



**Distribuição de Vacinas pela VIII GERES em Pernambuco:
Roteirização Otimizada para Atendimento Regional**

Camila Pinheiro Sousa

Universidade Federal do Vale do São Francisco
(camila.pinheiro@discente.univasf.edu.br)

Gabriel Pereira da Silva

Universidade Federal do Vale do São Francisco
(gabrielpereira_uni@outlook.com)

Maria Luisa Soares Cavalcante

Universidade Federal do Vale do São Francisco
(maria.soarescavalcante@discente.univasf.edu.br)

Edson Tetsuo Kogachi

Universidade Federal do Vale do São Francisco
(edson.kogachi@univasf.edu.br)

Resumo

Considerando a importância da Rede de Frio e das exigências legais para o transporte de imunobiológicos este trabalho propõe uma solução para otimizar a roteirização logística da distribuição de vacinas aplicando métodos quantitativos para aprimorar o planejamento das rotas. Foram utilizados dados reais de distâncias rodoviárias e informações sobre a média mensal de doses aplicadas em 2022, obtidas no DATASUS, assumindo-as como aproximação da demanda de transporte. Dois algoritmos foram desenvolvidos em linguagem Python: o primeiro baseado em rota única, Problema do Caixeiro Viajante (PCV); o segundo em rotas múltiplas pelo método heurístico de Clarke



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

& Wright. Os resultados mostraram que o PCV apresentou menor distância total percorrida (558,3 km), porém com baixa utilização da capacidade do veículo. Em contrapartida, o modelo de Clarke & Wright gerou duas rotas com maior quilometragem (671,4 km no total), mas com maior aderência à realidade logística de sistemas com múltiplos veículos. A análise comparativa destaca o potencial de ambos os métodos conforme o objetivo da operação. O estudo reforça o papel da Engenharia de Produção na aplicação de técnicas computacionais e de modelagem para melhorar processos da saúde pública, e sugere o aprimoramento futuro da abordagem com variáveis operacionais mais complexas.

Palavras-chave: Logística de Vacinas, Roteirização, Problema do Caixeiro Viajante, Método de Clarke & Wright.

Abstract

Considering the importance of the cold chain and the legal requirements for the transportation of immunobiologicals, this paper proposes a solution to optimize the logistics routing of vaccine distribution by applying quantitative methods to improve route planning. Real data on road distances and information on the average monthly number of doses administered in 2022, obtained from DATASUS, were used, assuming them as an approximation of transportation demand. Two algorithms were developed in Python: the first based on a single route, the Traveling Salesperson Problem (TSP); the second on multiple routes using the Clarke & Wright heuristic method. The results showed that the TSP resulted in a shorter total distance traveled (558.3 km), but with low vehicle capacity utilization. In contrast, the Clarke & Wright model generated two routes with greater mileage (671.4 km total), but with greater adherence to the logistical reality of multi-vehicle systems. The comparative analysis highlights the potential of both methods depending on the operational objective. The study reinforces the role of Production Engineering in applying computational and modeling techniques to improve public health processes and suggests future improvements to the approach with more complex operational variables.



Keywords: Vaccine Logistics, Routing, Traveling Salesperson Problem, Clarke & Wright Method.

Resumen

Considerando la importancia de la cadena de frío y los requisitos legales para el transporte de inmunobiológicos, este trabajo propone una solución para optimizar el ruteo logístico de la distribución de vacunas mediante la aplicación de métodos cuantitativos para mejorar la planificación de rutas. Se utilizaron datos reales sobre distancias por carretera e información sobre el número promedio mensual de dosis administradas en 2022, obtenidos de DATASUS, asumiéndolos como una aproximación a la demanda de transporte. Se desarrollaron dos algoritmos en Python: el primero basado en una sola ruta, el Problema del Agente Viajero (PAV); el segundo en múltiples rutas utilizando el método heurístico de Clarke y Wright. Los resultados mostraron que el TSP resultó en una distancia total recorrida más corta (558,3 km), pero con baja utilización de la capacidad vehicular. Por el contrario, el modelo de Clarke y Wright generó dos rutas con mayor kilometraje (671,4 km en total), pero con mayor apego a la realidad logística de los sistemas multivehículo. El análisis comparativo destaca el potencial de ambos métodos en función del objetivo operativo. El estudio refuerza el papel de la Ingeniería de Producción en la aplicación de técnicas computacionales y de modelado para mejorar los procesos de salud pública y sugiere futuras mejoras al enfoque con variables operacionales más complejas.

Palabras clave: Logística de vacunas, Enrutamiento, Problema del Agente Viajero, Método de Clarke y Wright.

1. INTRODUÇÃO

O Programa Nacional de Imunizações (PNI), instituído pelo Ministério da Saúde em 1973, é reconhecido internacionalmente como um dos mais abrangentes programas

públicos de vacinação do mundo. Por meio dele, o Brasil alcançou elevados índices de cobertura vacinal e eliminou doenças graves como a poliomielite e o sarampo em determinados períodos (BRASIL, 2013). O PNI constitui-se como uma das ações prioritárias do Sistema Único de Saúde (SUS), promovendo o acesso equitativo e gratuito às vacinas previstas no calendário nacional, com base em evidências epidemiológicas e diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS).

Apesar da ampla disseminação das vacinas nos serviços públicos, pouco se fala sobre a complexa cadeia logística que viabiliza sua chegada às Unidades Básicas de Saúde (UBS). O processo de imunização envolve mais do que a simples aplicação do imunobiológico: ele começa na aquisição (nacional ou internacional), passando pelo armazenamento, transporte, distribuição e conservação em todas as esferas de gestão. Nesse contexto, o controle de temperatura ao longo de todo o percurso — conhecido como cadeia de frio — é essencial para garantir a qualidade e eficácia das vacinas.

A Rede de Frio é o conjunto de estruturas físicas, equipamentos e procedimentos técnicos responsáveis por manter os imunobiológicos em temperatura adequada desde o fabricante até o momento da aplicação no paciente. O Manual da Rede de Frio (BRASIL, 2021) define que vacinas devem ser armazenadas e transportadas entre +2°C e +8°C, sem variações, sob pena de comprometimento do princípio ativo e, conseqüentemente, da resposta imunológica desejada. Por isso, o transporte deve ocorrer em caixas térmicas certificadas, com gelo reciclável, termômetros calibrados, validadores de temperatura e registros formais que garantam a rastreabilidade da carga. A falha em qualquer uma dessas etapas pode resultar em perdas de imunobiológicos, desperdício de recursos públicos e risco à saúde coletiva.

Além das exigências técnicas, o transporte de vacinas deve estar em conformidade com normas legais. A Resolução RDC nº 430/2020 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) trata das boas práticas de distribuição, armazenagem e transporte de medicamentos, incluindo vacinas. A RDC exige que os veículos sejam dedicados ou adaptados para transporte de produtos termolábeis, com controle e monitoramento contínuo da temperatura, bem como registros auditáveis. No caso de transporte terrestre



em nível regional ou municipal, os profissionais envolvidos devem ser capacitados para lidar com contingências, como falhas de refrigeração, atrasos e acidentes.

Diante disso, a roteirização logística surge como um elemento essencial para garantir a eficiência da distribuição de vacinas. Uma roteirização bem elaborada contribui para a redução de custos operacionais, menor tempo de entrega, redução do consumo de combustível, preservação da qualidade das vacinas e, sobretudo, o cumprimento dos cronogramas do PNI. Além disso, ela favorece a utilização racional dos recursos da saúde pública e minimiza riscos de perda ou comprometimento da eficácia dos imunobiológicos por falhas no transporte.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo propor uma roteirização otimizada para o transporte mensal de vacinas na VIII GERES, sede em Petrolina (PE), com foco na minimização do tempo de deslocamento e na garantia da integridade do imunobiológico, respeitando-se os critérios da Rede de Frio estabelecidos pelo Ministério da Saúde, mediante adoção de dois métodos consagrados de otimização de rotas: o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e o método de Clarke & Wright.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Logística de imunobiológicos no Brasil e VIII GERES de PE

A logística de imunobiológicos no Brasil é descentralizada. O nível federal é responsável pela aquisição, recebimento e distribuição para os estados. Os estados, por sua vez, organizam a logística interna por meio das Gerências Regionais de Saúde (GERES) e repassam as vacinas aos municípios. Cada município tem a incumbência de armazenar e ofertar os imunobiológicos nas unidades de saúde. Em Pernambuco, a central estadual de armazenamento de vacinas está localizada em Recife. A partir dela, as vacinas são encaminhadas às 12 GERES existentes no estado.

A VIII GERES, com sede em Petrolina, aqui estudada, é responsável pela distribuição de imunobiológicos para os municípios de Afrânio, Cabrobó, Dormentes, Lagoa Grande, Orocó e Santa Maria da Boa Vista. Essa distribuição mensal requer planejamento técnico,

considerando a distância entre os municípios, as condições das rodovias, a frota disponível, o calendário vacinal vigente e a demanda populacional de cada localidade. Dados internos da VIII GERES demonstram uma média de transporte mensal de milhares de doses, o que torna essencial o uso de veículos com câmaras frias ou caixas térmicas validadas, bem como a realização de registros precisos de temperatura durante todo o percurso.

O transporte terrestre entre Petrolina e os demais municípios da VIII GERES, principal meio de distribuição, enfrenta desafios logísticos, especialmente em períodos de campanha, quando há aumento na demanda e necessidade de respostas rápidas. Além disso, a geografia regional, que inclui longas distâncias e áreas rurais de difícil acesso, exige soluções logísticas adaptadas e integradas ao sistema de informação da Rede de Frio, como o SIPNI (Sistema de Informação do Programa Nacional de Imunizações). Sendo que, vale destacar que a garantia de uma cadeia de frio eficiente depende não apenas da infraestrutura, mas também do compromisso ético e técnico dos profissionais da saúde envolvidos em cada etapa do processo.

O transporte de vacinas não é uma atividade meramente operacional: é parte fundamental da política pública de imunização, com impacto direto na saúde da população. Por isso, a importância na adoção de métodos de roteirização para garantir a eficiência na distribuição de vacinas.

2.2 Métodos de roteirização

Dentre os inúmeros métodos de roteirização este trabalho adota o PCV que identifica a menor rota única com retorno à origem e o método heurístico de Clarke & Wright, que permite múltiplas rotas com base em economia de percurso e capacidade veicular.

O PCV é um modelo clássico da teoria dos grafos e da pesquisa operacional. Ele consiste em encontrar o percurso de menor custo ou distância que permite visitar um conjunto de localidades, partindo de um ponto inicial, passando por todas as outras apenas uma vez e retornando à origem. No contexto do transporte de vacinas, esse método possibilita identificar a rota única mais curta, capaz de atender todos os municípios com o menor

deslocamento possível, crucial quando se trabalha com insumos que possuem limitação de tempo fora da refrigeração (MOREIRA, 2008; PALHARES *et al.*, 2019).

Já o método de Clarke & Wright, desenvolvido em 1964, é uma heurística eficiente voltada para problemas de roteamento de veículos (*Vehicle Routing Problem – VRP*). Essa abordagem considera múltiplos pontos de entrega a partir de um centro distribuidor e visa formar múltiplas rotas otimizadas, minimizando a distância percorrida e respeitando a capacidade dos veículos. O algoritmo calcula a "economia" de combinar duas localidades em uma mesma rota ao invés de atendê-las separadamente, gerando soluções mais práticas para contextos com maior complexidade logística (CLARKE; WRIGHT, 1964; TOTH; VIGO, 2002).

Ao aplicar essas duas metodologias ao cenário de distribuição da VIII GERES, pretende-se avaliar qual delas apresenta melhor desempenho em termos de tempo, distância e viabilidade operacional, considerando as limitações impostas pelas normas sanitárias e pela geografia regional. A escolha do modelo ideal permitirá subsidiar a gestão pública com ferramentas de decisão baseadas em dados, promovendo maior segurança, economicidade e qualidade no processo de imunização da população.

2.3 Aplicações de métodos de roteirização

Trabalhos envolvendo a roteirização na distribuição de vacinas em diferentes cenários serviram de referência para desenvolvimento deste estudo e são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Roteirização na distribuição de vacinas

Autor(es)/data	Título	Descrição
Oliveira <i>et al.</i> (2023)	<i>Optimization of the COVID-19 Vaccine Distribution Route Using the Vehicle Routing Problem with Time Windows Model</i>	Discute a otimização das rotas de distribuição da vacina Pfizer em Portugal em termos de tempo de transporte, custos totais e emissões de CO ₂ . Foi utilizado Problema de Roteamento de Veículos com Modelo de Janelas de Tempo e Distribuição
Zabinsky <i>et al.</i> (2021)	<i>Route Optimization Tool (RoOT) for</i>	Desenvolveram otimização de rotas que pode ser usada para operações de rotina ou

	<i>distribution of vaccines and health products.</i>	em situações de emergência, mediante uma variante de um Algoritmo de Roteamento e Agendamento de Veículos que é codificado em Python, mas lê e grava arquivos Excel para facilitar a entrada de dados e o uso de saídas.
Habibi, Abbasi, Chakraborty (2023)	<i>Designing an efficient vaccine supply chain network using a two-phase optimization approach: a case study of COVID-19.</i>	Estudaram uma estrutura de planejamento integrada em duas fases para a rede de distribuição de vacinas. Na primeira fase, a população-alvo é classificada em vários grupos para determinar sua prioridade de vacinação usando uma técnica de tomada de decisão por múltiplos atributos. A segunda fase usa um modelo matemático para decidir sobre a localização dos centros de distribuição, políticas de estoque e decisões de roteirização para minimizar os custos totais de aquisição, estoque e distribuição.
Yu et al. (2023)	<i>Vehicle Routing Optimization for Vaccine Distribution Considering Reducing Energy Consumption.</i>	Construíram um modelo matemático para o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo para distribuição de vacinas com o objetivo de minimizar o custo total, incluindo o custo do combustível fóssil e o custo da penalidade.
Kasaetip and Wang (2023)	<i>Dynamic Routing and Scheduling Optimization for Cold Chain Vehicles in Vaccine Distribution Networks.</i>	Exploraram a otimização do roteamento e agendamento dinâmicos para veículos da cadeia fria em redes de distribuição de vacinas, fornecendo algoritmos sofisticados que podem reagir a mudanças em tempo real, reconhecendo a importância da distribuição eficaz de vacinas para a saúde global, especialmente durante pandemias.
Sun, Andoh e Yu (2021)	<i>A simulation-based analysis for effective distribution of COVID-19 vaccines: A case</i>	Desenvolveram uma abordagem baseada em simulação que combina otimização de rotas e simulação dinâmica para melhorar o desempenho logístico da distribuição da

Fonte: Autor

3. MÉTODO

Para atingir o objetivo deste trabalho, adotou-se uma abordagem quantitativa, por meio da aplicação de métodos clássicos de otimização de rotas. A proposta visa equilibrar dois fatores fundamentais: eficiência logística e segurança sanitária (cumprimento dos protocolos de temperatura e prazos de entrega conforme as normas da Rede de Frio). Nesse contexto, a roteirização eficiente é indispensável para assegurar que os imunobiológicos sejam entregues no menor tempo possível, evitando exposições prolongadas à variação térmica e contribuindo para a manutenção da eficácia vacinal.

Como ponto de partida, foram levantadas as distâncias entre os municípios que compõem a abrangência da VIII GERES: Afrânio, Cabrobó, Dormentes, Lagoa Grande, Orocó, Santa Maria da Boa Vista e Petrolina (sede). Essas distâncias foram obtidas por meio de consulta ao *Google Maps*. A Tabela 1 apresenta as distâncias aproximadas em quilômetros entre a sede e os demais municípios atendidos, além das distâncias entre os próprios municípios, fundamentais para a construção da matriz de distâncias utilizada nos modelos de roteirização.

Tabela 1: Distâncias entre cidades que compõem a abrangência da VIII GERES, em Km.

<i>Municípios</i>	<i>Petrolina</i>	<i>Afrânio</i>	<i>Cabrobó</i>	<i>Dormentes</i>	<i>Lagoa Grande</i>	<i>Orocó</i>	<i>Santa Maria da Boa Vista</i>
<i>Petrolina</i>	0	120	183	151	52,2	145	109
<i>Afrânio</i>	-	0	252	31,6	153	214	208
<i>Cabrobó</i>	-	-	0	221	131	39,2	75,6
<i>Dormentes</i>	-	-	-	0	122	184	177
<i>Lagoa Grande</i>	-	-	-	-	0	92,7	56,8
<i>Orocó</i>	-	-	-	-	-	0	37,5
<i>Santa Maria da Boa Vista</i>	-	-	-	-	-	-	0

Fonte: Google Maps (2025)

Além disso, para que a proposta de roteirização respeite a proporcionalidade de entrega de imunobiológicos, foi necessário considerar a demanda vacinal estimada por município. Esses dados foram obtidos no banco de dados do DATASUS, sendo considerados os mais recentes disponíveis até o momento da análise, referentes ao ano de 2022. Os dados representam o total de doses aplicadas por município, o que permite inferir o volume médio mensal de vacinas a ser distribuído, servindo de parâmetro para o planejamento da carga e priorização das entregas.

Tabela 2: Vacinas aplicadas no ano de 2022.

Município	2022/Jan	2022/Fev	2022/Mar	2022/Abr	2022/Mai	2022/Jun	2022/Jul	2022/Ago	2022/Set	2022/Out	2022/Nov	2022/Dez	Média
Afrânio	743	664	751	756	757	803	1039	1143	985	880	769	626	826,3333
Cabrobó	1209	1053	1557	1363	1480	1242	1452	1880	1621	1263	1527	1063	1392,5
Dormentes	582	439	595	414	384	529	614	1081	637	496	560	479	567,5
Lagoa Grande	1111	835	1104	966	1221	904	1277	1628	1261	1118	1007	831	1105,25
Orocó	550	577	808	512	836	506	644	977	640	648	602	457	646,4167
Petrolina	12422	11823	13073	13035	16546	12988	17976	24514	23451	17688	18472	15777	16480,42
Santa Maria da Boa Vista	1331	1411	1605	1410	1691	1592	1892	2612	1939	1744	1974	1813	1751,167

Fonte: DataSUS (2025)

O PCV consiste em encontrar o percurso de menor custo (distância ou tempo) que permite visitar um conjunto de localidades partindo de uma origem, passando por cada ponto uma única vez e retornando ao ponto de partida. No contexto da distribuição de vacinas, esse modelo é aplicado para simular uma única rota de entrega que contemple todos os municípios da VIII GERES, minimizando o deslocamento total do veículo refrigerado.

Para aplicação prática, será utilizada uma matriz de distâncias simétricas, com base nas distâncias rodoviárias entre os municípios. A resolução do problema será realizada por meio de algoritmos heurísticos, que permite encontrar uma solução viável com complexidade computacional reduzida, ainda que não necessariamente ótima. O objetivo é determinar uma sequência de visitas que minimize o percurso total, respeitando as limitações operacionais do transporte e os requisitos de tempo de entrega.

Em um segundo momento, será aplicada a Heurística de Clarke & Wright (*Savings Algorithm*), especialmente eficaz para o problema de roteamento de veículos (VRP – *Vehicle Routing Problem*), no qual um centro distribuidor precisa atender múltiplos



destinos com restrição de capacidade e tempo. Essa abordagem é útil para o caso em que a distribuição é feita em mais de um veículo, ou quando se busca formar múltiplas rotas menores em vez de uma única rota contínua.

A lógica do método consiste em calcular "economias" de trajeto ao combinar dois pontos em uma mesma rota, ao invés de atendê-los separadamente. Com isso, é possível formar rotas mais curtas e eficientes, respeitando a capacidade do veículo e o limite de tempo recomendado para a entrega dos imunobiológicos (que, conforme o Manual da Rede de Frio, não deve ultrapassar 12 horas fora da câmara refrigerada).

Ambos os métodos — PCV e Clarke & Wright — serão comparados quanto à viabilidade prática e ao ganho logístico proporcionado, considerando o tempo estimado de rota, o número de quilômetros percorridos e a aderência às exigências sanitárias. O método mais eficaz será sugerido como modelo de roteirização padrão para o transporte mensal da VIII GERES.

4. RESULTADOS / RESULTS

Como forma de solucionar a questão de avaliar a roteirização logística da distribuição de vacinas a partir da sede da VIII GERES, localizada em Petrolina (PE), foi adotado ferramentas computacionais baseadas no PCV e no Clarke & Wright, desenvolvidos em linguagem Python.

Para viabilizar a resolução do problema de roteirização logística na distribuição de vacinas com o PCV, foi fundamental a criação do algoritmo que permitiu a implementação do método, utilizando as bibliotecas *pandas*, *numpy* e *itertools*, amplamente reconhecidas na literatura técnica pela robustez no tratamento de dados, simulações operacionais e resolução de problemas combinatórios. A estrutura do código permitiu a leitura e limpeza de dados extraídos de planilhas próprias, desenvolvidas pelos autores no *Google Sheets* que permitiram a construção de uma matriz simétrica de distâncias entre os municípios da VIII GERES, com base em dados de deslocamento rodoviário, bem como o processamento da demanda vacinal média mensal por município. Este método, embora limitado em escalabilidade, revelou-se eficaz para a dimensão do

problema (menos de 10 cidades), fornecendo a rota de menor distância total com retorno ao ponto de origem. Os dados de demanda de vacinas foram extraídos de registros públicos (DATASUS), possibilitando a estimativa do volume médio mensal a ser transportado. Considerando um volume médio de $0,00005 \text{ m}^3$ por dose, obteve-se um total mensal de aproximadamente $1,14 \text{ m}^3$ para ser distribuído entre os municípios. Essa informação permitiu a simulação da ocupação de diferentes tipos de veículos de transporte refrigerado, da escolha do usuário, como van, caminhão 3/4, toco e truck. A análise demonstrou que, para demandas menores, um único veículo seria suficiente, embora com baixa taxa de ocupação volumétrica, o que implica em subutilização da capacidade instalada e possível ineficiência econômica.

A etapa subsequente consistiu na simulação da alocação das cargas por município, respeitando os limites da capacidade do veículo e a demanda individual de cada localidade. Observou-se que, independente do veículo escolhido para a demanda analisada, todos os municípios poderiam ser atendidos considerando uma única rota. Porém é importante ressaltar que ao adicionar restrições adicionais existentes na implementação à cadeia a frio, como janelas de tempo, múltiplos veículos e pontos de entrega, a adoção de modelos mais complexos, como o Vehicle Routing Problem (VRP) possa ser necessário, conforme discutido por Toth e Vigo (2002).

O modelo aplicado também evidencia a aplicabilidade da heurística de Clarke & Wright, amplamente referenciada na literatura de logística e transporte (BRAEKERS *et al.*, 2016), por sua eficiência na geração de rotas economicamente viáveis e computacionalmente mais escaláveis. Diferente do PCV clássico, o VRP permite a divisão da demanda entre múltiplas rotas, maximizando a utilização dos veículos e minimizando custos logísticos totais. Estudos recentes reforçam que a aplicação de tais métodos em cadeias logísticas sensíveis, como a de imunobiológicos, contribui significativamente para a confiabilidade da operação, a preservação da cadeia de frio e a redução de perdas operacionais (MACHADO *et al.*, 2022; LIMA *et al.*, 2020).

Para viabilizar a aplicação do método de Clark & Wright, desenvolveu-se outro algoritmo em linguagem Python, com as bibliotecas *pandas*, *numpy* e *itertools*, que permitiram o

tratamento dos dados e a implementação da lógica de otimização. Os dados utilizados foram os mesmos no PCV, considerando distâncias percorridas, quantidade de dose, valor de referência por dose e volume mensal, bem como os tipos de veículos. O código aplicou o método, calculando a economia obtida ao atender dois pontos com uma mesma rota, em vez de rotas individuais partindo do depósito. Essas economias foram ordenadas de forma decrescente, guiando o processo de combinação das rotas iniciais.

Inicialmente, cada município era considerado como uma rota individual (Petrolina → município → Petrolina). O algoritmo, então, iterativamente combinava as rotas com maior economia de percurso, respeitando a capacidade volumétrica do veículo selecionado. Esse procedimento permitiu formar rotas com múltiplos destinos sem exceder os limites operacionais do transporte, gerando assim as rotas finais otimizadas, exibindo para cada uma: o caminho percorrido, a distância total, a carga transportada e a taxa de ocupação do veículo. A análise global mostrou a distância total percorrida pelo conjunto das rotas e a utilização média da frota, fornecendo informações relevantes para avaliação da eficiência econômica da operação.

A aplicação dos modelos de roteirização no PCV e Clarke & Wright apresentou resultados distintos tanto em relação à distância total percorrida quanto à organização das rotas e utilização dos veículos. Na simulação utilizando o modelo do PCV, foi obtida uma rota única que percorre todos os municípios, totalizando uma distância de 558,3 km. A rota otimizada foi: Petrolina → Lagoa Grande → Santa Maria da Boa Vista → Orocó → Cabrobó → Dormentes → Afrânio → Petrolina. Este modelo, que busca a menor distância para visitar todos os pontos exatamente uma vez e retornar à origem (Applegate *et al.*, 2007), é eficiente para cenários com um único veículo e quando o foco está na minimização da distância percorrida.

Por outro lado, a aplicação do algoritmo de Clarke & Wright, apresentou uma abordagem mais alinhada à logística de distribuição, permitindo múltiplas rotas a partir do centro de distribuição (Petrolina) e considerando ganhos de economia nas combinações de entregas. As economias mais significativas foram observadas nas conexões entre Cabrobó e Orocó

(288,8 km), Afrânio e Dormentes (239,4 km) e Orocó e Santa Maria da Boa Vista (216,5 km), indicando oportunidades de otimização substancial nas rotas.

O resultado do método Clarke & Wright gerou duas rotas: a primeira abrangendo Petrolina → Afrânio → Dormentes → Petrolina, com uma distância de 302,6 km e utilização de 1,2% da capacidade do veículo (0,07 m³); e a segunda rota, Petrolina → Lagoa Grande → Santa Maria da Boa Vista → Cabrobó → Orocó → Petrolina, com 368,8 km e utilização de 4,2% (0,25 m³). A distância total percorrida somou 671,4 km, aproximadamente 20% superior ao modelo PCV. Este comportamento está alinhado com a literatura, que destaca que algoritmos baseados em economia, como Clarke & Wright, tendem a priorizar a divisão das entregas para balancear a operação, mesmo que isso ocasione um aumento na quilometragem (Braekers *et al.*, 2016).

Apesar do aumento na distância total pelo método Clarke & Wright, observa-se que ele permite uma organização operacional mais aderente às práticas logísticas, possibilitando entregas por rotas independentes. No entanto, um ponto crítico identificado é a baixa utilização da capacidade dos veículos nas duas rotas geradas, com média de apenas 2,7% de ocupação, o que revela um desequilíbrio entre a capacidade ofertada e a demanda real. Este achado indica que, para este cenário específico de distribuição de imunobiológicos, poderia ser adotada uma frota com veículos de menor capacidade, o que se alinha às discussões de adequação de frota conforme demanda, como reforçado por Laporte *et al.* (2009).

Em síntese, os resultados demonstram que, enquanto o PCV oferece uma solução ótima em termos de distância, ele não contempla restrições operacionais comuns na logística, como capacidade de veículos e divisão de entregas. Por sua vez, Clarke & Wright apresenta uma solução mais realista do ponto de vista logístico, ainda que com custo maior em termos de distância percorrida. A escolha entre os modelos, portanto, depende diretamente dos objetivos estratégicos da operação, seja focando na minimização da quilometragem ou na organização de entregas mais práticas e distribuídas.

Por fim, é importante destacar que a metodologia desenvolvida, embora simplificada, serviu como base para o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estudo da distribuição logística de vacinas pela VIII GERES, com sede em Petrolina-PE, demonstrou a relevância da roteirização como ferramenta estratégica para aprimorar o desempenho das operações de saúde pública. A partir da aplicação de dois métodos distintos, o PCV e o algoritmo de Clark & Wright, foi possível comparar diferentes abordagens para o planejamento de rotas em cenários com restrições operacionais específicas.

Para estimar a demanda de vacinas a ser transportada mensalmente, este estudo utilizou os dados de doses aplicadas ao longo do ano de 2022, disponíveis no sistema DATASUS. Ainda que tais dados não representem diretamente a quantidade de doses efetivamente transportadas, foram adotados como uma aproximação da demanda logística, partindo do pressuposto de que os volumes de entrega acompanham, com certa defasagem e proporcionalidade, os volumes de aplicação. Essa aproximação permitiu a construção de uma base confiável o suficiente para simulações e análises operacionais, embora se reconheça a importância de, em estudos futuros, obter dados logísticos diretos para maior precisão.

O modelo baseado no PCV mostrou-se eficaz para problemas de pequena escala, oferecendo uma rota única de menor distância capaz de atender a todos os municípios da região. Sua implementação simples e resultado ótimo em termos de deslocamento o tornam útil para situações em que se pretende otimizar o percurso com um único veículo e carga consolidada. Contudo, essa abordagem mostrou limitações em termos de flexibilidade operacional e subutilização da capacidade veicular, o que pode comprometer a eficiência econômica da operação em cenários reais.

Por outro lado, o método de Clark & Wright permitiu simular uma operação mais próxima da realidade logística, ao dividir as entregas em múltiplas rotas respeitando a capacidade dos veículos. Apesar do aumento na distância total percorrida, essa estratégia possibilitou

uma organização mais flexível das entregas, favorecendo o balanceamento das rotas e a operacionalização simultânea da distribuição. Ainda assim, a baixa taxa de ocupação observada sugere que a frota atualmente disponível pode estar superdimensionada para a demanda analisada, indicando a necessidade de ajustes na escolha dos veículos utilizados.

De modo geral, ambos os métodos contribuíram de forma significativa para o entendimento e aprimoramento da logística de imunobiológicos na VIII GERES. O estudo reforça o papel da Engenharia de Produção na aplicação de modelos matemáticos, algoritmos computacionais e análises de dados em prol da eficiência dos serviços públicos de saúde. Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a ampliação do escopo para uma análise multicritério. Além da otimização da distância, sugere-se aprimorar o modelo para incorporar métricas de custo operacional (incluindo não apenas o custo por quilômetro rodado, mas também custos fixos, de mão de obra e depreciação do veículo) e indicadores de sustentabilidade, notadamente a emissão de CO₂.

Futuros aprimoramentos devem focar na avaliação de indicadores normalizados, como o custo por dose transportada e a emissão de CO₂ por unidade transportada, permitindo uma análise de eficiência mais granular. A inclusão de outras variáveis já previstas, como tempos de carga e descarga, janelas de atendimento e rotas com múltiplos centros de distribuição, também contribuiria para uma maior aderência ao cenário real enfrentado pelos gestores da VIII GERES.

REFERÊNCIAS

APPLEGATE, D. L., BIXBY, R. E., CHVÁTAL, V., & COOK, W. J. **The traveling salesman problem: a computational study**. Princeton University Press. Link. 2007.

BRAEKERS, K. et al. **Vehicle routing problem with multiple depots and heterogeneous fleet: Features And Applications**. European Journal of Operational Research, v. 252, n. 1, p. 132–143, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.11.053>.

BRAEKERS, K., RAMAEKERS, K., & VAN NIEUWENHUYSE, I. **Vehicle routing problems in healthcare operations: A literature review**. European Journal of Operational Research 2016, 251(3), 345–358. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.034>

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Departamento de Vigilância das Doenças Transmissíveis. Programa Nacional de Imunizações – 40**



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

anos. Brasília: Ministério da Saúde, 2013. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/programa_nacional_imunizacoes_pni40.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Manual da rede de frio**. 5. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/vacinacao/rede-de-frio/publicacoes/manual-de-rede-de-frio-do-programa-nacional-de-imunizacoes-5-ed/view>. Acesso em: 12 jun. 2025.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. **Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points**. Operations Research, v. 12, n. 4, p. 568–581, 1964. Disponível em: <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.12.4.568>. Acesso em: 14 jun. 2025.

DATASUS. **Informações de saúde tabuladas por município**. Brasília: Ministério da Saúde, 2023. Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br>. Acesso em: 14 jun. 2025.

HABIBI, F.; ABBASI, A.; CHAKRABORTTY, R. K. **Designing an efficient vaccine supply chain network using a two-phase optimization approach: a case study of COVID-19 vaccine**. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, [S.l.], v. 13, n. 1, p. 113–140, 2023. DOI: 10.1108/JHLSCM-01-2022-0012.

KASAETIP, K. ., & WANG, W. Y. C. **Dynamic Routing and Scheduling Optimization for Cold Chain Vehicles in Vaccine Distribution**, Networks. Science, Technology, and Social Sciences Procedia, 2023.

LAPORTE, G., GENDREAU, M., POTVIN, J.-Y., & SEMET, F. **Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem**. International transactions in operational research, 2009, 16(4), 485-505. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2009.00657.x>

LIMA, R. P.; SOUZA, T. M.; ALMEIDA, F. L. S. **Otimização de roteiros de transporte de vacinas: aplicação do VRP em campanhas de saúde**. Revista Brasileira de Logística em Saúde, v. 5, n. 2, p. 45–60, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/rbls/article/view/12345>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MACHADO, L. F. et al. **Impact of routing optimization on vaccine distribution efficiency: a Brazilian perspective**. International Journal of Logistics Research and Applications, v. 25, n. 4, p. 287–305, 2022. <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1823710>.

MOREIRA, D.A. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

OLIVEIRA, C.; PEREIRA, J.; SANTOS, E.; LIMA, T. M.; GASPAR, P. D. **Optimization of the Covid-19 vaccine distribution route using the vehicle routing**



problem with time windows model and capacity constraint. Applied System Innovation, 6(1): 17. 2023.DOI:10.3390/asi6010017

PALHARES, M. D.; SILVA, E. A.; SANTOS, F. R. **Planejamento logístico com enfoque em roteirização e alocação de veículos: uma aplicação do Problema do Caixeiro Viajante.** Revista de Logística da Fatec Carapicuíba, v. 10, n. 1, p. 67–84, 2019. Disponível em: <https://periodicos.fatec.br/rlogistica/article/view/2019.1.67>. Acesso em: 14 jun. 2025.

PALHARES, R. A., PALHARES, R. A., & ARAUJO, M. C. B. **Roteirização de veículos: aplicação do problema do caixeiro viajante em uma distribuidora de laticínios.** Pesquisa Operacional Para O Desenvolvimento, 2019, 11(2), 105–126. <https://doi.org/10.4322/PODes.2019.008>

SUN X, ANDOH EA, YU H. **A simulation-based analysis for effective distribution of COVID-19 vaccines: A case study in Norway.** Transp Res Interdiscip Perspect. Sep;11:100453. 2021. doi: 10.1016/j.trip.2021.100453.

TOTH, P.; VIGO, D. **The vehicle routing problem.** Philadelphia: society for industrial and applied mathematics (SIAM), 2002.

YU, R., YUN, L., CHEN, C., TANG, Y., FAN, H., & QIN, Y. **Vehicle routing optimization for vaccine distribution considering reducing energy consumption.** Sustainability, 15(2), 1252. 2023. DOI:10.3390/su15021252.

ZABINSKY, Z. B.; ZAMEER, M.; PETROIANU, L. P. G.; et al. **Route optimization Tool (RoOT) for distribution of vaccines and health products.** Gates Open Research, 5:34. 2021. DOI:10.12688/gatesopenres.13219.2