v7.n6.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

TRANSPETRO ROTA FÁCIL: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM SISTEMA WEB DE APOIO À DECISÃO LOGÍSTICA PARA GESTÃO DE PEÇAS SOBRESSALENTES EM DUTOS

TRANSPETRO ROTA FÁCIL: DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A WEB-BASED LOGISTICS DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PIPELINE SPARE PARTS MANAGEMENT

TRANSPETRO ROTA FÁCIL: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA WEB DE APOYO A LA DECISIÓN LOGÍSTICA PARA LA GESTIÓN DE REPUESTOS EN DUCTOS

Anderson Gonçalves Portella[1], Robson Ferreira de Souza[2], Carlos Francisco Simões Gomes[3], Marcos dos Santos[3]

e768342
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8342

PUBLICADO: 06/2026

RESUMO

A manutenção de equipamentos críticos em infraestrutura de dutos exige que peças sobressalentes estejam disponíveis em locais de armazenamento capazes de atender emergências dentro de janelas de tempo predefinidas. Na Transpetro, maior operadora de dutos e terminais do Brasil, o critério operacional para selos de bombas mecânicas estabelece tempo máximo de deslocamento rodoviário de 2 horas e 30 minutos entre o terminal de armazenamento e o terminal demandante. Contudo, não havia sistema formal capaz de verificar se os terminais designados atendiam a esse critério. Este artigo apresenta o Transpetro Rota Fácil, um sistema web desenvolvido em Python/Streamlit que integra duas APIs de roteamento, OpenRouteService e Google Maps Distance Matrix API, para calcular distâncias e tempos de deslocamento rodoviário real entre unidades operacionais. Desenvolvido segundo a *Design Science Research Methodology* (DSRM), o artefato foi aplicado a dados reais da Transpetro: analisou aproximadamente 30 pares de rotas, identificou 2 terminais não conformes ao critério de 150 minutos e resultou no redirecionamento formal do armazenamento para terminais adequados, com validação gerencial documentada. A solução estabeleceu precedente para verificação sistemática de conformidade logística de outros materiais críticos da empresa. O *software* está registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) e disponível como código aberto.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de apoio à decisão. Logística de dutos. Peças sobressalentes. Tempo de deslocamento. *OpenRouteService*.

ABSTRACT

The maintenance of critical equipment in pipeline infrastructure requires spare parts to be stored at locations capable of meeting emergencies within predefined time windows. At Transpetro, Brazil's largest pipeline and terminal operator, the operational criterion for mechanical pump seals establishes a maximum road travel time of 2 hours and 30 minutes between the storage terminal and the requesting terminal. However, no formal system existed to verify whether designated storage terminals met this criterion. This paper presents Transpetro Rota Fácil, a web-based system developed in Python/Streamlit that integrates two routing APIs, OpenRouteService and Google Maps Distance Matrix API, to calculate real road distances and travel times between operational units.

[1] Universidade Federal Fluminense (UFF), Doutorando em Engenharia de Produção.
[2] Instituto Militar de Engenharia (IME), Mestrando em Engenharia de Transporte.
[3] Universidade Federal Fluminense (UFF), Doutor em Engenharia de Produção.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Developed according to the Design Science Research Methodology (DSRM), the artifact was applied to real Transpetro data: it analyzed approximately 30 route pairs, identified 2 non-compliant terminals, and resulted in the formal redirection of storage to compliant terminals, with documented managerial validation. The solution established a precedent for systematic logistical compliance verification of other critical materials. The software is registered with Brazil's National Institute of Industrial Property (INPI) and available as open source.

KEYWORDS: *Decision support system. Pipeline logistics. Spare parts. Travel time. OpenRouteService.*

RESUMEN
El mantenimiento de equipos críticos en infraestructura de ductos exige que las piezas de repuesto estén disponibles en lugares de almacenamiento capaces de atender emergencias dentro de ventanas de tiempo predefinidas. En Transpetro, el mayor operador de ductos y terminales de Brasil, el criterio operativo para los sellos de bombas mecánicas establece un tiempo máximo de desplazamiento por carretera de 2 horas y 30 minutos entre el terminal de almacenamiento y el terminal demandante. Sin embargo, no existía ningún sistema formal capaz de verificar si los terminales designados cumplían con este criterio. Este artículo presenta Transpetro Rota Fácil, un sistema web desarrollado en Python/Streamlit que integra dos API de enrutamiento, OpenRouteService y Google Maps Distance Matrix API, para calcular distancias y tiempos reales de desplazamiento por carretera. Desarrollado según la Design Science Research Methodology (DSRM), el artefacto fue aplicado a datos reales de Transpetro: analizó aproximadamente 30 pares de rutas, identificó 2 terminales que incumplían el criterio de 150 minutos y resultó en la redirección formal del almacenamiento, con validación gerencial documentada. La solución estableció un precedente para la verificación sistemática del cumplimiento logístico de otros materiales críticos. El software está registrado en el INPI y disponible como código abierto.

PALABRAS CLAVE: *Sistema de apoyo a la decisión. Logística de ductos. Piezas de repuesto. Tiempo de desplazamiento. OpenRouteService.*

1. INTRODUÇÃO

Infraestruturas críticas de dutos operam sob pressão permanente de confiabilidade. Uma falha em uma bomba de transferência, se não atendida dentro de janelas de tempo precisas, pode interromper o escoamento de combustíveis e gerar impactos operacionais, ambientais e financeiros significativos. Em contextos de manutenção de emergência, a disponibilidade de peças sobressalentes no local certo e no tempo certo é um problema de decisão logística que deve ser resolvido na etapa de planejamento do armazenamento, e não no momento da ocorrência.

A Transpetro, Petrobras Transporte S.A., é responsável pelo maior sistema de dutos e terminais do Brasil, operando mais de 7.000 km de dutos e dezenas de terminais distribuídos ao longo do território nacional. Para selos de bombas mecânicas, componentes sujeitos a desgaste

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

e substituição emergencial, o critério operacional vigente estabelece que o terminal de armazenamento deve ser capaz de suprir o terminal demandante em até 150 minutos de deslocamento rodoviário. Este limiar representa uma restrição logística objetiva: ultrapassá-lo implica risco de indisponibilidade operacional do equipamento.

O problema central que motiva este trabalho é a ausência de um sistema formal capaz de verificar, de forma sistemática e documentada, se os terminais designados para armazenamento de selos mecânicos atendiam ao critério de 150 minutos. Sem esse instrumento, a conformidade logística dependia de consultas manuais não sistematizadas, tornando impossível uma avaliação periódica e abrangente da cobertura de atendimento emergencial. Lacunas similares têm sido identificadas na literatura de *spare parts management* em infraestruturas de transporte críticas (MOUSCHOUTZI; PONIS, 2022), em que a ausência de ferramentas formais de verificação contribui para vulnerabilidades operacionais não detectadas (GARCÍA-BENITO; MARTÍN-PEÑA, 2021).

A justificativa para o desenvolvimento de uma ferramenta específica reside em três fatores: (i) a inexistência de soluções institucionalizadas para esse tipo de verificação no setor de dutos brasileiro; (ii) a viabilidade técnica e econômica de integrar APIs de roteamento de alta precisão em sistemas *web* acessíveis a gestores sem *expertise* em programação, conforme demonstrado em contextos logísticos reais (LJUBOTINA *et al.*, 2025; GÖKDAĞ *et al.*, 2025), e (iii) o potencial de replicação do protocolo para outros materiais e sistemas críticos da empresa, amplificando o impacto da solução além do caso original.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar o desenvolvimento, a arquitetura técnica e a aplicação prática do Transpetro Rota Fácil: um sistema web desenvolvido em *Python* com o *framework Streamlit*, que integra duas APIs de cálculo de rotas para verificar a conformidade logística de terminais de armazenamento em redes de dutos.

Como objetivos específicos, o trabalho visa: (i) descrever a arquitetura técnica do sistema e seus mecanismos de robustez para processamento em lote; (ii) aplicar o sistema a um conjunto real de terminais Transpetro para verificação do critério de 150 minutos para selos de bombas mecânicas; (iii) documentar a decisão gerencial resultante e o precedente institucional estabelecido; e (iv) disponibilizar o sistema como código aberto com registro formal de propriedade intelectual no INPI.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Manutenção de dutos e gestão de peças sobressalentes

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A gestão de manutenção em sistemas de dutos é reconhecida como um campo de alta complexidade operacional, no qual se articulam diferentes metodologias de manutenção voltadas à confiabilidade, à segurança e à disponibilidade dos ativos (NARANJO *et al.*, 2022). Bombas de transferência são componentes críticos nesses sistemas, e os selos mecânicos figuram entre os itens de maior taxa de substituição por falha progressiva. A gestão eficaz do estoque de peças de sobressalentes para esses componentes, denominada na literatura de *spare parts management*, é uma dimensão estratégica da confiabilidade operacional de dutos.

Em infraestruturas de transporte marítimo e industrial, revisões sistemáticas recentes identificam que a logística de peças sobressalentes enfrenta desafios persistentes relacionados à previsão de demanda, à definição de pontos de armazenamento e à verificação de conformidade com critérios de tempo de resposta (MOUSCHOUTZI; PONIS, 2022). Modelos de apoio à decisão para seleção e gestão de *spare parts* têm incorporado progressivamente abordagens multicritério e orientadas por dados (CARDEAL *et al.,* 2023), refletindo a crescente complexidade das redes industriais.

2.2. Localização de estoques e roteamento em redes de serviço

A localização de estoques de peças sobressalentes em redes de serviço de emergência é um problema clássico de pesquisa operacional, frequentemente abordado sob os paradigmas de *facility location* e *inventory routing* (KENNEDY; PATTERSON; FREDENDALL, 2002; MINNER, 2003). Trabalhos mais recentes integram planejamento de rotas com decisões de manutenção multiperiódica, reconhecendo a interdependência entre alocação de estoques e cobertura logística (PHAM; KIESMULLER, 2022). Modelos de localização em múltiplos níveis para redes de manutenção têm demonstrado que a consideração explícita de restrições de tempo de deslocamento melhora significativamente a cobertura de atendimento emergencial (LI *et al.*, 2023).

No entanto, a maior parte dos modelos da literatura trata o tempo de deslocamento como parâmetro estimado, via distância euclidiana ou Manhattan, e não como variável verificada por roteamento real sobre a malha viária (DO REGO; DE MESQUITA, 2011). Em contextos industriais com terminais geograficamente distribuídos, essa simplificação pode introduzir erros significativos. Modelos de roteamento para estoques com demanda estocástica avançaram na representação da incerteza (ACHAMRAH *et al.*, 2022), mas raramente incorporam a verificação empírica dos tempos de deslocamento reais por API de roteamento.

2.3. Sistemas de apoio à decisão com APIs de roteamento

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sistemas de apoio à decisão (SAD) aplicados à logística têm evoluído com a disponibilização de APIs de roteamento de alta precisão. O *OpenRouteService* (ORS), desenvolvido pelo *Heidelberg Institute for Geoinformation Technology*, oferece acesso gratuito ao cálculo de rotas rodoviárias baseado no grafo *OpenStreetMap*, com suporte a múltiplos perfis de veículo e parâmetros configuráveis (NEIS; ZIPF, 2012). A *Google Maps Distance Matrix API* fornece tempos de deslocamento baseados em dados históricos de tráfego, com maior precisão para ambientes urbanos densos (GOOGLE, 2024).

Aplicações recentes do ORS cobrem desde otimização de rotas sustentáveis para análise de redes de transporte (CALLEJAS-MOLINA *et al.*, 2025) até construção de matrizes de distância para problemas de coleta e entrega urbana (GÖKDAĞ *et al.*, 2025; LJUBOTINA *et al.*, 2025). No contexto brasileiro, a *Google Maps Distance Matrix API* foi empregada com sucesso em problemas de *facility location* para gestão de resíduos no Paraná (DE BARROS FRANCO *et al.*, 2021), demonstrando a viabilidade de APIs de roteamento comerciais em contextos de infraestrutura real.

A janela de tempo como critério de conformidade logística também tem ganho atenção em trabalhos sobre manutenção integrada com restrições de tempo de resposta para peças sobressalentes (LI *et al.*, 2025) e em modelos de redistribuição para o setor de defesa (GARCÍA-BENITO; MARTÍN-PEÑA, 2021).

Trabalhos recentes em *facility location* para estoques críticos raramente incorporam dados de tempo de deslocamento verificado via API, recorrendo, em sua maioria, a estimativas baseadas em matrizes de distância pré-computadas (DO REGO; DE MESQUITA, 2011). O Transpetro Rota Fácil posiciona-se nessa lacuna: não como um modelo de otimização, mas como ferramenta de verificação operacional que torna acessível, a gestores sem *expertise* técnica em programação, a consulta a dados reais de tempo de deslocamento rodoviário.

2.4. *Design Science Research* em sistemas de informação logística

A *Design Science Research* (DSR) é uma abordagem metodológica consolidada para a criação e avaliação de artefatos de tecnologia da informação em contextos organizacionais reais (HEVNER *et al.*, 2004). A *Design Science Research Methodology* (DSRM), proposta por Peffers *et al.* (2007), estrutura o processo em seis etapas (identificação do problema, objetivos da solução, projeto e desenvolvimento, demonstração, avaliação e comunicação) e tem sido amplamente adotada no desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão logísticos (LEYERER *et al.,* 2019; GAO; XU, 2010).

Aplicações recentes da DSRM na criação de sistemas de informação para logística incluem SAD para gestão de exceções em cadeias de suprimentos com suporte de agentes

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

inteligentes (GAO; XU, 2010), sistemas de apoio à decisão para logística hospitalar crítica (COSTA *et al*., 2023), e plataformas de *supply chain* inteligente com inteligência artificial (RIZKIA; YULIANTO, 2025). No contexto de logística de manutenção industrial, Pereira *et al*. (2025) demonstraram a aplicabilidade de abordagens DSR com *Python* para aprimorar a eficiência de operações logísticas de terceiros, confirmando a aderência dessa metodologia ao perfil do presente trabalho.

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada de natureza descritiva, com abordagem quali-quantitativa, conduzida por meio de estudo de caso único (YIN, 2015). O objeto de estudo é a rede de terminais de armazenamento de selos para bombas mecânicas da Transpetro.

O desenvolvimento do sistema seguiu a *Design Science Research Methodology* (DSRM), *framework* metodológico estruturado em seis etapas que orienta a criação e avaliação de artefatos de tecnologia em contextos organizacionais reais. A adoção da DSRM é justificada por três características do problema: (i) a solução requer a criação de um artefato de *software* com aplicação imediata em contexto institucional; (ii) o critério de avaliação é a utilidade verificada por usuários reais; e (iii) a comunicação científica é parte integrante do ciclo de pesquisa (LEYERER *et al*., 2019; COSTA *et al*., 2023).

3.2. Ciclo DSRM aplicado ao Rota Fácil

O Quadro 1 apresenta a correspondência entre as seis etapas da DSRM e as ações realizadas no desenvolvimento do Transpetro Rota Fácil.

Quadro 1. Ciclo DSRM aplicado ao Transpetro Rota Fácil

Etapa DSRM	Ação realizada	Correspondência no Rota Fácil
1. Identificação do Problema	Diagnóstico do gap: ausência de sistema formal para verificação do critério de 150 min na Transpetro	Levantamento operacional com a gerência da área de manutenção
2. Objetivos da Solução	Definição dos requisitos: interface *web* acessível, dois motores de API, três modos de operação, exportação Power BI	Levantamento de requisitos com feedback do usuário institucional (Transpetro)
3. Projeto e Desenvolvimento	Desenvolvimento em *Python/Streamlit* com *dispatcher*	Código-fonte disponível em repositório GitHub

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Etapa DSRM	Ação realizada	Correspondência no Rota Fácil
	calcular_rota(), mecanismos de robustez e base de terminais	
4. Demonstração	Aplicação ao conjunto real de ~30 pares de rotas de terminais Transpetro com critério de 150 min	Processamento em lote com exportação dos resultados em Excel
5. Avaliação	Identificação de 2 terminais não conformes; validação da ação gerencial resultante	Feedback da Transpetro: redirecionamento formal aceito pela gerência
6. Comunicação	Publicação do artefato como código aberto + registro INPI + artigo científico	Registro INPI, Repositório GitHub | Este artigo científico

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Peffers *et al.* (2007).

3.3. Tecnologias e base de dados

As tecnologias utilizadas foram: *Python* 3.10+, *framework Streamlit* para interface *web*, bibliotecas *Pandas* e *OpenPyXL* para manipulação de dados tabulares, e os SDKs das APIs de roteamento *ORS* e *Google Maps Distance Matrix API*. O repositório do código-fonte está disponível publicamente em https://github.com/andersonportella-collab/Transpetro-Rota-Facil.

A base de dados utilizada compreende terminais de armazenamento e terminais demandantes de selos mecânicos pertencentes à rede Transpetro (dados disponíveis no site institucional). As coordenadas geográficas foram consolidadas em arquivos CSV estruturados, com a coluna 'Centro' como chave de junção. O processamento foi executado no modo de lote do sistema, utilizando o motor *ORS* com perfil de veículo *'driving-car'*. O critério de conformidade foi aplicado diretamente sobre a coluna de tempo calculado: pares com tempo superior a 150 minutos foram classificados como não conformes ao requisito operacional.

Como procedimento complementar de validação, os resultados obtidos pelo motor *ORS* foram comparados com aqueles retornados pela *Google Maps Distance Matrix API*, utilizada como segundo motor de busca de rotas no sistema. Essa comparação permitiu verificar a consistência dos tempos e distâncias calculados, observando-se pequenas diferenças de precisão entre os dois serviços, atribuíveis principalmente às distintas bases cartográficas empregadas (*OpenStreetMap*, no caso do ORS, e *Google Maps*, no caso da API da Google) e à incorporação, pelo *Google Maps*, de dados históricos de tráfego, particularmente relevantes em ambientes urbanos mais densos. Apesar dessas variações pontuais, os resultados apresentaram convergência suficiente para validar os dados produzidos pelo *ORS* no contexto da aplicação empírica realizada.

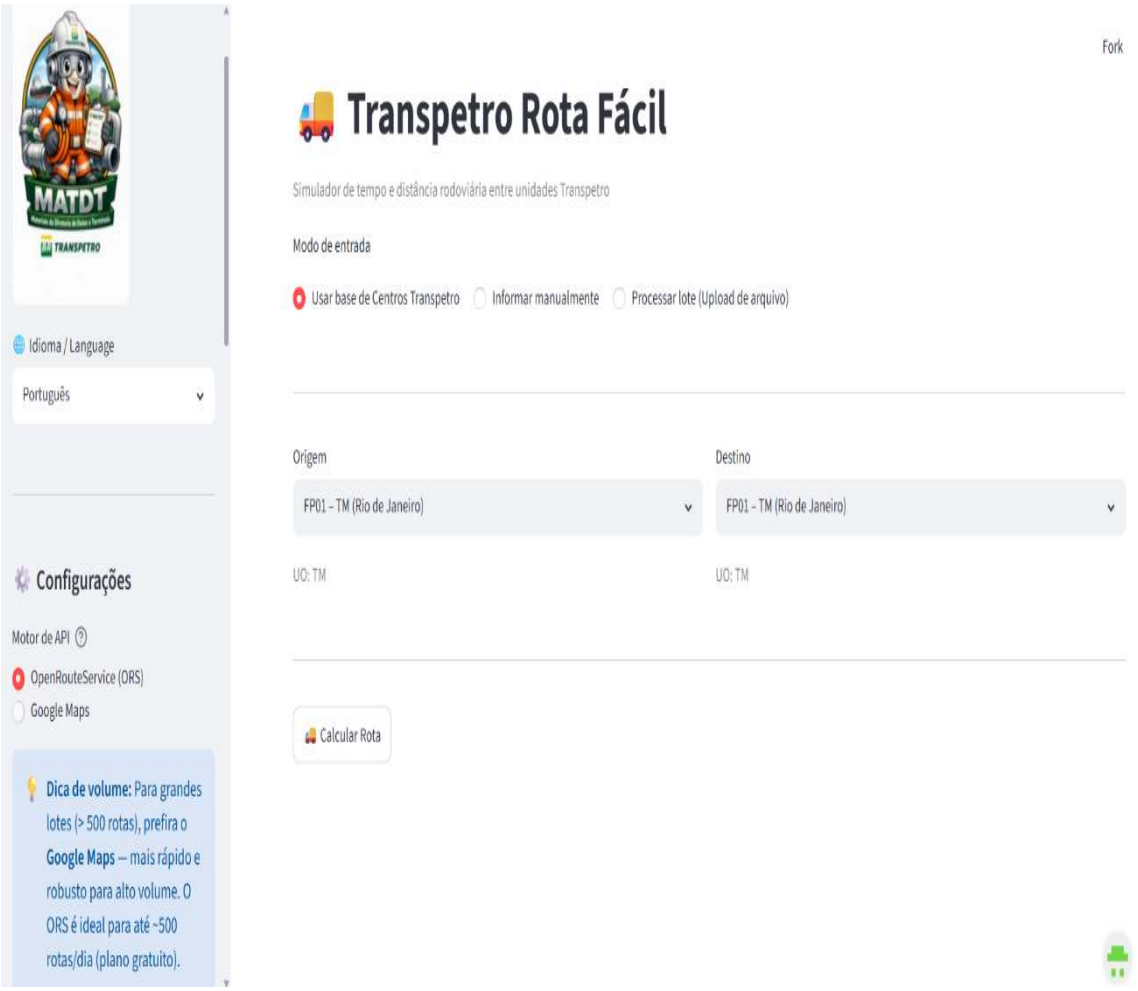
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4. O SISTEMA TRANSPETRO ROTA FÁCIL

4.1. Arquitetura e módulos

O Transpetro Rota Fácil (PORTELLA *et al.,* 2026) é um sistema *web* desenvolvido em *Python* com o *framework Streamlit*, que fornece interface interativa sem necessidade de instalação ou *expertise* técnica pelo usuário final (Figura 1). A arquitetura é organizada em torno de um módulo *dispatcher* central, a função calcular_rota(), que encaminha as requisições para uma de duas APIs de roteamento conforme seleção do usuário. O Quadro 2 resume os módulos principais do sistema.

Figura 1. Tela inicial do sistema Transpetro Rota Fácil: visão geral da interface



Fonte: Elaborado pelos autores.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 2. Módulos principais do Transpetro Rota Fácil

Módulo	Descrição
Interface *web (Streamlit)*	*Framework Python* para *web apps*; bilíngue (pt-BR/en); acesso via navegador sem instalação
Dispatcher **calcular_rota()**	Encaminha chamadas para ORS ou *Google Maps* conforme motor selecionado pelo usuário
Motor *ORS*	Roteamento gratuito (OSM); *backoff* exponencial (2s→4s→8s); *snapping* configurável
Motor *Google Maps*	*Distance Matrix API*; recomendado para > 500 rotas/dia; incorpora dados de tráfego
Processamento em lote	*Chunking* configurável; persistência via *session_state*; exportação Excel e JSON (*Power BI*)
Base de dados	CSVs com terminais Transpetro (nome, coordenadas, UO); chave de junção: 'Centro'
Validação Haversine	Suprime chamadas à API para pares origem = destino (distância geodésica < 10 m)

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2. Motores de roteamento

A decisão de integrar duas APIs de roteamento reflete um requisito institucional real: em empresas de economia mista, a dependência de serviços pagos pode criar barreiras burocráticas de aprovação. O ORS, por ser gratuito e não exigir cadastro de cartão de crédito, viabiliza a adoção em fases piloto sem ônus financeiro. O Quadro 3 compara os motores para o contexto de uso avaliado.

Quadro 3. Comparação entre os motores de roteamento

Critério	*ORS*	*Google Maps Distance Matrix API*	Relevância
Custo	Gratuito	US$ 200/mês crédito gratuito	ORS adotado na fase piloto
Limite diário	2.000 req/dia	Baseado em crédito	Suficiente para ~30 pares
Rate limit/min	40 req/min	Mais permissivo	Contornado via backoff exponencial
Base cartográfica	OpenStreetMap	Google Maps	Ambos fornecem tempo e distância real

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Critério	*ORS*	*Google Maps Distance Matrix API*	Relevância
Volume recomendado	Até ~500 rotas/dia	> 500 rotas/dia	ORS adequado para o escopo

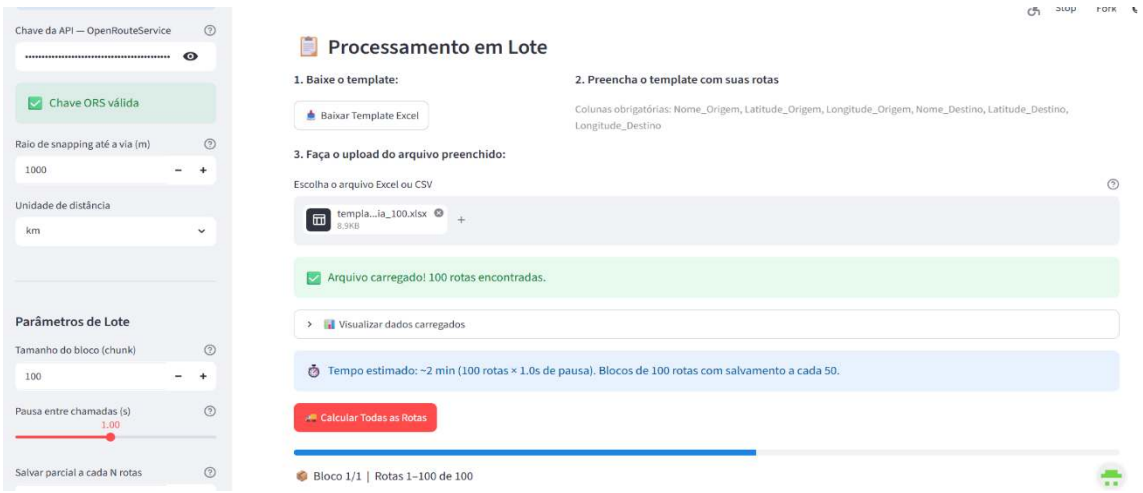
Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3. Modos de operação e mecanismos de robustez

O sistema oferece três modos de operação. O modo “Base de Centros” permite selecionar origem e destino a partir de cadastro pré-carregado de terminais Transpetro, eliminando a necessidade de conhecimento de coordenadas geográficas. O modo “Manual” permite entrada direta de coordenadas com suporte ao padrão brasileiro de vírgula decimal. O modo “Lote” permite *upload* de planilhas com múltiplos pares de rota, processados automaticamente com mecanismos de robustez.

Para o processamento em lote (Figuras 2 e 3), o sistema implementa três mecanismos de robustez: (i) *chunking* configurável, o arquivo é dividido em blocos processados sequencialmente com progresso visual em tempo real; (ii) retry com *backoff* exponencial — em caso de erros HTTP 429 ou 5xx, o sistema realiza até 3 tentativas com espera de 2, 4 e 8 segundos; e (iii) persistência parcial via *st.session_state*, que salva resultados periodicamente e permite retomada automática em caso de interrupção. Adicionalmente, a fórmula de Haversine detecta pares origem-destino idênticos (distância < 10 m), suprimindo chamadas desnecessárias à API.

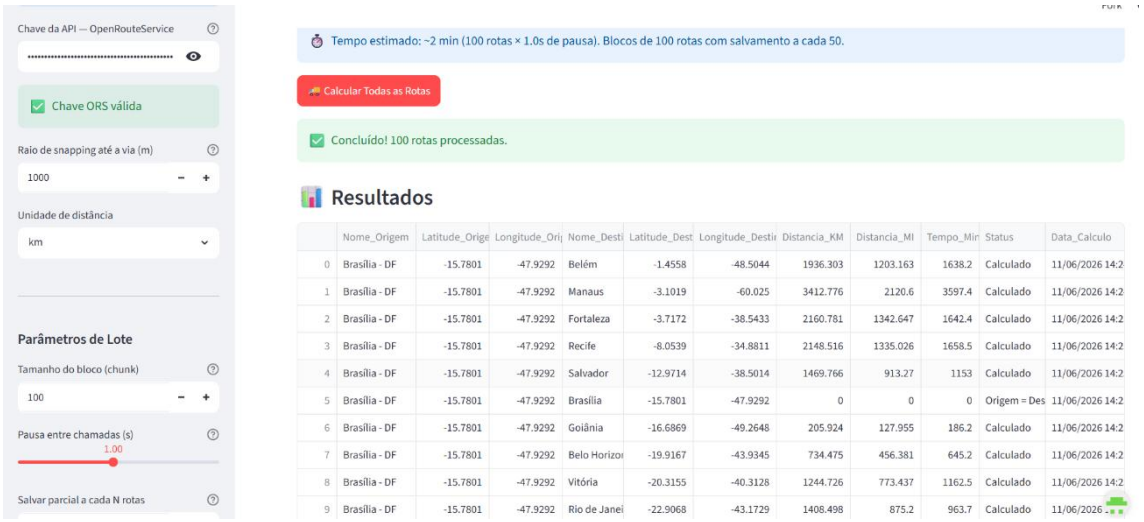
Figura 2. Tela do sistema: modo de processamento em lote com barra de progresso



Fonte: Elaborado pelos autores.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Tela do sistema: resultado exportado com classificação Tempo e Distância



Fonte: Elaborado pelos autores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicado à base real de terminais Transpetro, o sistema processou aproximadamente 30 pares de rotas origem-destino utilizando o motor *ORS*. Para cada par, foram calculados distância rodoviária em quilômetros e tempo estimado de deslocamento em minutos. O critério de conformidade, tempo ≤ 150 minutos, foi verificado automaticamente para todos os pares.

A análise identificou 2 terminais de armazenamento que não atendiam ao critério operacional. Em ambos os casos, o tempo de deslocamento calculado superava o limiar de 150 minutos, tornando inviável o atendimento emergencial dentro da janela requerida. Esse resultado ilustra uma vulnerabilidade análoga àquela descrita por García-Benito e Martín-Peña (2021) para redes de redistribuição no setor de defesa: a existência de critérios operacionais formalizados sem os instrumentos de verificação correspondentes. O Quadro 4 sintetiza a comparação entre a situação anterior e o cenário com o Rota Fácil.

Quadro 4. Comparação entre a situação anterior e o cenário com o Rota Fácil

Dimensão	Antes do Rota Fácil	Com o Rota Fácil
Avaliação de rotas	Inexistente	Cálculo automático via API de roteamento rodoviário
Critério de 150 min	Não verificado sistematicamente	Verificação automática para todos os pares
Pares analisados	—	~30 pares origem-destino

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Dimensão	Antes do Rota Fácil	Com o Rota Fácil
Não conformidades	Não identificadas	2 terminais fora do critério detectados
Ação corretiva	—	Redirecionamento formal do armazenamento
Replicabilidade	Não aplicável	Protocolo extensível a outros materiais críticos
Expertise exigida	—	Interface *web*; sem programação pelo usuário

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados subsidiaram o redirecionamento formal do armazenamento para terminais compatíveis com o critério de 150 minutos. Trata-se do primeiro caso documentado, na empresa, de uso de dados de roteamento rodoviário real para apoiar uma decisão de alocação de estoque de peças sobressalentes.

O desenvolvimento e a aplicação do artefato seguiram o ciclo DSRM descrito por Leyerer *et al.* (2019).

Os resultados evidenciam uma vulnerabilidade logística antes invisível à gestão. Em linha com Mouschoutzi e Ponis (2022), a ausência de monitoramento formal de cobertura configura risco operacional sistêmico em infraestruturas críticas distribuídas. Nesse sentido, a principal contribuição do Rota Fácil é viabilizar a verificação periódica, documentada e reprodutível da cobertura logística de estoques críticos.

O estudo estabeleceu precedente institucional e base metodológica para avaliar outros materiais críticos e sistemas de manutenção da Transpetro com o mesmo critério. Em termos teóricos, reforça a viabilidade técnica e operacional do uso de APIs de roteamento como substitutas de estimativas de distância em modelos de cobertura logística, em linha com De Barros Franco *et al*. (2021) e Callejas-Molina *et al.* (2025).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o Transpetro Rota Fácil, um sistema *web* de apoio à decisão logística para verificação da conformidade de terminais de armazenamento de peças sobressalentes com critérios de tempo de deslocamento rodoviário em redes de dutos. O sistema integra duas APIs de roteamento em uma interface *web* acessível, bilíngue e dotada de mecanismos de robustez para processamento em lote, desenvolvido e avaliado segundo a *Design Science Research Methodology*.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Em resposta ao objetivo geral proposto, o sistema foi desenvolvido, documentado e aplicado com sucesso a um caso real da Transpetro. Em relação aos objetivos específicos: a arquitetura técnica foi descrita em detalhe, incluindo os mecanismos de robustez; a aplicação real identificou 2 terminais não conformes ao critério de 150 minutos em um universo de ~30 pares analisados; a decisão gerencial resultante foi formalizada e documentada; e o sistema foi registrado no INPI e disponibilizado como código aberto.

A contribuição central está na convergência de três elementos: acessibilidade da ferramenta (interface *web* sem exigência de programação), verificabilidade dos dados (roteamento rodoviário real via API) e formalização institucional (registro INPI e código aberto). Essa convergência torna o sistema replicável e sustentável para além do caso de uso original, e constitui uma resposta concreta ao gap identificado na literatura de *spare parts management* sobre a ausência de ferramentas operacionais de verificação de cobertura em infraestruturas críticas (MOUSCHOUTZI; PONIS, 2022; DO REGO; DE MESQUITA, 2011).

Como limitações, o sistema realiza verificação de conformidade, mas não sugere automaticamente a melhor alternativa entre múltiplos terminais candidatos. A base de dados precisa ser mantida atualizada, e os tempos calculados pelo ORS não incorporam variações de tráfego em tempo real, limitação que pode ser mitigada pelo uso do motor *Google Maps* em contextos com maior variabilidade de tráfego, sujeito a cobranças conforme mencionado anteriormente.

Como trabalhos futuros, propõe-se: (i) extensão da análise a outros materiais críticos do catálogo Transpetro; (ii) desenvolvimento de módulo de otimização para sugestão automática de terminais alternativos, inspirado nos modelos de localização multinível de Li *et al.* (2023); (iii) integração com sistemas ERP/EAM para atualização automática da base de terminais; e (iv) aplicação do protocolo em outras operadoras de dutos no Brasil e na América Latina.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe operacional da Transpetro pelo suporte no levantamento dos dados e ao *Heidelberg Institute for Geoinformation Technology* pelo desenvolvimento e disponibilização gratuita da plataforma ORS.

DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Os autores declaram que utilizaram ferramentas de inteligência artificial generativa Claude Anthropic e Copilot exclusivamente como apoio à revisão textual e ao aprimoramento da redação deste manuscrito, sem emprego para geração autônoma de resultados, interpretação

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de dados, formulação de conclusões ou substituição da análise intelectual dos pesquisadores. Todo o conteúdo foi posteriormente revisado, validado e aprovado pelos autores, que assumem integral responsabilidade pela precisão, originalidade, integridade científica e adequação ética do texto final.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses relacionado a este manuscrito.

FINANCIAMENTO

Os autores declaram que a pesquisa não recebeu financiamento específico de agências de fomento dos setores público, comercial ou sem fins lucrativos.

DISPONIBILIDADE DE DADOS

O manuscrito informa o local de disponibilização pública do código-fonte do sistema, bem como o respectivo registro de *software*. Os dados utilizados na aplicação empírica correspondem a informações institucionais e operacionais da Transpetro, tratadas e apresentadas no artigo na medida necessária à reprodutibilidade do estudo.

REFERÊNCIAS

ACHAMRAH, Fatima Ezzahra; RIANE, Fouad; LIMBOURG, Sabine. Spare parts inventory routing problem with transshipment and substitutions under stochastic demands. **Applied Mathematical Modelling**, v. 101, p. 309-331, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.08.029.

CALLEJAS-MOLINA, R. A. et al. Circuit Analysis Approach for Sustainable Routing Optimization with Multiple Delivery Points. **Sustainability**, v. 17, n. 7, p. 2866, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/su17072866.

CARDEAL, G.; LEITE, Marco; RIBEIRO, Inês. Decision-support model to select spare parts suitable for additive manufacturing. **Computers in Industry**, v. 144, p. 103798, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103798.

COSTA, Juliana Martins; MEIRELLES, Betina Hörner Schlindwein; MAGALHÃES, Aline Lima Pestana. Software para apoio à decisão logística no processo de captação e transplante de órgãos. **Revista Baiana de Enfermagem**, p. e52699, 2023. Disponível em: https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1529692.

DE BARROS FRANCO, David Gabriel; STEINER, Maria Teresinha Arns; ASSEF, Fernanda Medeiros. Optimization in waste landfilling partitioning in Paraná state, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 125353, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125353.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

DO REGO, José Roberto; DE MESQUITA, Marco Aurélio. Spare parts inventory control: a literature review. **Produção**, v. 21, n. 4, p. 645-655, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-65132011005000002.

GAO, Shijia; XU, Dongming. An intelligent agent-assisted logistics exception management decision support system: a design-science approach. In: **Information Systems Foundations**, p. 189, 2010. DOI: https://doi.org/10.22459/ISF.12.2010.09.

GARCÍA-BENITO, Juan Carlos; MARTÍN-PEÑA, María-Luz. A redistribution model with minimum backorders of spare parts: a proposal for the defence sector. **European Journal of Operational Research**, v. 291, n. 1, p. 178-193, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.014.

GÖKDAĞ, Zehra Hafızoğlu; TÜRKMEN, Ayşe Dilara; CEBECI, Salih. Optimization of the first-mile pickup problem: a real-life case study. In: **WCECSS Proceedings**, 2025. DOI: https://doi.org/10.11159/cist25.125.

GOOGLE. **Google Maps Platform: Distance Matrix API Documentation**. Mountain View: Google LLC, 2024. Disponível em: https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix. Acesso em: abr. 2026.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 75-106, 2004. DOI: https://doi.org/10.2307/25148625.

KENNEDY, W. J.; PATTERSON, J. W.; FREDENDALL, L. D. An overview of recent literature on spare parts inventories. **International Journal of Production Economics**, v. 76, n. 2, p. 201-215, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00174-8.

LEYERER, M. et al. Individually optimized commercial road transport: A decision support system for customizable routing problems. **Sustainability**, v. 11, n. 20, p. 5544, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/su11205544.

LI, Jinliang; REN, Weibo; WANG, Xibin. Joint location-allocation model for multi-level maintenance service network in agriculture. **Applied Sciences**, v. 13, n. 18, p. 10167, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/app131810167.

LI, Xinlong; JIANG, Shuai; CHEN, Baojia; CHEN, Fafa; AN, Youjun; RAN, Yan; ZHANG, Genbao. Joint optimization of imperfect preventive opportunistic maintenance and spare parts inventory for multi-unit systems considering spare parts reuse. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 261, p. 111162, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111162.

LJUBOTINA, Leonid; ŠEVROVIĆ, Marko; PIRDAVANI, Ali; JOVANOVIĆ, Bojan. Evaluating cargo bike delivery applications in urban logistics: the case of Zagreb. **Transportation Research Procedia**, v. 91, p. 235-242, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.10.031.

MINNER, S. Multiple-supplier inventory models in supply chain management: a review. **International Journal of Production Economics**, v. 81-82, p. 265-279, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00288-8.

MOUSCHOUTZI, Maria; PONIS, Stavros T. A comprehensive literature review on spare parts logistics management in the maritime industry. **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, v. 38, n. 2, p. 71-83, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.12.003.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

NARANJO, Jose E. et al. A scoping review of pipeline maintenance methodologies based on Industry 4.0. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16723, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/su142416723.

NEIS, P.; ZIPF, A. Analyzing the contributor activity of a volunteered geographic information project—The case of OpenStreetMap. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 1, n. 2, p. 146-165, 2012. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi1020146.

PEFFERS, K. et al. A design science research methodology for information systems research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007. DOI: https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302.

PEREIRA, M. Teresa et al. Enhancing third-party logistics efficiency: a digital approach to transport costing. In: **Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange**. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 159-170, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-07144-6_14.

PHAM, D. T.; KIESMULLER, G. P. Multiperiod integrated spare parts and tour planning for on-site maintenance activities with stochastic repair requests. **Computers & Operations Research**, v. 148, p. 105967, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105967.

PORTELLA, Anderson Gonçalves; GOMES, Carlos Francisco Simões; SANTOS, Marcos dos; SOUZA, Robson Ferreira de. **Transpetro Rota Fácil**. Rio de Janeiro: INPI, 2026. Registro de Programa de Computador. Pedido nº BR 51 2026 002194 4. Depósito: 31 mar. 2026.

RIZKIA, Irma; YULIANTO, Hubertus Davy. Smart supply chain management with artificial intelligence: toward resilient and sustainable industrial automation in Industry 4.0. In: **2025 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)**. IEEE, 2025. p. 1-9. DOI: https://doi.org/10.1109/ICISS66954.2025.11389384.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.