeno (2015), Dehghani e Abbasi (2018), Nagurney, Masoumi e Yu (2017), Rajendran e Ravindran (2017), Selvakumar, Shahabudeen e Robert (2019)) e a política *last-in-first-out* (LIFO) (por exemplo, em Abdulwahab e Wahab (2014)). Katsaliaki (2008) afirma que as unidades mais antigas devem ser utilizadas primeiro, mas isso nem sempre é o caso, porque os médicos preferem usar sangue mais fresco. Adicionalmente, Abbasi e Hosseinifard (2014) definiram uma política FIFO modificada e Simonetti et al. (2013) apresentaram dois cenários para selecionar entre as políticas FIFO e LIFO. Em Abbasi e Hosseinifard (2014), o inventário é dividido em duas partes em função do tempo da vida útil das unidades, em que as unidades mais recentes seguem a política FIFO e, após esgotadas essas unidades, as demais unidades são utilizadas segundo a política LIFO. O modelo empregado por Simonetti et al. (2013) é capaz de selecionar os produtos sanguíneos de acordo com as políticas FIFO e LIFO. A seguir, estudos utilizando PO no processo de estoque em cadeias de suprimentos de sangue.

Jennings (1973) analisa o efeito de várias políticas de estoque utilizando um modelo realista de simulação para avaliar os efeitos de tais políticas de estoque em um hospital. Neste mesmo sentido, o estudo de Vrat e Khan (1976) propõe um modelo de simulação que avalia os efeitos de diferentes níveis de estoque na escassez e no desperdício, semelhantemente a Simonetti et al. (2013), causado, entretanto, pelo vencimento do sangue em um hospital. O modelo de Vrat e Khan (1976) considera a previsão de demanda, mas não avalia a possibilidade de substituição

de um grupo sanguíneo por outro compatível.

Sapountzis (1984) formulou um problema de programação inteira para alocar unidades de sangue do serviço regional de transfusão de sangue para os hospitais da região considerando a característica de cada hospital e suas demandas. O objetivo desse trabalho é minimizar o número total de unidades de sangue vencidas no estoque.

Ainda no processo de estocagem, tem-se o trabalho de Kopach, Balcioğlu e Carter (2008) que utiliza um modelo de filas e simulação para determinar uma política ótima para apoiar a modelagem de *trade-offs* entre os seguintes critérios: múltiplos níveis de demanda (emergência e discricionário), níveis de serviço, custos, bem como os objetivos tradicionais de minimizar a escassez e a expiração (combinando oferta e demanda). Os autores argumentam que o modelo demonstrou ser eficaz ao utilizar dados reais obtidos do Canadian Blood Services.

Dillon, Oliveira e Abbasi (2017) utilizam um modelo de programação estocástica de dois estágios com o objetivo de minimizar os custos operacionais, escassez e desperdício para definir políticas de revisão periódica ideais para o gerenciamento do estoque de concentrado de hemácia.

Rajendran e Ravindran (2019) otimizaram o nível de estoque de plaquetas em hospitais e unidades de saúde da Índia, minimizando o desperdício e a escassez, através de um modelo de programação inteira estocástica sob incerteza de demanda.

Ferreira, Carmo e Oliveira (2019) utilizam linguagem de programação e banco de dados ao implementar um sistema em um ambiente de desenvolvimento de software de código aberto, com o objetivo de maximizar o atendimento da demanda, minimizar o descarte em função dos prazos de validade dos produtos e direcionar as campanhas de coleta para realizar o gerenciamento dos níveis de estoque nos bancos de sangue.

Através de um modelo de programação linear inteira mista estocástica, a pesquisa de Shih e Rajendran (2020) examina o impacto de variações de demanda e oferta e dos parâmetros de custo sobre o custo total médio tanto para o hemocentro quanto para os hospitais em termos de estoque. Os resultados indicam que, com o aumento das variações de demanda e oferta, os custos da cadeia de suprimento aumentam e que a variação nos custos de manutenção e expiração do estoque tem um efeito insignificante no custo total. Shih, Kasaie e Rajendran (2023) atualizam o estudo, apresentando um modelo matemático de múltiplos critérios para gerenciamento de estoque de plaquetas ao longo de toda a cadeia.

Elsayed, Taha e Hassan (2022) apresentam um modelo de gestão de estoques que utiliza a simulação de Monte Carlo. O modelo considera as fontes de abastecimento de sangue, as diversas causas de descarte das unidades de sangue e os tipos de demanda no final da cadeia sanguínea. O objetivo principal é melhorar o desempenho da cadeia, minimizando o custo total e aumentando a disponibilidade de bolsas de sangue.

Magalhães et al. (2024) utilizam modelos de simulação a eventos discretos e de otimização via simulação para representar o estoque de um hospital objetivando prever os níveis mínimos de

estoque necessários a partir de níveis aceitáveis de perdas e ruptura de estoque.

No estudo de [Abdolazimi et al. \(2023\)](#), uma cadeia de suprimentos de sangue em múltiplos níveis foi modelada matematicamente considerando condições incertas e interrupções durante a pandemia de COVID-19. O modelo proposto abordou a seleção de locais de instalação mais adequados e a minimização da escassez e do desperdício na cadeia. Os resultados demonstraram que a inclusão de instalações móveis de coleta de sangue pode reduzir o tempo de transporte do sangue entre os níveis da rede.

Após o processo de produção, é necessário realizar a distribuição dos produtos sanguíneos para os hospitais e hemocentros, a depender da configuração da rede em cada país.

[Or e Pierskalla \(1979\)](#) estudam os aspectos da regionalização dos sistemas de bancos de sangue baseando-se nas necessidades de sangue esperadas de um conjunto de hospitais. No estudo, foi determinado que cada hospital deve ser atribuído a um banco de sangue regional que fornecerá periodicamente a necessidade de sangue esperada do hospital para o período, bem como suprir sua demanda de sangue no momento da emergência. [Pierskalla \(2005\)](#) acrescenta ao estudo anterior uma visão mais integrada da cadeia de suprimentos sanguínea, descrevendo modelos sob o viés dos níveis de planejamento para determinar a quantidade e as localizações de hemocentros, bem como as áreas de doadores. Os modelos desenvolvidos também retratam questões dos níveis tático e operacional, abordando estoque, gerenciamento de produtos sanguíneos, a distribuição e alocação do sangue para os hospitais, roteamento de veículos de entrega, dentre outros.

[Kendall e Lee \(1980\)](#) avaliam a redistribuição sistemática de unidades de sangue dentro de uma determinada região utilizando programação por metas. Esta redistribuição geralmente ocorre a partir de hospitais que possuem uma menor probabilidade de transfusão para hospitais com maior probabilidade de transfusão. [Dharmaraja, Narang e Jain \(2019\)](#) realizam um trabalho similar ao de [Kendall e Lee \(1980\)](#). No estudo dos autores foi avaliada a possibilidade de transferência de sangue de um banco de sangue com excesso para um banco em escassez utilizando um modelo matemático baseado em três etapas: (i) a primeira etapa prevê a demanda de unidades de sangue em cada banco; (ii) já a segunda etapa consiste em determinar a quantidade ideal de unidades de sangue que precisam ser supridas de um banco de sangue com excesso para um com escassez, de forma que o custo total seja mínimo; (iii) a terceira etapa consiste em determinar a rota ideal para a entrega dessas unidades de sangue.

[Gregor, Forthofer e Kapadia \(1982\)](#) desenvolveram um modelo de simulação para avaliar os custos e efeitos de diferentes políticas operacionais em um sistema regional de distribuição de sangue. Experimentos foram realizados alterando a quantidade de sangue disponível, a quantidade de veículos para entrega e o tipo de política de estoque e transporte adotados.

[Jafarkhan e Yaghoubi \(2018\)](#) utilizam otimização robusta e consideram a demanda e oferta incertas além da possibilidade de flexibilidade de transbordo, ou seja, compartilhamento de estoque entre hospitais, e a substituição de um tipo sanguíneo por outro compatível em seu

estudo sobre a distribuição dos concentrados de hemácias para hospitais.

Glasgow et al. (2018) estudam o gerenciamento do concentrado de hemácias, avaliando os níveis de suprimento de sangue nos hospitais durante um evento de acidente em massa utilizando a simulação a eventos discretos.

Dehghani e Abbasi (2018) realizam um estudo da cadeia de suprimento sanguínea considerando a política de transbordo proativo com o objetivo de minimizar o custo total, os desperdícios e as rupturas nos estoques. Essa política consiste em decidir no instante em que os hospitais realizam as solicitações se haverá a reposição através do transbordo das bolsas entre os hospitais da rede ou através do envio das bolsas de um banco de sangue. A programação estocástica em dois estágios foi utilizada para calcular o tamanho do pedido ideal e a quantidade de bolsas de sangue para transbordo para cada hospital. Como conclusão, os autores observaram uma significativa redução de custos, desperdícios e escassezes com o uso dessa política.

Os próximos artigos envolvem mais de um processo da cadeia de suprimentos de sangue.

Rytilä e Spens (2006) desenvolvem um modelo de simulação de eventos discretos para estudar estoques e políticas de distribuição, incluindo diferentes aspectos da cadeia de suprimentos, como compatibilidades, integração entre hospitais e hemocentros e o período de liberação de *crossmatch*. Embora Rytilä e Spens (2006) mencionem a otimização das políticas de estoque, eles não fornecem muitas informações sobre qual metodologia utilizaram.

Katsaliaki e Brailsford (2007) estudam a integração de toda a cadeia de suprimento do Reino Unido através da modelagem dos processos de coleta, produção, estoque e distribuição a partir da simulação a eventos discretos. O modelo foi utilizado para determinar políticas de pedido com o objetivo de reduzir a escassez, taxas de desperdícios e custos a fim de melhorar os níveis de serviços.

Lowalekar e Ravichandran (2011) e Simonetti et al. (2013) apresentam estudos baseados na simulação de Monte Carlo. No primeiro artigo, os autores modelam os processos de coleta e produção. Na coleta, são estudadas diferentes estratégias, incluindo quantidades fixas e variáveis de coleta, contudo, o método de aférese não é considerado, pois este método não é comum na Índia. Nas etapas do processo de produção, os autores avaliam diferentes taxas de fracionamento e desenvolvem curvas de perfil para auxiliar o decisor na definição de políticas. O segundo artigo combina simulação a eventos discretos e Monte Carlo para estudar diferentes políticas de distribuição, avaliando indicadores de disponibilidade e escassez.

Delen et al. (2011) aplicam diversas metodologias como mineração de dados e otimização para melhorar o gerenciamento da cadeia de suprimento de sangue nas forças armadas. Esta aplicação é interessante uma vez que a demanda de sangue e a cadeia de suprimento de sangue nas forças armadas apresentam diversas diferenças em relação a uma cadeia de suprimento de sangue típica, como emergências decorrentes de combate, limitações de recursos e restrições geográficas (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015).

Nagurney, Masoumi e Yu (2012) desenvolvem um modelo que utiliza a programação matemática para otimizar toda a cadeia de suprimento de sangue. O modelo considera a cadeia como um problema de rede, definindo diferentes nós, arcos e fluxos para representar as entidades e relacionamentos da cadeia e inclui algoritmos para gerar fluxos ótimos em toda a cadeia de suprimentos, bem como resultados ótimos de instâncias básicas. Uma extensão deste trabalho é apresentada em Nagurney e Masoumi (2012) e inclui o custo de descarte ao longo da cadeia de suprimentos e a capacidade dos arcos como variáveis de decisão. No entanto, ambos os artigos não consideram características como o período de *crossmatching*, compatibilidades e múltiplos produtos (OSÓRIO; BRAILSFORD; SMITH, 2015).

Jabbarzadeh, Fahimnia e Seuring (2014) apresentam um estudo no qual é projetada uma cadeia de suprimento de sangue durante e após um desastre natural em que aplicam um modelo de otimização robusta. Foi definido no estudo a quantidade de instalações - permanentes e temporárias, alocação de doadores à estas instalações, quantidade de sangue a serem coletadas e quantidade de estoque. Nesta mesma perspectiva, Fahimnia et al. (2017) apresentam um modelo estocástico biobjetivo que visa minimizar os custos totais e o tempo total de entrega para o suprimento emergencial de sangue em casos de desastres naturais.

Já Baesler et al. (2014) apresentam um modelo de simulação a eventos discretos integrado com o objetivo de desenvolver políticas de estoque considerando campanhas de coleta emergencial. Os pontos de reposição são estimados para minimizar os desperdícios e taxas de expiração de validade, com uma regra de decisão para iniciar uma campanha de coleta extra. O modelo considera vários processos da cadeia de suprimento de sangue, mas é focado principalmente no processo de coleta.

Arvan, Tavakkoli-Moghaddam e Abdollahi (2015) formulam um modelo de otimização biobjetivo para um problema de localização e alocação em uma rede de suprimento de sangue analisando unidades de coleta, laboratórios de testes e de processamento, bancos de sangue e pontos de demanda. O principal objetivo do estudo é determinar os locais das unidades de coletas e dos bancos centrais de sangue para determinar a quantidade de produtos sanguíneos que será enviado entre as instalações.

Ensafian e Yaghoubi (2017) analisam os processos de coleta, produção e distribuição utilizando uma abordagem de otimização robusta para lidar com a incerteza da demanda. Neste estudo, tanto o método de coleta por aférese quanto o método de coleta tradicional são considerados além de um problema integrado da cadeia de suprimento de plaquetas. As políticas de estoque FIFO e LIFO são utilizadas com o objetivo de minimizar o custo total para que seja maximizada a quantidade de plaquetas com menor tempo de vida útil.

Osório et al. (2017) utilizam um modelo que integra a simulação a eventos discretos com a programação linear inteira para analisar o planejamento da produção na cadeia de suprimento de sangue. O modelo de programação linear calcula a quantidade ideal de doadores por dia, por tipo sanguíneo e método de coleta, enquanto a simulação a eventos discretos incorpora a

incerteza na oferta e demanda, com bases nas distribuições de probabilidade, representando os fluxos através da cadeia de abastecimento, incorporando coleta, produção, armazenamento e distribuição. O modelo possui o objetivo de auxiliar nas decisões estratégicas e operacionais de um hemocentro na Colômbia, reduzindo os índices de escassez, desperdícios e custos.

Samani e Hosseini-Motlagh (2018) investigam o problema da cadeia de suprimento de sangue utilizando uma abordagem híbrida baseada em programação estocástica em dois estágios e programação possibilística. O objetivo do modelo é minimizar o custo total, as demandas máximas não atendidas e o tempo entre a disponibilidade dos derivados de sangue nos hemocentros regionais até o período de uso nos pontos de demanda.

Outro estudo que aborda o problema integrado foi desenvolvido por Hendalianpour (2018) e aplicado em uma base de dados reais em um hospital iraniano no qual se considera apenas as plaquetas. O autor utiliza um modelo de otimização robusta para avaliar cadeias de suprimento de produtos, incluindo os processos de produção, estoque e roteamento de veículos, considerando a possibilidade de transferência de produtos entre hospitais como meio de lidar com a incerteza na demanda.

Kaya e Ozkok (2018) e Kaya e Ozkok (2020) utilizam programação não linear inteira mista e a heurística Simulated Annealing para analisar a cadeia de suprimento de sangue considerando os três níveis de planejamento: operacional, tático e estratégico. No nível estratégico foram definidos o número e a localização ideal dos centros de distribuição, já no nível tático são definidos os níveis de estoque de cada centro de distribuição e no nível operacional é definido, diariamente e semanalmente, as rotas de transporte.

Hamdan e Diabat (2019) propõem um modelo matemático estocástico de dois estágios que considera decisões de localização, distribuição, dimensionamento do estoque e da quantidade de coletas a serem realizadas. O objetivo dos autores era minimizar os custos totais da cadeia de suprimento do concentrado de hemácia considerando os tempos de entrega das bolsas de sangue e o desperdício das bolsas de sangue em estoque.

Arani et al. (2021) avaliam uma cadeia integrada de sangue a partir do conceito de ressurgimento lateral, considerando quatro níveis: doadores, centros de coleta de sangue, hemocentros e hospitais. Este conceito consiste em um sistema de estoque integrado que compartilha os níveis de estoque entre os hospitais, viabilizando um hospital atender sua demanda a partir do estoque de outro hospital. O modelo multiobjetivo de programação linear inteira mista foi utilizado com o objetivo de minimizar os custos ambientais, sociais e logísticos. O problema foi tratado utilizando programação por metas, possibilitando uma melhora nos indicadores de desempenho da rede sanguínea.

Shirazi, Kia e Ghasemi (2021) propõem um modelo de simulação e otimização bi-objetivo para a cadeia de suprimentos de plasma considerando a pandemia de COVID-19. O objetivo é minimizar o tempo de fluxo de plasma e os custos da cadeia sanguínea. Resultados indicam

que à medida que a demanda de plasma aumenta, os custos totais do sistema e o tempo de fluxo também aumentam.

Ribeiro (2022) utiliza a simulação a eventos discretos para avaliar a rede de suprimento do estado de Santa Catarina. O aumento de demanda e centralização da produção foram avaliados como cenários alternativos para analisar e identificar oportunidades de melhorias do sistema.

Mansur et al. (2023) propõem um modelo de programação linear inteira mista que considera múltiplos níveis, tipos sanguíneos, emissões de carbono no transporte e produção e a vida útil das bolsas de sangue para maximizar o desempenho da cadeia de suprimentos sanguínea.

Eghbali, Mousavi e Salimian (2023) apresentam um modelo matemático multiobjetivo utilizado para projetar uma cadeia de suprimentos de sangue em situações de desastres, incorporando instalações temporárias e fixas, investigando potenciais interrupções tanto nas instalações de sangue quanto nas ligações entre elas, buscando minimizar os tempos de transporte. Foi utilizado teoria de filas para minimizar o tempo das bolsas no sistema, lidar com as incertezas causadas pelos fluxos de chegada e melhorar o desempenho operacional.

Suen, Song e Jones (2023) propõem um modelo de programação estocástica em dois estágios e um modelo de programação por metas para investigar se a incorporação de plaquetas congeladas na cadeia de suprimento de plaquetas melhora o seu desempenho em termos de escassez, desperdício e penalidades de substituição em transfusões.

Ala et al. (2024) abordam a importância da cadeia de abastecimento de sangue dentro de um sistema de saúde, destacando seu potencial para melhorar a eficiência e reduzir os custos. Para otimizar essa cadeia, é apresentado um problema de projeto de rede multiobjetivo, visando reduzir os custos de estabelecimento de instalações fixas e temporárias, a transferência de hemoderivados e a escassez de sangue. Para lidar com as decisões de distribuição e localização, é proposto um novo método de programação linear inteira mista possibilística. Como resultado, foi sugerido o transporte lateral entre hospitais em determinadas regiões ou períodos.

Rekabi et al. (2024) apresentam um modelo multiobjetivo inteiro misto não linear, além de teoria de filas para determinar a configuração da rede sanguínea, reduzindo custos e o tempo de espera no sistema. Além disso, foi proposta uma regressão linear para prever a demanda por sangue, a fim de reduzir a possibilidade de escassez por meio da gestão de estoque e campanhas de doação.

Entezari et al. (2024) abordam a logística humanitária do sangue, considerando os tipos sanguíneos, reconhecendo a importância da cadeia de suprimentos para gerenciar a oferta e a demanda de componentes sanguíneos, especialmente durante crises. Um modelo bi-objetivo é formulado para minimizar custos e escassez de sangue, simultaneamente, considerando a localização de instalações sanguíneas, alocação de doadores, instalações de centros de coleta, produção e teste de hemocomponentes sob a incerteza da demanda e decisões de roteamento dependentes do tempo. Uma programação estocástica de dois estágios baseada em cenários foi

adotada para lidar com as variáveis dependentes do tempo, como o transbordo de sangue entre instalações no menor tempo de viagem.

2.3 Rede de Filas

As filas estão presentes no cotidiano em supermercados, bancos, no trânsito e em quaisquer situações em que um recurso precisa esperar por um serviço ou atendimento. Como não podem ser evitadas, os processos geradores de filas podem ser estudados e dimensionados de forma a amenizar os prejuízos em tempo, produtividade, assim como as perdas financeiras. Nesse sentido, proposta inicialmente por A. K. Erlang em 1917, a Teoria de Filas auxilia no projeto e na operação dos sistemas através do balanceamento adequado entre os custos de oferecer serviços no sistema e os custos dos atrasos sofridos pelo usuário do sistema (ERLANG, 1917; BITRAN; MORABITO, 1994; GOVIL; FU, 1999; ARENALES et al., 2007).

Um sistema com fila é composto por usuários, postos de serviço ou de atendimento e, geralmente, por um espaço estabelecido para espera. Os elementos necessários para a caracterização desse sistema são: processo de chegada, processo de serviço, postos de serviço/atendimento, capacidade do sistema e disciplina de atendimento.

A notação de Kendall-Lee é utilizada para representar as filas, facilitando a sua caracterização e compreensão (KENDALL, 1953). Ela é composta por seis características: $A/B/m/C/K/N$, em que: A refere-se à distribuição do processo de chegada, B refere-se à distribuição do processo de serviço, m indica o número de servidores, C especifica a disciplina de fila, K indica o máximo de usuários no sistema e N mostra o tamanho da população.

Os modelos de filas Markovianos são considerados modelos clássicos existentes na literatura e assumem uma distribuição Markoviana dos intervalos de chegada através da distribuição exponencial (HILLIER; LIEBERMAN, 1995). Isso quer dizer que, os processos de chegada, por exemplo, são aleatórios e que essa aleatoriedade se dá tanto na forma como chegam usuários no sistema quanto no tempo necessários para atendê-los, ou seja, para a chegada, o instante atual ou o tempo decorrido desde a última chegada não influencia a chegada de um novo usuário. Mais ainda, nos modelos clássicos como os processos de nascimento e morte, as transições entre os estados acontecem apenas entre estados adjacentes (KLEINROCK, 1975). Sendo assim, em um intervalo de tempo Δt ($\Delta t \rightarrow 0$), o sistema pode entrar no estado n , Figura 2, por meio dos seguintes eventos: a chegada de um usuário (taxa λ associada ao processo de nascimento), a saída de um usuário (taxa μ associada ao processo de atendimento ou morte) ou a permanência no estado atual.

Os modelos de filas não Markovianos ou com distribuições genéricas são filas em que os processos de chegada e/ou de serviços dos usuários não podem ser descritos por distribuições exponenciais (processos de Poisson) e, em geral, são mais complexas de analisar ou são tratados por meio de aproximações (por exemplo, filas $G/G/m$) (ARENALES et al., 2007).

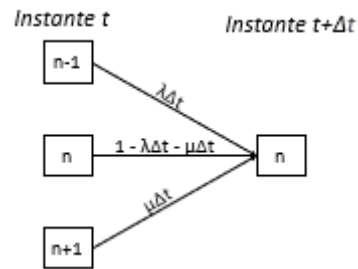


Figura 2 – Possíveis transições para o estado n no intervalo de tempo Δt

Fonte: adaptado de Beojone (2017)

Disney e König (1985) definem rede de filas como uma coleção de sistemas de atendimento com um tempo de atendimento, capacidade de espera e disciplina associado em que cada um desses sistemas são chamados de nó. Tais nós são conectados por arcos sobre os quais os clientes fluem para receberem o atendimento (BELL, 1982). Disney e König (1985) definem ainda que para cada nó tenha processos de chegadas externas e internas submetidas a um conjunto de regras, chamado de processo de comutação, que serve para encaminhar os clientes através dos nós da entrada, para os demais nós da rede (DISNEY; KÖNIG, 1985). Em outras palavras, uma rede de filas são combinações de filas arranjadas em série e/ou em paralelo, gerando sistemas com fila única ou múltiplas filas e múltiplos servidores em série ou paralelo interligadas entre si com clientes deslocando-se entre os pontos de para receber o atendimento. Algumas características importantes:

- i) A rede pode ser aberta, fechada ou mista: dependendo de limitações a respeito de poder enviar e receber clientes de fora da rede, ou seja, em uma rede fechada a quantidade total de clientes não se altera, ocorrendo apenas permutações em suas posições, já nas redes abertas, a quantidade total varia pela chegada ou saída externa de clientes e, por fim, nas redes mistas, ambos os casos podem ocorrer (BITRAN; MORABITO, 1994).
- ii) Atendimento: o atendimento pode ser realizado nos nós ou nos arcos.
- iii) Rota: é o percurso, sequência dos serviços realizados, por cada cliente.

Ferreira Filho (2005) acresce ainda que deve-se considerar em estudos de redes de filas a estrutura topológica da rede, por descrever as transições possíveis entre os nós e a natureza do fluxo, em termos do processo estocástico básico que descreve este fluxo, podendo possuir distribuições exponenciais ou genéricas. Neste sentido, as redes de filas são, em geral, classificadas na literatura como:

- i) Redes de Jackson: aquelas cujos processos de chegadas externas são descritos por Poisson e os tempos de serviço em cada estação têm distribuição exponencial (BITRAN; MORABITO, 1994). As redes de Jackson, ou rede de filas Markovianas, podem ser abertas, fechadas ou mistas (ver mais em Jackson (1957)). Contudo, essas redes seguem as seguintes premissas: tempos de serviço exponencialmente distribuídos, requerimentos de serviço homogêneos para todos os postos de atendimento, disciplina da fila independente da classe de clientes, chegadas seguindo

a distribuição de Poisson, garantindo também métodos exatos de avaliação de desempenho (BITRAN; TIRUPATI, 1988).

ii) Redes Baskett, Chandy, Muntz e Palacios (BCMP): A rede de filas Baskett, Chandy, Muntz e Palacios (BCMP) (daqui em diante BCMP) é uma extensão dos modelos de Jackson que foram introduzidos por Baskett et al. (1975), considera redes abertas, fechadas e mistas, além de múltiplas classes de clientes, roteamento probabilístico, chegadas de Poisson e quatro tipos de centros de serviços.

iii) Redes genéricas: aquelas cujos processos de chegadas externas não são necessariamente Poisson e/ou os de serviço não necessariamente são exponenciais, ou seja, são descritos por distribuições genéricas (BITRAN; MORABITO, 1994).

2.3.1 Métodos Aproximados de Decomposição em Redes de Filas Genéricas

Conforme descrito anteriormente, os modelos de filas não Markovianos, ou com distribuições genéricas, são filas em que os processos de chegada e/ou de serviços não podem ser descritos por distribuições exponenciais (processos de Poisson) e, em geral, são mais complexas de analisar ou são tratados por meio de aproximações (por exemplo, filas G/G/m) (ARENALES et al., 2007). Outro conceito que se faz importante aqui é o de rede de filas abertas, em que a quantidade total de clientes varia pela chegada ou saída externa de clientes - ou seja, os clientes entram na rede, recebem serviço em um ou mais arcos da rede, e saem da rede (BITRAN; MORABITO, 1994; MORABITO; SOUZA, 2010). Portanto, uma rede de filas aberta genérica consiste em filas não Markovianas, com distribuições dos processos de chegadas e/ou de serviços genéricas, em que a quantidade total de clientes varia pela chegada ou saída externa destes.

Os métodos de avaliação de desempenho de redes abertas podem ser classificados em exatos, aproximados e de simulação e técnicas relacionadas (BITRAN; TIRUPATI, 1988; GOVIL; FU, 1999; MORABITO; SOUZA; VAZQUEZ, 2014). Contudo, métodos exatos de avaliação de desempenho de rede de filas abertas existem para as redes de Jackson, em que os processos de chegada e serviço são admitidos como processos de Poisson (MORABITO; SOUZA, 2010). Entretanto, em redes de filas abertas genéricas, as quais as hipóteses de processos de Poisson não se aplicam, os métodos exatos de avaliação de desempenho não estão disponíveis, ou quando estão disponíveis são muito difíceis de serem computados (MORABITO; SOUZA, 2010).

Neste contexto, métodos aproximados de decomposição são encontrados na literatura para avaliação de rede de filas genéricas. Whitt (1983b) descreve um *software* desenvolvido nos Laboratórios Bell, o Queuing Network Analyzer (QNA), utilizado para calcular medidas aproximadas de desempenho para redes de filas genéricas abertas de nós multi servidores com a disciplina de ordem de chegada e sem restrições de capacidade. Smith e Bouanaka (1985) utilizam as filas M/G/C, M/D/C e GI/G/C para mostrar que redes de filas operacionais, fechadas e mistas são meios viáveis de analisar a configuração e composição de recursos em problemas de layout de instalações, explorando o escopo e as limitações das técnicas de decomposição além de

comparar tal abordagem analítica com uma análise de simulação de uma instalação de exemplo. Bitran e Tirupati (1988) examinam o método de decomposição para redes de filas abertas com múltiplas classes, rotas determinísticas e distribuições gerais de chegadas e serviços. Bitran e Morabito (1996) revisam métodos para analisar modelos de redes de filas abertas para sistemas de manufatura discreta, dividindo-os em duas partes: a primeira parte concentra-se em métodos de decomposição exatos e aproximados para modelos de avaliação de desempenho para redes de classe única e múltipla de produtos e a segunda procura otimizar medida de desempenho sujeita à restrições de recursos. Enns (1998) utiliza modelos de decomposição de filas para estudar o comportamento do fluxo de trabalho sob diversas suposições de roteamento de lojas. Já Kerbachea e Smith (2000) desenvolvem a técnica de decomposição analítica aproximada para modelagem de redes de filas abertas como Método de Expansão Generalizada (GEM). Guimarães (2005) utiliza um método aproximado de decomposição de rede de filas para estimar o tempo médio de viagem em trechos ferroviários com pátios de cruzamento e avaliar a capacidade física da malha ferroviária e a necessidade de instalação de novos pátios. Morabito e Souza (2010) e Morabito, Souza e Vazquez (2014) propuseram uma metodologia combinando métodos de cancelamento de ciclos e métodos aproximados de decomposição em um algoritmo para resolver problemas de multi-fluxo em rede de filas abertas genéricas. Para calcular o tempo de fila e a variabilidade do sistema dividido em seções que possuem e que não possuem gargalo enquanto captura a dependência entre estações de trabalho, inspirados na estrutura subjacente das filas tandem, Wu e McGinnis (2012) derivaram um modelo aproximado de decomposição para caracterizar o desempenho do sistema. Smith e Kerbache (2017) examinaram o layout, a localização e o arranjo topológico das filas em um ambiente de rede de filas fechadas e finitas para cadeias de suprimentos. Kuehn (1979), Albin (1982), Kerbachea e Smith (1987) e Segal e Whitt (1984) também aplicam o método de decomposição em redes de filas genéricas abertas.

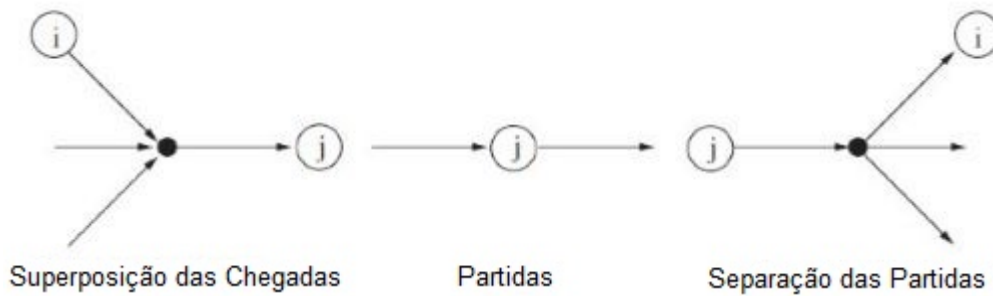
Morabito e Souza (2010) e Morabito, Souza e Vazquez (2014) apresentam três diferentes métodos de decomposição aproximada para rede de filas abertas genéricas (Aproximações 1, 2 e 3). O procedimento de decomposição desses métodos é desenvolvido em três etapas: (i) análise da interação entre as estações da rede, (ii) avaliação das medidas de desempenho em cada estação e (iii) avaliação das medidas de desempenho para toda a rede (MORABITO; SOUZA; VAZQUEZ, 2014). A Tabela 2 resume a notação utilizada nos métodos de decomposição.

Nesses métodos, analisar interações entre estações na rede é fundamental para computar medidas de desempenho e envolve três processos básicos: superposição das chegadas, partidas e separação das partidas, conforme Figura 3. Nesses processos, cada estação j é descrita por x_j e ca_j , além dos parâmetros de u_j e cs_j .

Na aproximação descrita pelas Equações 2.1, 2.4 e 2.5, as equações de variabilidade de tráfego formam um sistema linear que descreve a relação entre ca_j , na estação j , com ca_{ij} e cd_j (MORABITO; SOUZA, 2010). Morabito e Souza (2010) ressalta que esta primeira equação de variabilidade de tráfego deriva do processo de superposição das chegadas de fluxos em cada

Tabela 2 – Descrição da Notação

Notação	Descrição
i, j	Estação
k	Classe
p	Caminho
P_k	Número de subclasses da classe k
x_j	Taxa de chegada agregada na estação j
x_{kp}	Taxa de chegada da classe k no caminho p
s_j	Tempo de serviço da estação j
u_j	Taxa de serviço da estação j
r_k	Demanda da classe k
ρ_j	Utilização média da estação j , $\rho_j = x_j/u_j$
ε_{kp}^{ij}	ε_{kp}^{ij} será igual a 1 se as estações i e j correspondem a dois arcos subsequentes no caminho p da classe k , e igual a 0, caso contrário
$\phi_{kp(j)}$	Predecessor do arco j no caminho p da classe k
ca_j	Variabilidade dos intervalos de tempo entre chegadas na estação j
ca_{ij}	Variabilidade dos intervalos de tempo entre chegadas à estação j a partir da estação i
ca_k	Variabilidade dos tempos externos entre chegadas da classe k
ca_{kp}	Variabilidade dos tempos externos entre chegadas da subclasse kp
ca_{kpj}	Variabilidade dos intervalos de tempo entre chegadas à estação j da classe k para o caminho p
cd_j	Variabilidade dos intervalos de tempo entre partidas na estação j
cs_j	Variabilidade dos tempos de serviço na estação j
V_j	Número de visitas de um <i>job</i> arbitrário na estação j
Wq_j	Tempo de espera na fila da estação j
L_j	Número médio de <i>jobs</i> na estação j
T	<i>Leadtime</i> médio de <i>jobs</i>

Figura 3 – Processos básicos na computação das medidas de desempenho da estação j

Fonte: adaptado de Morabito, Souza e Vazquez (2014)

estação j , vindos de outras estações, conforme Figura 3. A relação obtida por Whitt (1983b) é descrita abaixo.

$$ca_j = w_j \sum_{i=0}^m \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ij} x_{kp}}{x_j} ca_{ij} + 1 - w_j \quad (2.1)$$

Em que w_j e ν_j são apresentados pelas Equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$w_j = \frac{1}{1 + 4(1 - \rho_j)^2(\nu_j - 1)} \quad (2.2)$$

$$\nu_j = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ij} x_{kp}} \quad (2.3)$$

A variabilidade dos intervalos de tempo entre partidas da estação j , cd_j , depende do tempo médio de espera em fila na estação. Whitt (1983a) derivou uma aproximação para cd_j como uma combinação convexa de ca_j e cs_j , assim, a segunda equação de variabilidade de tráfego é dada por 2.4.

$$cd_j = \rho_j^2 cs_j + (1 - \rho_j^2) ca_j \quad (2.4)$$

O sistema de equações de variabilidade de tráfego é completado com a análise do processo de separação das partidas da estação j para as outras estações. Sendo assim, a Equação 2.5 define a relação entre ca_{ji} e cd_j .

$$ca_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ji} x_{kp}}{x_j} cd_j + 1 - \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ji} x_{kp}}{x_j} \quad (2.5)$$

A variabilidade dos tempos entre chegadas externas na estação j , ca_{0j} , que é um parâmetro de entrada do sistema linear das Equações 2.1, 2.4 e 2.5 em ca_j pode ser calculada pela Equação 2.6, de acordo com (MORABITO; SOUZA; VAZQUEZ, 2014).

$$ca_{0j} = w_j \sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \frac{\xi_{kp}^{0j} x_{kp}}{\sum_{q=1}^K \sum_{l \in P_q} \varepsilon_{ql}^{0j} x_{ql}} ca_{kp} + 1 - w_j \quad (2.6)$$

Nota-se que ca_{kp} não é um dado de entrada, pois depende das decisões de quais caminhos rotear os fluxos da mercadoria k na rede. No estudo de Morabito, Souza e Vazquez (2014) foram exploradas duas alternativas para estimar ca_{kp} em função dos dados de entrada ca_k (ou seja, a variabilidade dos tempos externos entre chegadas da classe k na rede). Essas alternativas são apresentadas pelas Equações 2.7 e 2.8.

$$ca_{kp} = ca_k, \quad \forall p \in P_k \quad (2.7)$$

$$ca_{kp} = \frac{x_{kp}}{r_k} ca_k + 1 - \frac{x_{kp}}{r_k} \quad (2.8)$$

Outra aproximação utiliza as Equações 2.9, 2.4 e 2.10, em que as Equações 2.1 e 2.5 são substituídas pelas Equações 2.9 e 2.10, respectivamente, baseadas em Bitran e Tirupati (1988).

$$ca_j = w_j \sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \frac{\varepsilon_{kp}^j x_{kp}}{x_j} ca_{kpj} + 1 - w_j \quad (2.9)$$

$$ca_{kpj} = \frac{\varepsilon_{kp}^{\phi kp(j)} x_{kp}}{x_{\phi kp(j)}} cd_{\phi kp(j)} + \left(1 - \frac{\varepsilon_{kp}^{\phi kp(j)} x_{kp}}{x_{\phi kp(j)}}\right) \frac{\varepsilon_{kp}^{\phi kp(j)} x_{kp}}{x_{\phi kp(j)}} + \left(1 - \frac{\varepsilon_{kp}^{\phi kp(j)} x_{kp}}{x_{\phi kp(j)}}\right)^2 ca_{kp\phi kp(j)} \quad (2.10)$$

Por fim, a última aproximação, substitui a Equação 2.5 pela Equação 2.11, baseada em Segal e Whitt (1984) e também utilizadas por Morabito e Souza (2010) e Morabito, Souza e Vazquez (2014).

$$ca_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ji} x_{kp}}{x_j} cd_j + \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ji} x_{kp}}{x_j}\right)^2 ce_j + \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ji} x_{kp}}{x_j}\right) \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ji} x_{kp}}{x_j} ca_j \quad (2.11)$$

Em que ce_j é apresentado pela Equação 2.12.

$$ce_j = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^{ji} x_{kp} ca_{kp}}{\sum_{k=1}^K \sum_{p \in P_k} \varepsilon_{kp}^j x_{kp}} \quad (2.12)$$

A superposição dos processos de chegadas, partidas e divisão de partidas, descritas na Figura 3, permite decompor a rede de filas em uma coleção de estações individuais, cada uma descrita por x_j , ca_j , u_j , cs_j (MORABITO; SOUZA, 2010). As medidas de desempenho podem, portanto, ser avaliadas independentemente para cada estação. Ou seja, dado um fluxo viável para as restrições, pode-se obter uma aproximação do tempo de espera em fila na estação j através da Equação 2.13, e o número médio em cada estação j (incluindo fila e atendimento) através da Equação 2.14, baseadas em Whitt (1983b) e também utilizadas por Morabito (1998).

$$E(Wq_j) = \frac{\rho_j(ca_j + cs_j)g(\rho_j, ca_j, cs_j)}{2u_j(1 - \rho_j)} \quad (2.13)$$

$$E(L_j) = \frac{\rho_j^2(ca_j + cs_j)g(\rho_j, ca_j, cs_j)}{2(1 - \rho_j)} + \frac{x_j}{u_j} \quad (2.14)$$

em que

$$g(\rho_j, ca_j, cs_j) = \begin{cases} \exp\left\{\frac{-2(1-\rho_j)(1-ca_j)^2}{3\rho_j(ca_j+cs_j)}\right\} & \text{se } ca_j < 1 \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.15)$$

A última etapa consiste em avaliar medidas de desempenho para toda a rede. Morabito (1998) cita como exemplo dessas medidas o número médio de *jobs* da rede ($\sum_{j=1}^n E(L_j)$), o *leadtime* médio de *jobs* arbitrários (Equação 2.16) e a taxa de produção da rede.

$$E(T) = \sum_{j=1}^n E(V_j)(E(Wq_j) + E(s_j)) \quad (2.16)$$

Já na última etapa do trabalho de Morabito, Souza e Vazquez (2014), os autores aplicam o algoritmo de cancelamento de ciclo, proposto por Ouorou e Mahey (2000) para minimizar a soma das funções arco-custo da Equação 2.13 com os valores de ca_j fixados pelo método de decomposição aproximada para cada estação j , sujeito às restrições da função objetivo.

Para explicações mais detalhadas do desenvolvimento do sistema de equações para cada aproximação, consultar, Whitt (1983b), Bitran e Morabito (1996), Morabito (1998), Morabito e Souza (2010) e Morabito, Souza e Vazquez (2014).

3 Metodologia

Neste capítulo apresenta-se a descrição da cadeia de suprimentos sanguínea analisada nesta pesquisa, apelidada de HEMOX, e a rede de filas associada a essa cadeia. Ainda neste capítulo apresenta-se o algoritmo proposto para avaliar todas as possíveis combinação de quantidades e localização de estação de produção utilizando um método aproximado de decomposição. O algoritmo desenvolvido pode ser utilizado para analisar outras configurações dessa cadeia, além de outras cadeias de suprimento de sangue com características diferentes. Ressalta-se que esta cadeia é inspirada nas configurações e padrões de uma hemorrede brasileira de referência, o Centro de Hematologia e Hemoterapia de Santa Catarina (HEMOSC).

3.1 Caracterização do Sistema Analisado

A HEMOX é composta por um hemocentro coordenador e seis hemocentros regionais, além de duas unidades de coleta vinculadas aos hemocentros regionais. A Figura 4 representa a rede de suprimentos da HEMOX. O hemocentro coordenador realiza todas as etapas da cadeia de suprimento sanguíneo - coleta, produção, estoque e distribuição. Além disso, o hemocentro coordenador é o único responsável pela realização dos testes de toda a rede sanguínea, uma vez que o laboratório de teste é centralizado. De tal forma que, todos os dias as amostras dos hemocentros regionais chegam em lotes utilizando as rotas de transporte da rede HEMOX. Essas rotas são utilizadas para transportar amostras e bolsas entre os pontos da rede, como pode ser visualizado na Figura 4 (fluxo de hemocomponentes entre unidades). Estas amostras chegam em horários distintos, sendo então processadas de acordo com a ordem de chegada ao laboratório. Além das amostras provenientes da rede da HEMOX, o laboratório de teste também realiza o teste de Ácido Nucléico (NAT) nas amostras provenientes de estados vizinhos. Já os hemocentros regionais realizam as etapas de coleta, produção, estoque e distribuição. As unidades de coleta realizam apenas as coletas de bolsas de sangue e amostras, que são posteriormente enviadas aos hemocentros aos quais estão vinculadas.

Os hemocentros operam a partir de um fluxo que se inicia com a doação do sangue e finaliza com o envio das bolsas de sangue, processadas, para as agências transfusionais, ambulatórios e hospitais conveniados. Sendo assim, o fluxo nos hemocentros é iniciado com a chegada do doador para o processo de coleta. Os candidatos à doadores se submetem ao cadastro e triagem clínica, para que seja verificado o atendimento a todos os requisitos de doação. Caso o candidato não atenda a todos os requisitos, ele será convocado a retornar em outro momento, caso contrário, será destinado para a coleta de sangue. Na Figura 4, as coletas ocorrem nas unidades de coleta e nos hemocentros regionais e coordenador. Durante o processo de coleta, são coletadas as bolsas de sangue e amostras para realização dos testes.

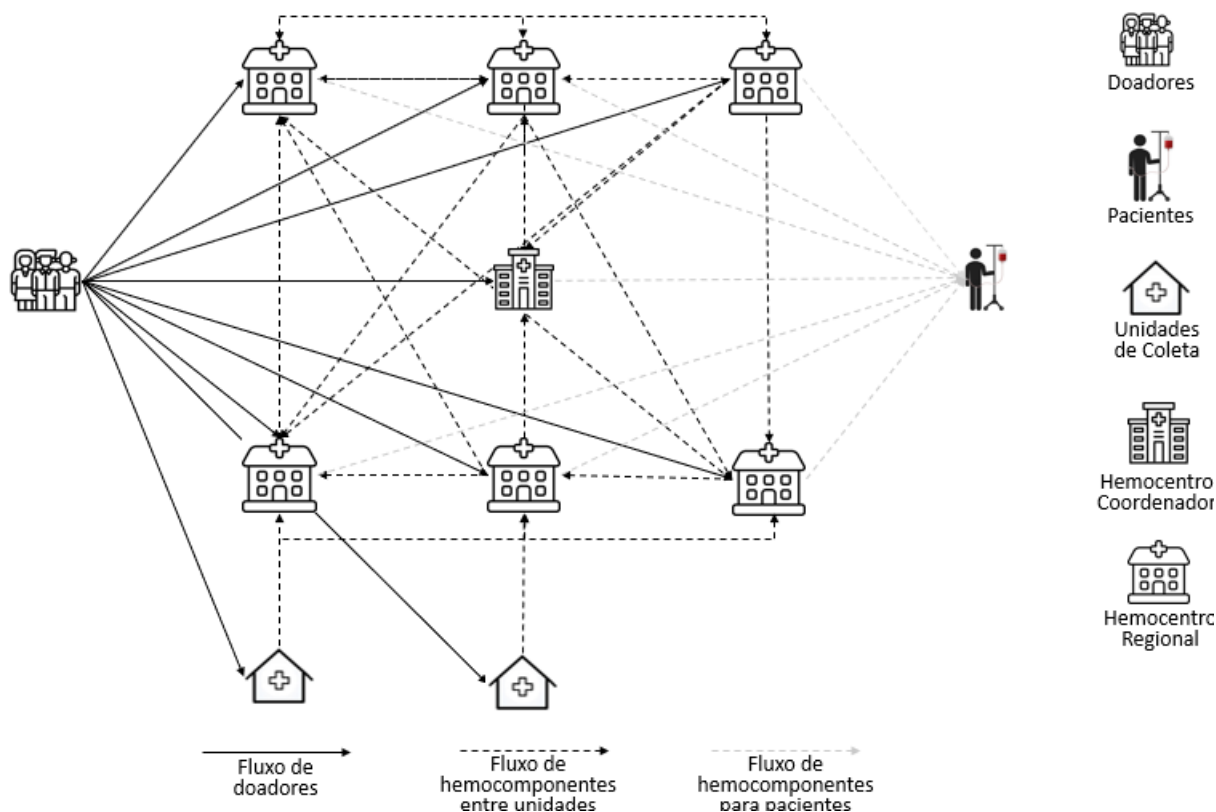


Figura 4 – Rede de Suprimentos da HEMOX

Simultaneamente na etapa de produção, ocorrem a produção dos hemocomponentes nos hemocentros coordenador e regionais e os testes nas amostras no hemocentro coordenador. As bolsas de sangue aguardam por um período de resfriamento e, assim que devidamente resfriadas, são transformadas em hemocomponentes, tais como: concentrado de hemácias, plasma fresco congelado, concentrado de plaquetas e crioprecipitado. Os testes realizados nas amostras coletadas são: sorológico, de ácido nucléico (NAT), imuno-hematológico e hemoglobina S. Para que as amostras de sangue cheguem ao hemocentro coordenador para a realização do teste tem-se os processos de transporte que também são evidenciados na rede de suprimentos conforme Figura 4. Enquanto os testes são realizados, os componentes permanecem armazenados em quarentena, para que, após o resultado, o hemocentro coordenador impute os resultados no sistema, de maneira que todos os hemocentros regionais tenham acesso a estes resultados e efetuem o descarte das bolsas que não foram aprovadas nos testes, enquanto que as restantes são autorizadas a saírem da quarentena e são conduzidas ao estoque. O estoque é submetido a inspeções semanais a fim de verificar se há bolsas de sangue próximas do vencimento. Em caso positivo, são descartadas as bolsas vencidas. Para encaminhar as bolsas de sangue, na etapa de distribuição, o hemocentro aguarda as solicitações das agências transfusionais, ambulatórios e hospitais conveniados, finalizando assim as etapas da rede de suprimentos, uma vez que os hemocomponentes já estão prontos para o uso nos pacientes.

Importante ressaltar que a HEMOX realiza o compartilhamento de estoque entre as

unidades quando necessário. Sendo assim, os estoques totais da rede são inspecionados por tipo sanguíneo. A HEMOX utiliza para o dimensionamento do estoque em cada hemocentro a média móvel do consumo de cada tipo sanguíneo em um período de sete dias. Caso seja necessário, a HEMOX realiza o remanejamento entre as unidades, como pode ser observado no fluxo de hemocomponentes entre as unidades na Figura 4. Os remanejamentos podem ocorrer entre quaisquer hemocentros da rede para proporcionar o equilíbrio de estoque. Contudo, a viabilidade de tais remanejamentos é analisada considerando os custos de transportes, dificuldades logísticas e da qualidade no transporte das bolsas.

3.2 Rede de Filas para a HEMOX

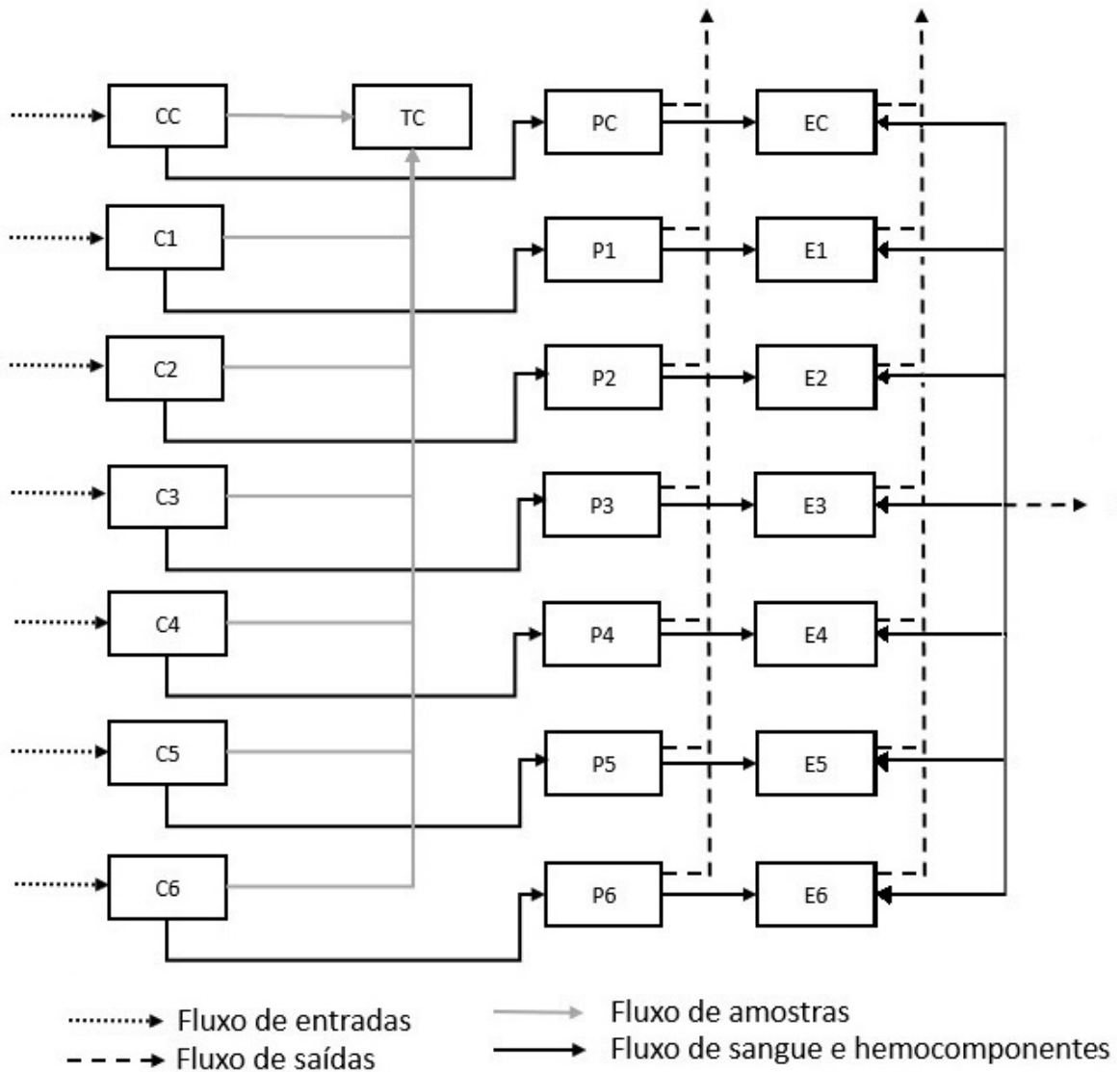


Figura 5 – Configuração da Rede de Filas para a HEMOX

A rede de filas associada ao sistema da HEMOX é exibida na Figura 5. As coletas das

bolsas de sangue e amostras, fluxo de doadores, são realizadas no hemocentro coordenador (CC) e em hemocentros regionais (C1-C6). As coletas realizadas nas unidades de coleta foram agrupadas com as coletas realizadas nos hemocentros regionais em que as unidades estão vinculadas. Em seguida, as amostras são direcionadas para etapa de teste (TC) e as bolsas de sangue para a etapa de produção no hemocentro coordenador (PC) ou em um dos hemocentros regionais (P1-P6), sendo, portanto, o ponto inicial do fluxo de componentes entre as unidades. Após a etapa de produção (PC e P1-P6), as bolsas e hemocomponentes associados com amostras não aprovadas nos testes são descartadas (representado pelo fluxo de saídas na Figura 5) e os demais são encaminhados para o estoque, EC e E1-E6, associado à respectiva unidade de coleta, CC e C1-C6. Outro ponto evidenciado na rede consiste na interconexão nas etapas de estoque para que seja possível remanejamento de estoque entre os hemocentros. As bolsas descartadas em função do vencimento são representadas pelo fluxo de saída nas respectivas unidades de estoque, EC e E1-E6. Por fim, tem-se evidenciado na rede o fluxo de hemocomponentes para o paciente, finalizando o ciclo.

3.3 Modelagem

Nesta seção apresenta-se o algoritmo proposto para avaliar as possíveis combinações de quantidades e localização de estações de produção. Nesse algoritmo, o método aproximado de decomposição apresentado na Seção 2.3.1 é utilizado para avaliar as medidas de desempenho de cada configuração analisada. O Algoritmo 1 apresenta o esquema geral da abordagem algorítmica.

Algorithm 1 Abordagem Algorítmica

```

1: for  $s = n$  to 1 do
2:    $c \leftarrow$  Combinações de estações de produção
3:   for  $i = 1$  to  $c$  do
4:      $b_{si} \leftarrow$  Distribuição de bolsas
5:      $D(b_{si}) \leftarrow$  Método aproximado de decomposição
6:      $M(b_{si}) \leftarrow$  Melhor solução  $D(b_{si})$ 
7:   end for
8: end for

```

O Algoritmo 1 inicia-se com a avaliação de todas as possíveis quantidades de estações de produção n . Na Figura 5, observa-se um exemplo de configuração com sete estações de produção (PC e P1-P6). Em seguida, são geradas todas as combinações possíveis para cada valor de s utilizando a Equação 3.1. Nesta equação, são obtidas as possíveis combinações das n estações de produção tomadas de s em s .

$$C_{n,s} = \frac{n!}{(n-s)!s!} \quad (3.1)$$

Após, avalia-se cada uma das c combinações. Inicialmente, o estoque é inicializado em cada das unidades (EC e E1-E6) para representar os estoques que as unidades mantêm.

As bolsas coletadas nas estações de coleta são distribuídas entre as estações de produção disponíveis em cada solução avaliada considerando a menor distância entre essas estações e a respectiva unidade de coleta. Optou-se por utilizar esse critério em função da perecibilidade das bolsas de sangue e para diminuir o tempo de deslocamento e, por consequência, agilizar a disponibilização da bolsa para consumo.

Em relação a capacidade dessas estações de produção, assume-se que as estações têm condições de atender todas as bolsas alocadas a elas em todas as iterações do algoritmo. Esse pressuposto foi assumido por se tratar de um problema em nível estratégico em que as decisões estão relacionadas ao projeto de rede, ou seja, a concepção e estrutura da cadeia de abastecimento. Esse método aborda decisões de localização de unidades de produção e alocação entre facilidades definindo as ligações entre pontos de coleta e produção e estabelecendo a unidade de produção que deve suprir cada unidade de estoque (demanda).

Após a etapa de produção, um percentual de não aprovação nos testes é aplicado antes de direcionar as bolsas ao estoque (arredondando para cima em caso de valor fracionário). As bolsas são direcionadas ao estoque associado à unidade em que a bolsa foi coletada. Nesta pesquisa, optou-se por não analisar alteração na quantidade e localização das unidades de estoque. Para analisar alteração na quantidade e localização desses pontos, seriam necessárias informações desagregadas não disponíveis de localização e quantidade de demanda em cada ponto. Além disso, a responsabilidade de buscar as bolsas no estoque é em geral dos pontos de demanda que gerenciam a forma como fazem essa atividade, ou seja, não é uma atividade diretamente gerenciada por essa rede.

Em seguida, as bolsas são retiradas das unidades de estoque (EC e E1-E6) para serem consumidas.

Posteriormente, cada solução b_{si} é avaliada utilizando o método aproximados de decomposição descrito pelas Equações 2.1, 2.4 e 2.5 apresentadas na Seção 2.3.1. O método utilizado nesta abordagem algorítmica é baseado em Morabito e Souza (2010) e Morabito, Souza e Vazquez (2014). O método é composto por três etapas:

- I. Análise da interação entre as estações: nessa etapa foram construídas as equações para cada uma das estações da rede considerando a superposição de chegadas, partidas e separação das partidas originando um sistema de equações lineares. As equações utilizadas dependem da aproximação utilizada (ver Seção 4.1). Esse sistema de equação foi resolvido usando a função para calcular matriz inversa da biblioteca Numpy da linguagem de programação Python (NUMPY, 2022). Ao resolver esse sistema, obteve-se a variabilidade do intervalo de tempo entre chegadas (ca_j).
- II. Na avaliação das medidas de desempenho para cada estação: utilizou-se o ca_j para calcular o tempo médio em fila de bolsas em cada estação j , $E(Wq_j)$, utilizando a Equação 2.13.
- III. Avaliação das medidas de desempenho da rede: analisa-se a rede de forma global pelo tempo

médio de bolsas em transporte e aguardando em fila por transporte ($E(T)$), utilizando a Equação 2.16.

A etapa finaliza quando todas as c combinações para cada quantidade n de estações de produção é avaliada e obtém-se a melhor solução para cada quantidade n de estações de produção.

Para a melhor solução observada para cada quantidade de estações de produção, também é verificada a necessidade de remanejamento entre as unidades de estoque. O remanejamento busca melhorar a distribuição das bolsas em estoque e acontece quando o estoque é inferior ao ideal em uma unidade de estoque e superior em outra unidade. Nesse caso, o remanejamento ocorre a partir da unidade mais próxima da unidade com estoque inferior ao ideal. Nesta etapa, ocorre a verificação da data de validade das bolsas em estoque, caso alguma bolsa esteja expirada ou próxima ao vencimento, a bolsa é descartada.

4 Resultados

Este capítulo descreve os experimentos realizados com o objetivo de validar a abordagem algorítmica apresentada no Seção 3.3. Para tanto, foi utilizado o Algoritmo 1 que retorna o menor tempo médio das bolsas aguardando em fila e em transporte para cada quantidade de unidades de produção.

Inicialmente, é apresentado o cenário analisado (Seção 4.1) e os resultados dos experimentos computacionais considerando esse cenário utilizando o Algoritmo 1 (Seção 4.2). Em seguida, uma análise de sensibilidade dos parâmetros (Seção 4.3) é conduzida e cenários alternativos considerando projeções de oferta e demanda (Seção 4.4) são analisados.

As implementações foram realizadas em linguagem de programação Python 3.8.0 utilizando um computador Windows Intel core i5, memória RAM de 16 GB 3200 MHz e armazenamento em SSD de 512 GB.

4.1 Cenário Analisado

O Algoritmo 1 é utilizado para avaliar a quantidade e localização de unidades de produção em uma cadeia de suprimentos de sangue inspirada em uma rede brasileira. Esse algoritmo inicia-se utilizando a configuração de rede de filas mostrada na Figura 5, em que sete unidades de produção (PC e P1-P6) estão localizadas em cada um dos pontos candidatos a receber essas instalações. Essa configuração representa a descentralização total das atividades de produção. Em seguida, todas as combinações de quantidades e localizações de unidades de produção são testadas. Por exemplo, uma das configurações com três estações de produção analisadas é PC, P1 e P6. Por fim, as últimas configurações testadas representam a centralização total das atividades de produção, em que a instalação de apenas um estação de produção é avaliada.

Ao final, o algoritmo fornece a configuração que minimiza o *lead time* médio de bolsas em transporte e aguardando em fila por transporte para cada configuração testada considerando o número e localização das unidades de produção. Estes resultados são de suma importância em termos de gerenciamento de estoque, pois quanto maior o tempo que as bolsas permanecem em transporte e fila, menor o tempo que ficam disponíveis em estoque para serem consumidas.

Este cenário é inspirado na configuração e no funcionamento utilizados pelo HEMOSC. Entretanto, assumiu-se que todas as localidades que dispõe de hemocentro são candidatas a sediarem uma unidade de produção para analisar todas as combinações de localidades candidatas. Também assumiu-se que as quantidades coletadas nas unidades de coleta foram agrupadas nos respectivos hemocentros. Foram utilizados dados de um ano (agosto de 2023 a agosto de 2024), incluindo: quantidade coletada de bolsas por tipo sanguíneo, fator Rhesus (Rh) e

hemocentro; quantidade demandada por tipo sanguíneo e hemocentro; quantidade descartada de hemocomponente por hemocentro; e o percentual de descarte de bolsas em função de reprovação nos testes por hemocentro.

A Tabela 3 apresenta a taxa média de chegadas de bolsas (x_j), a taxa média de consumo de bolsas (CO_j) e o estoque ideal (EI_j) por dia em cada localidade j . Também foram utilizados estoques iniciais equivalentes a quantidade coletada em um dia para cada hemocentro. A variabilidade dos tempos externos entre chegadas da classe k (ca_k) foi calculada através de dados históricos de coletas de sangue agregadas por tipo sanguíneo resultando em 0,89. Este resultado demonstra que a rede estudada não é Markoviana. Já a variabilidade dos tempos de serviço por estação, cs_j , foi fixada em 0,50 (ver discussão na Seção 4.3).

O percentual de reprovação nos testes e de descarte por validade foram calculados utilizando dados históricos, obtendo-se 1,79% e 5,99%, respectivamente. Por fim, a Tabela 4 resume a distância, em km, entre as localidades candidatas (C, 1, 2, 3, 4, 5 e 6) a receberem estações de produção. Para o tempo médio de deslocamento entre as localidades foi utilizado como velocidade média 60 km/h. Vale destacar que essas localidades possuem unidades de coleta e estocagem.

Tabela 3 – Dados HEMOX

Localidades	Taxa de chegada (x_j)	Taxa de consumo (CO_j)	Estoque Ideal (EI_j)
C	57	51	54
1	17	15	16
2	19	18	21
3	31	26	28
4	37	35	46
5	57	54	56
6	48	45	48

Tabela 4 – Distância entre as localidades candidatas (km)

Localidades	C	1	2	3	4	5	6
C	0	225	393	551	201	178	143
1	225	0	172	330	203	307	216
2	393	172	0	158	370	405	311
3	551	330	158	0	529	511	470
4	201	203	370	529	0	360	325
5	178	307	405	511	360	0	92
6	143	216	311	470	325	92	0

4.2 Experimentos Numéricos

A Tabela 5 apresenta as unidades de produção que devem ser instaladas e *lead time* médio de bolsas em transporte e aguardando em fila por transporte, em horas, para cada quantidade

de unidades. Neste sentido, cada uma das linhas da Tabela 5 representa a melhor configuração considerando cada quantidade de estações de produção.

Tabela 5 – Melhores configurações para cada quantidade de unidades de produção

Número de unidades de produção	Unidades de produção	$E(T)$
7	PC, P1, P2, P3, P4, P5 e P6	1,55
6	P1, P2, P3, P4, P5, P6	3,28
5	P1, P2, P3, P4, P6	4,67
4	P1, P2, P3, P4	12,71
3	P1, P2, P4	15,33
2	P1, P4	21,06
1	P1	24,85

Ao observar os resultados mostrados na Tabela 5, é possível observar que o menor tempo alcançado foi com a descentralização total da etapa de produção (com sete unidades de produção), ou seja, configuração em que as bolsas são produzidas no local em que são coletadas e, por fim, serão armazenadas. Já o maior tempo foi observado ao utilizar a centralização total da etapa de produção, configuração em que apenas uma estação de produção fará o processamento das bolsas sanguíneas, ou seja, haverá um deslocamento de bolsas coletadas de seis unidades de coleta para a unidade de produção escolhida, P1. Esses resultados são intuitivos ao analisar centralização e descentralização de unidades considerando apenas os tempos de deslocamento e fila.

A unidade de produção P1 está presente em todas as melhores configurações mostradas na Tabela 5. Já a unidade PC está presente apenas na descentralização total das unidades de produção. A localização C representa a localidade onde localiza-se o hemocentro coordenador, que na configuração atual está localizado o laboratório centralizado de testes. Mais ainda, a unidade P4 não está presente apenas na melhor configuração com uma unidade de produção. Vale destacar que para cada quantidade de unidades de produção foram testadas todas as possíveis combinações de configuração. E, ainda assim, percebe-se um padrão de eliminação das unidades de produção, eliminando, nesta ordem, PC, P5, P6, P3, P2 e, por fim, P4.

Ao considerar o *lead time* médio de bolsas em transporte e aguardando em fila por transporte, deve-se observar as diferenças de vida útil dos hemocomponentes. Por exemplo, o concentrado de hemácia e o concentrado de plaquetas tem vida útil de 42 e 5 dias, respectivamente (vide Tabela 1). Nesse sentido, a disponibilidade no caso dos componentes com menor vida útil é mais afetada pelo tempo de transporte. Isso sugere que ao serem incluídos todos os hemocomponentes produzidos por uma cadeia de suprimentos, analisar alternativas considerando, por exemplo, combinações de centralização e descentralização de unidades de produção considerando a vida útil dos diferentes hemocomponentes.

Por fim, em relação ao remanejamento de estoques, este aconteceu apenas da unidade E3 para a unidade E2 que, ainda assim não atingiu o estoque ideal. As demais unidades (EC, E1, E4, E5 e E6) não foram acionadas para receber ou ceder bolsas. Observa-se então que as

unidades de estoque EC, E1 e E3 alcançaram níveis ideais de estoque e as unidades E2, E4, E5 e E6 não alcançaram níveis ideais de estoque após o remanejamento de estoques. As unidades E2, E4, E5 e E6 atingiram 90,48%, 71,74%, 91,07% e 91,67%, respectivamente, do estoque ideal. Esse resultado sugere necessidade de aumento de quantidade coletada e/ou reavaliação dos níveis ideais de estoque utilizados. Mais ainda, como todas as coletas são direcionadas para as unidades de estoque de mesma localidade, todas as configurações apresentaram o mesmo resultado.

4.3 Análise de Sensibilidade

Experimentos computacionais foram realizados para avaliar a influência da variabilidade dos tempos de serviço, cs_j , nos resultados obtidos com o Algoritmo 1. Nesse sentido, testou-se os valores de cs_j igual a 0,25, 0,50 e 1 utilizados por Morabito, Souza e Vazquez (2014). Os resultados do experimento com o Algoritmo 1 sugerem que variar o parâmetro cs_j não altera significativamente a medida de desempenho aqui analisada e a configuração obtida, uma vez que a maior diferença encontrada entre os resultados foi de 0,01% entre 0,25 e 1. Neste sentido, optou-se por utilizar cs_j igual a 0,50.

Também foi utilizada para análise a rede de Jackson onde os processos de chegada e serviço são assumidos como sendo de Poisson com cs_j e ca_k iguais a 1. Essa hipótese é comumente assumida na literatura de redes de filas e permite entender o comportamento do sistema nos casos em que se tem alta variabilidade no intervalo entre chegadas externas e no tempo de serviço. Entretanto, assumir os processos como de Poisson não é uma suposição aceitável para a análise de redes genéricas, como a analisada nesse trabalho, pois seus processos de chegada e serviço podem ser muito menos variáveis do que os processos de Poisson, resultando em estimativas imprecisas das medidas de desempenho do sistema e soluções inadequadas, nesse caso, de localização de unidades.

Tabela 6 – Melhores configurações obtidas utilizando a Rede de Jackson

Número de unidades de produção	Unidades de produção	$E(T)$
7	PC, P1, P2, P3, P4, P5 e P6	1,24
6	PC, P1, P2, P3, P5, P6	3,86
5	P1, P2, P3, P4, P6	4,42
4	PC, P1, P2, P3	9,20
3	P1, P2, P3	16,35
2	P5, P6	24,92
1	P1	24,72

Os resultados para o cenário considerando a rede de Jackson são exibidos na Tabela 6. Observa-se que o aumento de variabilidade dos intervalos entre chegadas externas e tempos de serviço alterou as melhores configurações sugeridas para algumas quantidades de unidades de produção. Contudo, as configurações com centralização e descentralização total das unidades não foram impactadas, sugerindo que essas configurações são menos impactadas pela variabilidade

nos intervalos de chegada e tempos de serviço. Vale destacar também que as unidades de produção P1, P2 e P3 estão presentes em todas as configurações com mais de duas unidades de produção e a unidade P1 não está presente apenas na melhor configuração com duas unidades. Mais ainda, não foi observado o padrão de eliminação das unidades de produção observado anteriormente, mesmo mantendo o procedimento de testar todas as possíveis combinações. Já em relação ao $E(T)$, as maiores diferenças ocorreram nas configurações com sete, quatro, três e duas unidades de produção, destacando-se a configuração com quatro unidades que apresentou diferença de 38,15%.

Com o objetivo de avaliar o desempenho da abordagem proposta em outras instâncias, foram geradas instâncias com diferentes números de unidades de produção. Para cada uma dessas instâncias, o número de configurações a serem testadas foi calculado e o tempo necessário para o código retornar os resultados foi registrado, conforme ilustrado na Tabela 7. Os resultados revelaram aumento significativo no tempo computacional com o aumento no número de configurações a serem testadas. A abordagem desenvolvida mostrou-se adequada para analisar outras instâncias, entretanto, os tempos computacionais elevados indicam a necessidade de explorar métodos de otimização mais eficientes para lidar com instâncias de maior escala.

Tabela 7 – Análise de outras instâncias

Número de unidades de produção	Número de configurações	Tempo (minutos)
5	30	0,01
10	1.022	0,60
15	32.766	41,30
20	1.048.574	3.024,35

4.4 Cenários Alternativos

Também foram analisados cenários alternativos inspirados pelas significativas mudanças na demografia brasileira esperadas nos próximos anos. A Figura 7 apresenta as estimativas para 2024 e as projeções de 2030 a 2070 da população doadora (entre 16 e 69 anos) e idosa (entre 60 e 90 anos). Percebe-se crescimento tanto da população doadora quando de idosos no horizonte observado tomando como base a estimativa de 2024. Entretanto, o crescimento esperado da população doadora é de 21,25% enquanto da população idosa é de 179,23%. Esse crescimento reflete mudança na pirâmide etária com envelhecimento da população e a redução da proporção de jovens. Essa alteração afeta diretamente a oferta de sangue, já que o crescimento da população doadora, composta por pessoas entre 16 e 69 anos, tende a ser em uma escala menor do que da população idosa. Mais ainda, a mudança na pirâmide etária deve afetar particularmente a demanda por hemocomponentes uma que, segundo Greinacher et al. (2017), Volken et al. (2018), Oliveira e Reis (2020), grande parte das transfusões sanguíneas são realizadas em pessoas com mais de 60 anos.

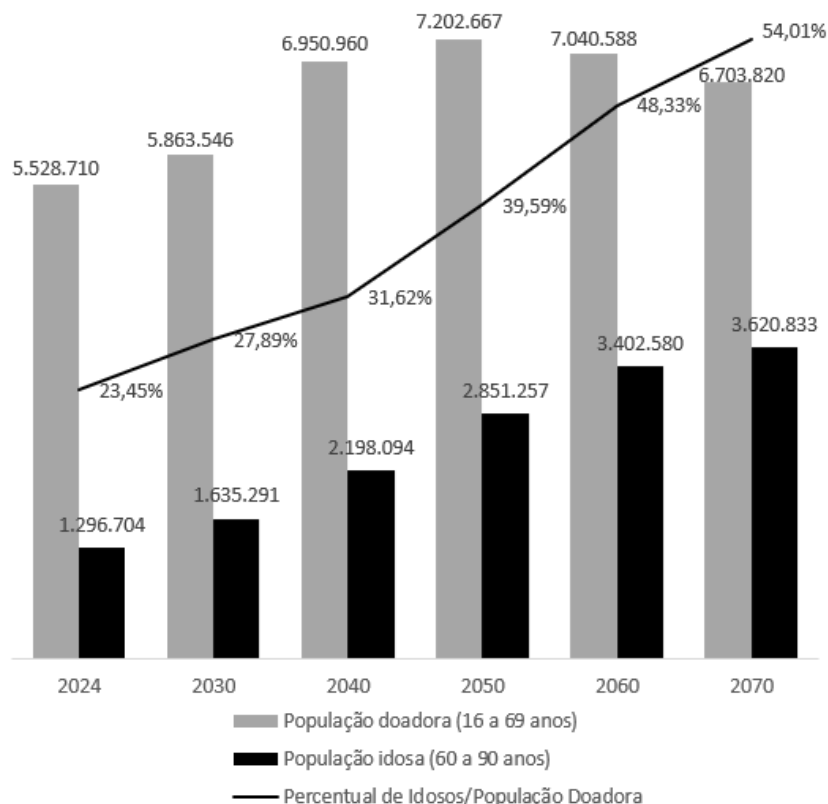


Figura 6 – Projeção da população idosa e população doadora em Santa Catarina
 Fonte: elaborado pela autora com dados disponibilizados pelo IBGE (2024)

Em função disso, cenários alternativos considerando as projeções populacionais da Figura 7 devem ser analisados. Nesse sentido, foram calculadas projeções de aumento de doação e de demanda baseadas nos crescimentos populacionais observados na Figura 7 e tendo como referência o ano de 2024. A Tabela 8 apresenta essas projeções para cada um dos cenários alternativos analisados.

Tabela 8 – Cenários Alternativos Analisados

Métrica	2030	2040	2050	2060	2070
Doação	+ 6,06%	+ 25,73%	+ 30,28%	+ 27,35%	+ 21,25%
Demanda	+ 26,11%	+ 69,51%	+ 119,89%	+ 162,40%	+ 179,23%

Em seguida, foram calculados os aumentos percentuais na população doadora (16 a 69 anos) e idosa (60 a 90 anos) para cada cenário mostrado na Tabela 8 utilizando como referência o ano de 2024. A partir disso, foram calculadas a taxa média de chegada de bolsas (x_j), a taxa média de consumo de bolsas (CO_j) e o estoque ideal (EI_j) por dia em cada localidade j para cada cenário, conforme mostrado no Anexo B. O estoque ideal (EI_j) foi calculado observando a relação entre a taxa média de consumo projetada para cada cenário observando a proporção dos dados atuais para cada hemocentro. Já as variabilidades dos tempos externos entre chegadas da classe k (ca_k) e dos tempos de serviço por estação (ca_k), os percentuais de reprovação nos

testes e de descarte por validade e as distâncias entre as localidades candidatas foram mantidos conforme Seção 4.1.

Os Cenários Alternativos se mostraram inviáveis uma vez que a taxa de consumo foi maior que taxa de chegada em todos os cenários analisados. Em função disso, foram testados incrementos na taxa de chegada em cada cenário (Cenários alternativos com Taxa de Chegada Acrescida). Esses incrementos começaram em 10% e foram sendo aumentados de 10 em 10% até que a taxa de chegada fosse suficiente para atender ao consumo. A taxa de chegada acrescida (\bar{x}_j) obtida é mostrada no Anexo B e considera os aumentos necessários de 10% em 2030, 30% em 2040, 50% em 2050, 90% em 2060 e 110% em 2070. Esses ajustes foram necessários para garantir que cada estação de estoque alcance ao menos o valor médio do estoque ideal alcançado no cenário analisado (Seção 4.2), ou seja, 77,99% do estoque ideal de cada estação.

Esses incrementos refletem a crescente demanda por sangue, especialmente devido ao envelhecimento populacional, e destacam a importância de ajustes constantes para garantir a sustentabilidade e a eficiência da rede, assegurando que os estoques de sangue sejam suficientes para atender à demanda projetada ao longo das décadas. Nesse contexto, tornam-se emergentes ações de engajamento voltadas para o aumento das taxas de doações sanguíneas, que são essenciais para manter a oferta adequada e minimização ou evitar o desabastecimento de estoques por falta de bolsas sanguíneas.

Mais ainda, ações voltadas para o aumento do número de pontos de coleta com implantação de unidades próprias ou em parceria com municípios e a utilização de unidades móveis de coleta podem ser utilizadas para facilitar o acesso dos doadores. As unidades pode ser instaladas em municípios com menor contingente populacional e funcionar, por exemplo, 2 ou 4 vezes no mês, a exemplo do que já acontece em outros estados. Já as unidades móveis são veículos são veículos equipados com todos os dispositivos necessários e seguem as normas sanitárias exigidas para a realização das doações. Geralmente, essa modalidade de coleta é utilizada em regiões onde não há hemocentros ou bancos de sangue, ou em ocasiões que exigem um aumento no número de coletas, como em campanhas de doação (BRASIL, 2016).

Os resultados dos Cenários Alternativos e Cenários Alternativos com Taxa de Chegada Acrescida mostram as mesmas configurações de unidades de produção e *lead times* médios de bolsas em transporte e aguardando em fila por transporte muito próximos dos resultados do cenário original. Mais ainda, devido aos níveis de estoques alcançados, não foi observado remanejamento de estoques nos Cenários Alternativos, apenas nos Cenários Alternativos com Taxa de Chegada Acrescida. Vale destacar que os acréscimos percentuais na taxa de chegada (coleta) utilizados nesses cenários foram homogêneos em todas as unidades de estoque. Entretanto, caso esse comportamento não seja observado em cenários futuros, alterações nas configurações e *lead times* podem ser observados.

A Figura 7 apresenta os percentuais de alcance do estoque ideal para o Cenário Alternativo e Cenário Alterativo com Taxa de Chegada Acrescida. Com relação aos Cenários Alternativos,

entre 2030 e 2050 houve diminuição nos níveis de estoque sem, entretanto, ruptura esperada. Nesses cenários, as taxas acrescidas propiciaram apenas alcançar níveis de estoque mais fáceis de serem gerenciados pelas redes. Entretanto, em 2060 e 2070, rupturas foram projetadas em quase todas as unidades de estoque no cenário alternativo sugerindo a necessidade de incremento nas doações para garantir o atendimento da demanda.

Vale observar que além dos incrementos na demanda analisados nesses cenários alternativos outros fatores podem influenciar a situação observada. O percentual de descarte de hemocomponentes pode ser reduzido em função da maior utilização dos itens em estoque observada nesses cenários. Mudanças em procedimentos médicos podem influenciar na demanda de hemocomponentes, tanto reduzindo quanto aumentando essa demanda.

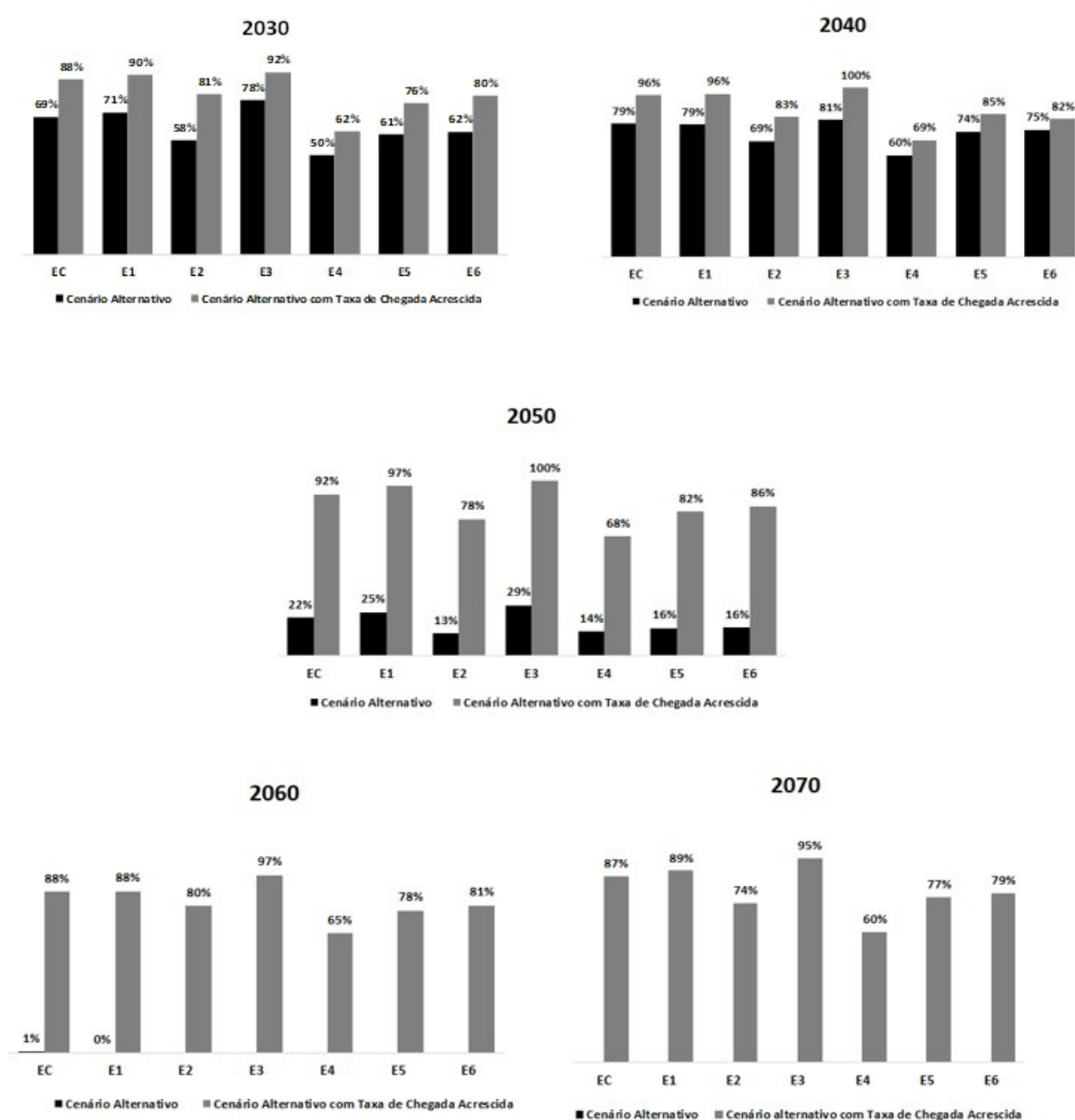


Figura 7 – Percentuais de alcance do estoque ideal

5 Considerações Finais

O sangue é vital uma vez que é frequentemente necessário em diversos procedimentos médicos tais como para reposição em cirurgias, procedimentos hemoterápicos, tratamento de doenças crônicas e outras condições adversas. A reposição do sangue depende da compatibilidade sanguínea entre doador e receptor, do tipo de hemocomponente necessário conforme o diagnóstico do paciente e da disponibilidade de hemocomponentes. Nesse sentido, gerenciar a produção e o estoque de hemocomponentes é essencial para equilibrar a oferta e a demanda, especialmente ao considerar o comportamento estocástico da oferta e demanda e a vida útil limitada dos hemocomponentes.

Neste sentido, o uso de ferramentas como a PO é importante para auxiliar na tomada de decisões assertivas, pois permite a aplicação de técnicas matemáticas, especialmente em cenários com comportamentos estocásticos. No contexto brasileiro, estudos sobre a cadeia de suprimento de sangue com a aplicação da PO são escassos. Portanto investigações detalhadas no contexto brasileiro são fundamentais para auxiliar no desenvolvimento de estratégias robustas que garantam acesso contínuo e eficiente ao sangue, preservando a saúde e bem-estar da população.

O sistema estudado é uma rede de suprimentos sanguínea inspirada na configuração do Centro de Hematologia e Hemoterapia de Santa Catarina (HEMOSC), a qual denominamos nesse trabalho de HEMOX. Essa rede é composta por hemocentros coordenador e regionais e unidades de coleta os quais funcionam de forma integrada. O sistema foi representado utilizando uma rede de filas aberta genérica, na qual são representados os fluxos de doação, de sangue e hemocomponentes, amostras e atendimento de demanda.

Uma abordagem algorítmica foi desenvolvida para avaliar as possíveis combinações de quantidades e localizações de estações de produção em rede suprimentos de sangue. O algoritmo utiliza o método aproximado de decomposição para analisar o desempenho de cada configuração, considerando o menor *lead time* médio de bolsas em transporte e aguardando em fila. Inicialmente, utilizou-se a configuração com sete unidades de produção, representando uma descentralização total das atividades de produção. Em seguida, todas as combinações de quantidades e localizações das unidades são testadas até a configuração de centralização total de produção, em que apenas uma estação de produção é avaliada.

Os resultados do Cenário Original indicaram aumento de *lead time* com o aumento da centralização das unidades de produção, enquanto a redução da quantidade de unidades de produção apresentou um menor *lead time* médio de bolsas em transporte e aguardando em fila. Também se observou um padrão de eliminação das unidades de produção nas configurações, mesmo testando todas as combinações de configuração, eliminando, nesta ordem, PC, P5, P6, P3, P2 e, por fim, P4. Mais ainda, a unidade P1 está presente em todas as melhores configurações

alcançadas e a unidade PC apenas na configuração que utiliza a descentralização total. Contudo, deve-se observar as diferenças de vida útil dos hemocomponentes ao considerar o *lead time* médio de bolsas em transporte e aguardando em fila por transporte. Por exemplo, o concentrado de hemácia e o concentrado de plaquetas tem vida útil de 42 e 5 dias, respectivamente. Nesse cenário, o remanejamento também contribuiu para o equilíbrio e alcance dos níveis ideais de estoque, uma vez que as unidades EC, E1, E3 alcançaram níveis ideais de estoque e E2, E4, E5 e E6 atingiram 90,48%, 71,74%, 91,07% e 91,67%, respectivamente, do estoque ideal. Contudo, estes resultados sugerem a necessidade de aumentar a quantidade de sangue coletada e/ou revisar os níveis ideais de estoque. Contudo, estes resultados sugerem a necessidade de aumentar a quantidade de sangue coletada e/ou revisar os níveis ideais de estoque.

As projeções de demanda mostraram um crescimento significativo na necessidade de hemocomponentes, especialmente com o crescimento acelerado da população idosa comparado ao da população doadora. Neste contexto, Cenários Alternativos indicam uma possível escassez de bolsas de sangue, principalmente entre 2060 e 2070, quando a demanda supera a quantidade coletada. Neste sentido, os resultados dos Cenários Alternativos indicaram a necessidade de um acréscimo nas quantidades coletadas de 10% em 2030, 30% em 2040, 50% em 2050, 90% em 2060 e 110% em 2070 para manter os níveis de estoque apresentados no cenário atual. Para alcançar esses acréscimos na quantidade de bolsas coletadas, estratégias como engajamento de campanhas de coleta, instalação de unidades de coleta em outros municípios e utilização de unidades móveis de coleta podem ser adotadas.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam utilizados outros métodos aproximados de decomposição para analisar essa rede de filas além de utilizar outros tipos de modelagem para tratar o problema abordado nessa dissertação, comparando-as com a abordagem desenvolvida. Pretende-se também avaliar a hemorrede, levando em conta os custos logísticos, de produção e armazenamento, visando apoiar a tomada de decisão diante dos diversos cenários possíveis. Também sugere-se incluir na modelagem a alocação de capacidade de produção nas estações. Por fim, pretende-se analisar as configurações de localização de unidades de coleta, teste e de estoque, inclusive utilizando outras medidas de desempenho para subsidiar as análises.

Referências

- AABB. *Standards for Blood Banks and Transfusion Services*. 32nd. ed. Bethesda, MD: American Association of Blood Banks, 2020. 16
- ABBASI, B.; HOSSEINIFARD, S. Z. On the issuing policies for perishable items such as red blood cells and platelets in blood service. *Decision Sciences*, v. 45, n. 5, p. 995–1020, 2014. 16, 18, 27
- ABDOLAZIMI, O. et al. A multi-layer blood supply chain configuration and optimization under uncertainty in covid-19 pandemic. *Computers & Industrial Engineering*, v. 182, 2023. 29
- ABDULWAHAB, U.; WAHAB, M. I. M. Approximate dynamic programming modeling for a typical blood platelet bank. *Computers & Industrial Engineering*, v. 78, p. 259–270, 2014. 27
- AGHSAMI, A. et al. A meta-heuristic optimization for a novel mathematical model for minimizing costs and maximizing donor satisfaction in blood supply chains with finite capacity queueing systems. *Healthcare Analytics*, v. 3, 2023. 26
- ALA, A. et al. Blood supply chain network design with lateral freight: A robust possibilistic optimization model. *Expert Systems with Applications*, v. 133, n. Part A, 2024. 33
- ALBIN, S. L. Poisson approximations for superposition arrival processes in queues. *Management Science*, v. 28, n. 2, p. 126–137, 1982. 37
- ALFONSO, E. et al. Modeling and simulation of blood collection systems. *Health care management science*, Springer, v. 15, n. 1, p. 63–78, 2012. 25
- ARANI, M. et al. A lateral resupply blood supply chain network design under uncertainties. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 93, p. 165–187, 2021. 32
- ARC. *American Red Cross - Blood Components*. 2017. <<https://www.redcrossblood.org/biomedical-services/hospital-customers/blood-banking-resources.html>>. 21
- ARENALES, M. et al. *Pesquisa Operacional*. 1. ed. [S.l.]: São Paulo: Campus, 2007. 34, 36
- ARVAN, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; ABDOLLAHI, M. Designing a bi-objective and multi-product supply chain network for the supply of blood. *Uncertain Supply Chain Management*, v. 3, n. 1, p. 57–68, 2015. 31
- BAESLER, F. et al. Analysis of inventory strategies for blood components in a regional blood center using process simulation. *Transfusion*, v. 54, n. 2, p. 323–330, 2014. 31
- BALLOU, R. H. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial*. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2006. 19
- BAR-LEV, S. K. et al. Two-stage queueing network models for quality control and testing. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 198, p. 859–866, 2009. 27
- BASKETT, F. et al. Open, closed, and mixed networks of queues with different classes of customers. *Journal of the ACM*, v. 22, p. 248–260, 1975. 36

- BELL, P. C. The use of decomposition techniques for the analysis of open restricted queuing networks. *Operations Research Letters*, Elsevier, v. 1, n. 6, p. 230–235, 1982. 35
- BEOJONE, C. V. *Avaliação do desempenho e cenários alternativos em um samu utilizando o modelo hipercubo estacionário e não-estacionário*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2017. 35
- BITRAN, G. R.; MORABITO, R. Open queueing networks: Optimization and performance evaluation models for discrete manufacturing systems. *Production and Operations Management*, v. 5, n. 2, p. 163–193, 1994. 34, 35, 36
- BITRAN, G. R.; MORABITO, R. State-of-the-art survey: Open queueing networks: Optimization and performance evaluation models for discrete manufacturing systems. *Production and Operations Management Society*, v. 5, n. 2, p. 163–193, 1996. 37, 41
- BITRAN, G. R.; TIRUPATI, D. Multiproduct queueing with deterministic routing: Decomposition approach and the notion of interference. *Management Science*, INFORMS, v. 34, n. 1, p. 75–100, 1988. 36, 37, 39
- BLAKE, J. T. et al. Déjà-vu all over again: using simulation to evaluate the impact of shorter shelf life for red blood cells at héma québec. *Transfusion*, v. 53, n. 7, p. 1544–1558, 2013. 21, 27
- BRASIL. Gestão de hemocentros: relatos de práticas desenvolvidas no brasil: Iv curso de especialização em gestão de hemocentros : resumos das monografias finais. *Ministério da Saúde, Departamento de Atenção Especializada e Temática*, 2016. 54
- BRASIL. Portaria de consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. *Ministério da Saúde, Brasília: Gabinete do Ministro*, 2017. 20
- BRUMMELEN, S. P. J. V.; KORT, W. L. de; DIJK, N. M. V. Waiting time computation for blood collection sites. *Operations Research for Health Care*, v. 7, p. 70–80, 2015. 25
- BRUMMELEN, S. P. J. V.; KORT, W. L. de; DIJK, N. M. V. Queue length computation of time-dependent queueing networks and its application to blood collection. *Operations Research for Health Care*, v. 17, p. 4–15, 2018. 25
- CHRISTOPHER, M. *Logistics and Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service*. 2. ed. [S.l.]: Financial Times: Pitman Publishing, 1998. 19
- DEGHANI, M.; ABBASI, B. An age-based lateral-transshipment policy for perishable items. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 198, p. 93–103, 2018. 27, 30
- DELEN, D. et al. Better management of blood supply-chain with - gis-based analytics. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 185, n. 1, p. 181–193, 2011. 30
- DHARMARAJA, S.; NARANG, S.; JAIN, V. A mathematical model for supply chain management of blood banks in india. *OPSEARCH*, Springer, v. 57, p. 541–552, 2019. 29
- DHHS. *Department of Health and Human Services - The 2011 National Blood Collection and Utilization Survey Report*. Washington: [s.n.], 2011. <<https://www.hhs.gov/sites/default/files/ash/bloodsafety/2011-nbcus.pdf>>. 21
- DIGLIO, A. et al. Multi-echelon facility location models for the reorganization of the blood supply chain at regional scale. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 183, 2024. 26

- DILLON, M.; OLIVEIRA, F.; ABBASI, B. A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 187, p. 27–41, 2017. 28
- DISNEY, R. L.; KÖNIG, D. Queueing networks: A survey of their random processes. *SIAM Review*, v. 27, n. 3, p. 335–403, 1985. 35
- DUAN, Q.; LIAO, W. A new age-based replenishment policy for supply chain inventory optimization of highly perishable products. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 145, n. 2, p. 658–671, 2013. 21
- DUAN, Q.; LIAO, W. Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and abo compatibility. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 153, p. 113–129, 2014. 21
- EGHBALI, S. K.; MOUSAVI, S. M.; SALIMIAN, S. Designing blood supply chain networks with disruption considerations by a new interval-valued fuzzy mathematical model: M/m/c queueing approach. *Computers & Industrial Engineering*, v. 182, 2023. 33
- ELSAYED, N.; TAHA, R.; HASSAN, M. Measuring blood supply chain performance using monte-carlo simulation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 55, n. 10, p. 2011–2017, 2022. 28
- ENNS, S. T. Work flow analysis using queuing decomposition models. *Computers Industrial Engineering*, v. 34, n. 2, p. 371–383, 1998. 37
- ENSAFIAN, H.; YAGHOUBI, S. Robust optimization model for integrated procurement, production and distribution in platelet supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 103, p. 32–55, 2017. 31
- ENTEZARI, S. et al. A bi-objective stochastic blood type supply chain configuration and optimization considering time-dependent routing in post-disaster relief logistics. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 188, 2024. 33
- ERLANG, A. K. Solution of some problems in the theory of probabilities of some significance in automatic telephone exchanges. *Post Office Electrical Engineer's Journal*, v. 10, p. 189–197, 1917. 34
- FAHIMNIA, B. et al. Supply chain design for efficient and effective blood supply in disasters. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 183, p. 700–709, 2017. 31
- FERREIRA, V. E. de S.; CARMO, B. B. T. do; OLIVEIRA, A. G. de. Proposta de um sistema de informação para a gestão de inventário e o direcionamento das campanhas de coleta de sangue. *Gestão & Produção*, v. 26, n. 2, 2019. 16, 28
- FILHO, V. J. M. F. Processos estocásticos e teoria de filas. In: *Processos estocásticos e teoria de filas*. [S.l.]: Programa de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 35
- GHASEMI, P. et al. A possibilistic-robust-fuzzy programming model for designing a game theory based blood supply chain network. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 112, p. 282–303, 2022. 26

- GLASGOW, S. M. et al. Development of a discrete event simulation model for evaluating strategies of red blood cell provision following mass casualty events. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 270, n. 1, p. 362–374, 2018. 30
- GOVIL, M. K.; FU, M. C. Queueing theory in manufacturing: A survey. *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier, v. 18, n. 3, p. 214–240, 1999. 34, 36
- GREGOR, P. J.; FORTHOFFER, R. N.; KAPADIA, A. S. An evaluation of inventory and transportation policies of a regional blood distribution system. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 10, n. 1, p. 106–113, 1982. 29
- GREINACHER, A.; FENDRICH, K.; HOFFMANN, W. Demographic changes: the impact for safe blood supply. *Transfusion Medicine and Hemotherapy*, Karger Publishers, v. 37, n. 3, p. 141—148, 2010. 16
- GREINACHER, A. et al. A population-based longitudinal study on the implications of demographics on future blood supply. *Transfusion*, Wiley Online Library, v. 56, n. 12, p. 2986–2994, 2016. 16
- GREINACHER, A. et al. A population-based longitudinal study on the implication of demographic changes on blood donation and transfusion demand. *Blood Advances*, American Society of Hematology Washington, v. 1, n. 14, p. 867–874, 2017. 16, 52
- GUIMARÃES, I. F. G. *Modelo de rede de filas para avaliação de desempenho em trechos singelos de malhas ferroviárias*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 37
- GUNPINAR, S.; CENTENO, G. Stochastic integer programming models for reducing wastages and shortages of blood products at hospitals. *Computers & Operations Research*, Elsevier, p. 129–141, 2015. 27
- HAMDAN, B.; DIABAT, A. A two-stage multi-echelon stochastic blood supply chain problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 101, p. 130–143, 2019. 32
- HENDALIANPOUR, A. Mathematical modeling for integrating production-routing-inventory perishable goods: A case study of blood products in iranian hospitals. In: *International Conference on Dynamics in Logistics*. [S.l.]: Springer, 2018. p. 125–136. 32
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introduction to operations research*. 6. ed. [S.l.]: Singapore: McGrawHill Book Co, 1995. 34
- HOSSEINI-MOTLAGH, S.-M.; SAMANI, M. R. G.; FARAJI, M. Dynamic optimization of blood collection strategies from different potential donors using rolling horizon planning approach under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 188, 2024. 26
- IBGE. População cresce, mas número de pessoas com menos de 30 anos cai 5,4% de 2012 a 2021. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*, 2022. 15
- IBGE. Projeção da população do brasil e unidades da federação por sexo e idade para o período 2000-2070. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*, 2024. 53
- ISLAM, M. D.; SHEN, H.; BADSHA, S. Integrating blockchain into supply chain safeguarded by puf-enabled rfid. *Internet of Things*, v. 18, 2022. 19

- JABBARZADEH, A.; FAHIMNIA, B.; SEURING, S. Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: A robust model with real world application. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 70, p. 225–244, 2014. 31
- JACKSON, J. R. Networks of waiting lines. *Operations Research*, INFORMS, v. 5, n. 4, p. 518–521, 1957. 35
- JAFARKHAN, F.; YAGHOUBI, S. An efficient solution method for the flexible and robust inventory-routing of red blood cells. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 117, p. 191–206, 2018. 29
- JENNINGS, J. B. Blood bank inventory control. *Management Science*, INFORMS, v. 19, n. 6, p. 637–645, 1973. 27
- KATSALIAKI, K. Cost-effective practices in the blood service sector. *Health Policy*, v. 86, n. 2-3, p. 276–287, 2008. 21, 27
- KATSALIAKI, K.; BRAILSFORD, S. C. Using simulation to improve the blood supply chain. *Journal of the Operational Research Society*, Taylor & Francis, v. 58, n. 2, p. 219–227, 2007. 30
- KAYA, O.; OZKOK, D. A network design problem with location, inventory and routing decisions. In: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*. [S.l.: s.n.], 2018. 32
- KAYA, O.; OZKOK, D. A blood bank network design problem with integrated facility location, inventory and routing decisions. *Networks and Spatial Economics*, Springer, v. 20, n. 3, p. 757–783, 2020. 32
- KENDALL, D. G. Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded markov chain. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 24, n. 3, p. 338–354, 1953. 34
- KENDALL, K. E.; LEE, S. M. Formulating blood rotation policies with multiple objectives. *Management Science*, INFORMS, v. 26, n. 11, p. 1145–1157, 1980. 29
- KERBACHEA, L.; SMITH, J. M. The generalized expansion method for open finite queueing networks. *European Journal of Operational Research*, v. 32, n. 3, p. 448–461, 1987. 37
- KERBACHEA, L.; SMITH, J. M. Multi-objective routing within large scale facilities using open queueing networks. *European Journal of Operational Research*, v. 121, p. 105–123, 2000. 37
- KLEINROCK, L. *Queueing Systems. Volume 1: Theory*. 1. ed. [S.l.]: New York: John Wiley & Sons, 1975. 34
- KOPACH, R.; BALÇIOĞLU, B.; CARTER, M. Tutorial on constructing a red blood cell inventory management system with two demand rates. *European Journal of Operational Research*, v. 185, n. 3, p. 1051–1059, 2008. 28
- KUEHN, P. Approximate analysis of general networks by decomposition. *IEEE Transactions on Communications*, v. 27, n. 1, p. 113–126, 1979. 37
- LEE, H. L.; BILLINGTON, C. The evolution of supply chain management models and practice at hewlett-packard. *Interfaces*, v. 25, n. 5, p. 42–63, 1995. 19

- LIZARAZO, E. A.; XIE, X.; AUGUSTO, V. A queuing network approach for appointment scheduling of blood donors. *Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2012)*, Bucarest, Romania, p. 303–308, 2012. 25
- LOWALEKAR, H.; RAVICHANDRAN, N. A model for blood components processing. *Transfusion*, v. 51, n. 7, p. 1624–1634, 2011. 30
- LOWALEKAR, H.; RAVICHANDRAN, N. Blood bank inventory management in india. *Operational Research Society of India*, v. 51, n. 3, p. 376–399, 2013. 22
- MAGALHÃES, V. S. et al. Simulation- optimisation approach to support management of blood components inventory. *Journal of Simulation*, 2024. 15, 16, 21, 28
- MANSUR, A. et al. A mixed-integer linear programming model for sustainable blood supply chain problems with shelf-life time and multiple blood types. *Decision Analytics Journal*, v. 8, 2023. 33
- MENESES, M.; SANTOS, D.; BARBOSA-PÓVOA, A. Modelling the blood supply chain – from strategic to tactical decisions. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 307, n. 2, p. 499–518, 2023. 20, 23, 24
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Guia para o uso de hemocomponentes*. 2015. <https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia_uso_hemocomponentes.pdf>. 22
- MORABITO, R. Análise de curvas de trade-off baseada em teoria de redes de filas para o projeto e planejamento de sistemas discretos de manufatura. Tese Livre-Docência, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1998. 40, 41
- MORABITO, R.; SOUZA, M. C. de. Roteamento de multi-fluxos em redes de filas genéricas. *Pesquisa Operacional*, v. 30, n. 3, p. 583–600, 2010. 36, 37, 40, 41, 46
- MORABITO, R.; SOUZA, M. C. de; VAZQUEZ, M. Approximate decomposition methods for the analysis of multicommodity flow routing in generalized queuing networks. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 232, n. 3, p. 618–629, 2014. 36, 37, 38, 39, 40, 41, 46, 51
- NAGURNEY, A.; MASOUMI, A. H. Supply chain network design of a sustainable blood banking system. In: *Sustainable Supply Chains: Models, Methods and Public Policy Implications*. [S.l.: s.n.], 2012. 31
- NAGURNEY, A.; MASOUMI, A. H.; YU, M. Supply chain network operations management of a blood banking system with cost and risk minimization. *Computational Management Science*, Springer, v. 9, n. 2, p. 205–231, 2012. 31
- NAGURNEY, A.; MASOUMI, A. H.; YU, M. Blood inventory management in hospitals: considering supply and demand uncertainty and blood transshipment possibility. *Operations Research for Health Care*, Springer, v. 9, n. 2, p. 43–56, 2017. 27
- NUMPY. *Biblioteca Numpy*. 2022. <<https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.linalg.inv.html>>. 46
- OLIVEIRA, E. M. de; REIS, I. A. What are the perspectives for blood donations and blood component transfusion worldwide? a systematic review of time series studies. *São Paulo Medical Journal*, SciELO Brasil, v. 138, n. 1, p. 54–59, 2020. 16, 52

- OR, I.; PIERSKALLA, W. P. A transportation location-allocation model for regional blood banking. *AIIE transactions*, Taylor & Francis, v. 11, n. 2, p. 86–95, 1979. 29
- OSÓRIO, A. F.; BRAILSFORD, S. C.; SMITH, H. K. A structured review of quantitative models in the blood supply chain: a taxonomic framework for decision-making. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 24, p. 7191—7212, 2015. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 30, 31
- OSÓRIO, A. F. et al. Simulation-optimization model for production planning in the blood supply chain. *Health care management science*, Springer, v. 20, n. 4, p. 548–564, 2017. 21, 31
- OSÓRIO, A. F. et al. A structured review of quantitative models in the blood supply chain: a taxonomic framework for decision-making. *Vox sanguinis*, Wiley Online Library, v. 113, n. 8, p. 760–769, 2018. 23, 25
- OUOROU, A.; MAHEY, P. A minimum-mean cycle cancelling method for multicommodity flow problems. *European Journal of Operational Research*, v. 121, p. 532–548, 2000. 40
- PIERSKALLA, W. P. Supply chain management of blood banks. In: *Operations research and health care*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 103–145. 19, 29
- PIRABÁN, A.; GUERRERO, W. J.; LABADIE, N. Survey on blood supply chain management: Models and methods. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 112, p. 113–126, 2019. 21, 24, 27
- RAJENDRAN, S.; RAVINDRAN, A. R. Platelet ordering policies at hospitals using stochastic integer programming model and heuristic approaches to reduce wastage. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 110, p. 151–164, 2017. 27
- RAJENDRAN, S.; RAVINDRAN, A. R. Inventory management of platelets along blood supply chain to minimize wastage and shortage. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 130, p. 714–730, 2019. 28
- REKABI, S. et al. Designing a responsive-sustainable-resilient blood supply chain network considering congestion by linear regression method. *Expert Systems with Applications*, v. 245, n. 1, 2024. 33
- RIBEIRO, M. L. de J. *Análise de uma cadeia de suprimento de sangue no brasil utilizando otimização via simulação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2022. 16, 33
- RYTILÄ, J. S.; SPENS, K. M. Using simulation to increase efficiency in blood supply chains. *Management Research News*, Emerald Group Publishing Limited, v. 29, p. 801–819, 2006. 30
- SAMANI, M. R.; HOSSEINI-MOTLAGH, S. A. T. S.-M. Integrated blood supply chain planning for disaster relief. *International journal of disaster risk reduction*, Elsevier, v. 27, p. 168–188, 2018. 32
- SAPOUNTZIS, C. Allocating blood to hospitals from a central blood bank. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 157–162, 1984. 28
- SEGAL, M.; WHITT, W. A queuing network analyzer for manufacturing. *Teletraffic science for new cost-effective systems, networks and services*, Elsevier, ITC-12, p. 1146–1152, 1984. 37, 40
- SEIFRIED, E. et al. How much blood is needed? *Vox Sanguinis*, v. 100, n. 1, p. 10–21, 2011. 15

- SELVAKUMAR, S.; SHAHABUDEEN, P.; ROBERT, T. P. An analysis of re-configured blood transfusion network of urban india to improve the service level: a simulation approach. *Journal of Medical Systems*, Springer, v. 43, n. 2, 2019. 27
- SHIH, H.; KASAIE, A.; RAJENDRAN, S. A multiple criteria decision-making model for minimizing platelet shortage and outdating in blood supply chains under demand uncertainty. *Healthcare Analytics*, v. 3, 2023. 28
- SHIH, H.; RAJENDRAN, S. Stochastic inventory model for minimizing blood shortage and outdating in a blood supply chain under supply and demand uncertainty. *Journal of Healthcare Engineering*, v. 2020, 2020. 28
- SHIRAZI, H.; KIA, R.; GHASEMI, P. A stochastic bi-objective simulation–optimization model for plasma supply chain in case of covid-19 outbreak. *Applied Soft Computing*, v. 112, 2021. 32
- SIMONETTI, A. et al. A stock-and-flow simulation model of the us blood supply. *Transfusion*, v. 54, n. 3 Pt 2, p. 828–838, 2013. 27, 30
- SMITH, J. M.; BOUANAKA, B. Queuing network decomposition and facilities planning. *Computers Operations Research*, v. 12, n. 1, p. 1–16, 1985. 36
- SMITH, J. M.; KERBACHE, L. Topological network design of closed finite capacity supply chain networks. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 45, p. 70–81, 2017. 37
- SOARES, H. L. F. et al. Optimisation and control of the supply of blood bags in hemotherapeutic centres via markov decision process with discounted arrival rate. *Artificial Intelligence in Medicine*, Elsevier, 2020. 16, 26
- SUEN, T. Y.; SONG, X.; JONES, D. A two-stage stochastic model for a multi-objective blood platelet supply chain network design problem incorporating frozen platelets. *Computers & Industrial Engineering*, v. 185, 2023. 33
- VOLKEN, T. et al. Red blood cell use in switzerland: trends and demographic challenges. *Blood transfusion*, v. 16, n. 1, p. 73–82, 2018. 16, 52
- VRAT, P.; KHAN, A. B. Simulation of a blood-inventory-bank system in a hospital. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier, v. 10, n. 1, p. 7–15, 1976. 27
- WHITT, W. Performance of the queueing network analyzer. *The Bell System Technical Journal*, v. 62, p. 2817–2843, 1983. 39
- WHITT, W. The queueing network analyzer. *The Bell System Technical Journal*, v. 62, p. 2779–2815, 1983. 36, 38, 40, 41
- WHO. *World Health Organization - Blood Safety and Availability*. 2014. <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs279/en/>>. 15, 17
- WU, K.; MCGINNIS, L. Performance evaluation for general queueing networks in manufacturing systems: Characterizing the trade-off between queue time and utilization. *European Journal of Operational Research*, v. 221, n. 2, p. 328–339, 2012. 37
- YU, V. F. et al. Simulated annealing with restart strategy for the blood pickup routing problem. In: *IOP conference series: Materials science and engineering*. [S.l.: s.n.], 2018. v. 337, n. 1. 26

YU, X. et al. Population-based projections of blood supply and demand, china, 2020. In: *Bulletin of the World Health Organization*, 2020. [S.l.: s.n.], 2020. 15

ZUCOLOTO, M. L. et al. Comparison of the demographic and social profile of blood donors and nondonors in brazil. *Health & Social Care in the Community*, Wiley Online Library, v. 27, n. 2, p. 330–336, 2019. 16, 17

ÖZENER, O.; EKICI, A. Managing platelet supply through improved routing of blood collection vehicles. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 98, p. 113–126, 2018. 26

Anexos

A Autorização HEMOSC

SECRETARIA DE ESTADO DA SAÚDE FUNDAÇÃO DE APOIO AO HEMOSC E CEPON – FAHECE CENTRO DE HEMATOLOGIA E HEMOTERAPIA DE SANTA CATARINA – HEMOSC COORDENADORIA DE EDUCAÇÃO, PLANEJAMENTO E QUALIDADE E-mail: educacao.hmr@hemosc.org.br Telefone: (48)3251-9753	
SOLICITAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DE TRABALHO/PESQUISA CIENTÍFICA NO HEMOSC	HMR.CEPQ.FRM.110-02

IDENTIFICAÇÃO DO(S) PESQUISADOR(ES)

Nome (s): Carolina Reis Gualberto	
Telefones para contato: 31-975069747	e-mail: carolinareisgualberto@gmail.com
Nome do Curso e Instituição de Ensino: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFMG	
Orientador: Lásara Fabrícia Rodrigues	
Telefones para contato: 31-984987559	e-mail: lasarafrodrigues@gmail.com

TRABALHO

Título: Uma abordagem de redes de filas para análise de cadeia de suprimentos de sangue
--

Eu Lásara Fabrícia Rodrigues comprometo-me com o sigilo dos dados, bem como assumo a responsabilidade pelos dados coletados e publicados. Comprometo-me com a entrega de uma cópia eletrônica em PDF dos resultados da pesquisa (TCC, monografia, artigo, dissertação, tese, ...) a CEPQ para ser disponibilizado no Site do Hemosc.

Estou ciente de que a coleta de dados somente poderá ocorrer após a aprovação da Comissão Científica do Hemosc e do Comitê de Ética em Pesquisa no caso da submissão do Projeto à Plataforma Brasil.

Documento assinado digitalmente
gov.br LASARA FABRÍCIA RODRIGUES
Data: 15/06/2024 15:28:46-0300
Verifique em <https://validar.jd.gov.br>

Assinatura do solicitante: _____	Data: 19/06/2024
Necessidade de Investimento (custeio) Institucional	
<input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	

PARECER DA GERÊNCIA DO ADMINISTRATIVO DO HEMOCENTRO COORDENADOR: (nos casos em que estiver previsto custeio institucional)

- 1 - Como Gerente Administrativo do Centro de Hematologia e Hemoterapia de Santa Catarina – HEMOSC, **autorizo** o custeio institucional para a realização do estudo.
- 2 - Como Gerente Administrativo do Centro de Hematologia e Hemoterapia de Santa Catarina – HEMOSC, **não autorizo** o custeio institucional para a realização do estudo.

PARECER FINAL DA DIREÇÃO DO HEMOCENTRO COORDENADOR:

- 1 - Como representante legal do Centro de Hematologia e Hemoterapia de Santa Catarina – HEMOSC, **autorizo** a realização do referido estudo para os devidos fins e efeitos legais.
- 2 - Como representante legal do Centro de Hematologia e Hemoterapia de Santa Catarina – HEMOSC, **não autorizo** a realização do referido estudo para os devidos fins e efeitos legais.

Assinatura e carimbo: _____ Data: ____/____/____

Patricia Carsten
Diretora Geral
HEMOSC

B Projeções Utilizadas Nos Cenários Alternativos

2030				
Localidade	Taxa de Chegada Cenário Alternativo (x_j)	Taxa de Chegada Cenário Alternativo com Taxa de Chegada Acrescida (\bar{x}_j)	Taxa de consumo (CO_j)	Estoque Ideal (EI_j)
C	61	74	65	68
1	19	23	19	21
2	21	26	23	26
3	33	40	35	36
4	40	48	45	58
5	61	74	69	72
6	51	62	57	60
2040				
Localidade	Taxa de Chegada (x_j)	Taxa de Chegada Acrescida (\bar{x}_j)	Taxa de consumo (CO_j)	Estoque Ideal (EI_j)
C	72	87	87	91
1	22	27	26	28
2	24	29	31	35
3	39	47	45	48
4	47	57	60	78
5	72	87	92	97
6	61	74	77	87
2050				
Localidade	Taxa de Chegada (x_j)	Taxa de Chegada Acrescida (\bar{x}_j)	Taxa de consumo (CO_j)	Estoque Ideal (EI_j)
C	75	120	113	118
1	23	37	33	36
2	25	40	40	46
3	41	66	58	62
4	49	79	77	101
5	75	120	119	125
6	63	101	99	104
2060				
Localidade	Taxa de Chegada (x_j)	Taxa de Chegada Acrescida (\bar{x}_j)	Taxa de consumo (CO_j)	Estoque Ideal (EI_j)
C	73	146	134	141
1	22	44	40	43
2	25	50	48	54
3	40	80	69	74
4	48	96	92	121
5	73	146	142	149
6	62	124	119	124
2070				
Localidade	Taxa de Chegada (x_j)	Taxa de Chegada Acrescida (\bar{x}_j)	Taxa de consumo (CO_j)	Estoque Ideal (EI_j)
C	70	154	143	150
1	21	47	42	46
2	24	53	51	58
3	38	84	73	79
4	45	99	98	129
5	70	154	151	159
6	59	130	126	132