

# Routing of Cargo Vehicles by Multi-Factor Simulation

## Roteirização de Veículos de Carga por Simulação Multifatores

Deivid Luiz Pinto da Silva<sup>1</sup> , Braulio Mello<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)  
Chapecó, Santa Catarina – Brasil

deividiluiz96@hotmail.com, braulio@uffs.edu.br

**Abstract.** The effectiveness of supply chain systems depends on the quality of the logistic strategies. The vehicle routing problem is one of the important ones in this context. Traditional solutions of routing use to combine distance and time to define a route. However, there are additional and relevant aspects, or factors, to improve the routing effectiveness. For instance: timing windows of stops; routing vs tracing; velocity according to the truckload type; and road quality. Traditional solutions do not allow flexible and configurable sets of factors for the routing process. This work introduces a new Modeling and Simulation solution to combine multi-factors for the routing process. The proposed model allows configuring multi properties according to the truckload features. As results, the model identifies the route with the best balance among the configured properties requirements.

**Keywords.** Computational Simulation; Scripting; Tracking.

**Resumo.** Estratégias logísticas para movimentação de produtos têm impacto significativo na eficácia das redes de transporte e fornecimento. A definição de rotas para veículos de carga é um dos problemas com grande impacto nos processos logísticos. Soluções tradicionais de roteirização, tais como caixeiro viajante ou redes de filas, geralmente combinam parâmetros de distância e tempo para escolha de rotas. No entanto, há fatores relevantes que podem melhorar a efetividade na roteirização. Por exemplo, janelas temporais de atendimento nas paradas, rastreabilidade e sombreamento, tipo de carga, velocidade, qualidade da pavimentação dos segmentos de rota, entre outros. Soluções tradicionais não facultam a definição de um conjunto mais amplo, configurável e interdependente de fatores importantes na geração de rotas. Este trabalho apresenta uma solução por Modelagem e Simulação para combinar múltiplos fatores no processo de roteirização. Como resultado, o modelo sugere a rota que melhor atende, de forma combinada, o conjunto de propriedades desejável para cada rota.

**Palavras-Chave.** Simulação Computacional; Roteirização; Rastreamento.

## 1. Introdução

A complexidade atual das redes de movimentação de mercadorias, impulsionadas por novas tecnologias, variabilidade nos perfis e localização geográfica dos consumidores, comércio eletrônico e indústria 4.0, têm exigido métodos mais efetivos de logística e distribuição [Hakim and Abbas 2019]. Esta realidade pode ser constatada nos desafios para otimizar a movimentação de mercadorias através de veículos de carga em vias rodoviárias. Além da distância e tempo, há outros fatores que interferem na escolha de rotas. Por exemplo, janelas temporais de atendimento nas paradas, rastreabilidade e sombreamento, tipo de carga, velocidade da via e qualidade da pavimentação dos segmentos de rota.

São fatores que, além da sua aplicação nos procedimentos específicos de roteirização, também representam informações essenciais aos sistemas de gestão de informações com os quais se comunicam. Por exemplo, em sistemas de gestão de mercadorias em centros de distribuição é necessária efetiva interoperabilidade entre os sistemas de produção de suprimentos e o sistema de planejamento logístico para movimentação de itens. Tais soluções têm aplicação, por exemplo, no contexto dos desafios para cidades inteligentes que integram, com fins comuns, sistemas de gestão, comunicação e internet das coisas [D'Angelo et al. 2017]. Este ecossistema, como abordado no capítulo 9 dos grandes desafios 2016-2026 em sistemas de informação [Boscaroli et al. 2017], pressupõe a disponibilidade de mecanismos de apoio ao desenvolvimento colaborativo, de fluxos e de processos, entre organizações. Mecanismos, estes, capazes de apoiar a modelagem e a execução de operações de forma integrada com outros sistemas de informação.

Estratégias tradicionais como o caixeiro viajante [Barcelos et al. 2022] [Palhares et al. 2019] ou redes de filas [Li et al. 2022] são eficientes. Porém, são limitantes para a análise combinada de fatores além da distância e tempo. Soluções de apoio a decisão em sistemas logísticos baseados em sistemas multiagentes permitem contemplar maior variabilidade de fatores nas análises logísticas. Em Neto (2011) é apresentada uma estratégia de distribuição de viaturas para manutenção de redes elétricas utilizando sistemas multiagentes [Graciano Neto et al. 2011]. Esta solução contempla fatores tais como tempo de interrupção do fornecimento de energia, urgência, distância entre as viaturas e os locais das ocorrências e quilometragem limite e realizada das viaturas. Os resultados dos estudos demonstraram melhor aproveitamento do tempo de atuação das viaturas com redução do tempo médio de reparo de falhas nas redes elétricas.

Dentre as estratégias mais recentemente exploradas para roteirização com sinergia para análise combinada de multifatores, os métodos baseados em Modelagem e Simulação (M&S) têm apresentado aspectos vantajosos [Carson 2004]. A M&S permite representar o comportamento de sistemas em cenários simulados denominados modelos de representação. Intervenções podem ser realizadas no modelo para análise de melhorias ou solução de problemas sem riscos ao sistema em operação [França and Travassos 2015]. O exercício, ou execução, de simulações pode ser repetido (replicado) até que resultados desejáveis, e úteis no apoio a decisões, sejam alcançados. Como não há restrições na forma, dimensão e variabilidade na construção de modelos, estudos baseados em M&S tem ampla abrangência de aplicação. Por exemplo, na simulação de processos de negócios

[Barboza et al. 2019] [Santos et al. 2020], na análise de operações e balanceamento de carga em linhas de produção para reduzir gargalos [Rahman et al. 2024] ou análise comparativa de sistemas por simulação como apresentado em [Teixeira et al. 2019]. Neste trabalho, duas arquiteturas de software para sistemas inteligentes de semáforos de trânsito foram comparados por simulação.

Estratégias de modelagem, alinhadas com princípios de M&S, também podem ser aplicadas na reestruturação de fluxos de processos de negócios usando BPM (*Business Process Management*). Um exemplo pode ser visto no trabalho apresentado por Silva (2024) que aplica modelagem no aprimoramento do processo de gestão e fornecimento de informações no Ministério Público de Contas do Estado de Pernambuco [Silva et al. 2024]. Um outro exemplo de contribuição aplicando BPM em conjunto com simulação, proposto por Barboza (2019), aplica estratégias baseadas em regras para instanciar, validar e simular modelos de processos críticos. São denominados de processos críticos aqueles que são pouco estruturados, dinâmicos e de alta complexidade [Barboza et al. 2019]. Também baseado em BPM, Molina (2023) apresenta cenários de modelagem do tratamento de exceções na interoperabilidade de processos de negócios entre organizações distintas que cooperam com metas comuns [Molina et al. 2023].

No entanto, o ciclo de vida de M&S demanda maior esforço, comparado às soluções tradicionais, para que modelos sejam suficientemente representativos e fidedignos [Balci 2012]. É necessário domínio dos conceitos, ciclo de projeto e desenvolvimento de modelos, e dos ambientes/ferramentas de simulação para que se tenha êxito na representação fiel do comportamento do sistema real em estudo. Por isso, é representativa a chance de uma relação desfavorável entre custo e benefício na adoção de M&S. Adicionalmente, as soluções atuais específicas para o trato de processos de roteirização por M&S disponíveis, embora constatadas suas potencialidades e vantagens, ainda são incipientes e com aplicação produtiva pouco explorada, não representando sólido avanço além do campo dos estudos e pesquisas [Novaes et al. 2011].

Com o objetivo de reduzir o custo e complexidade do uso de M&S como estratégia para análise e definição de rotas para veículos de carga, este trabalho apresenta uma solução em M&S que combina múltiplos fatores incidentes no processo de roteirização e rastreamento. As principais contribuições da solução de roteirização proposta são:

- Método: Apresenta método baseado em M&S para simulação de rotas combinando multifatores que incidem sobre as decisões de geração de rotas;
- Flexibilidade: Propõe um modelo configurável que permite selecionar um subconjunto de propriedades a serem atendidas, gerando rotas com melhor equilíbrio no atendimento às propriedades selecionadas durante a configuração do modelo;
- Transparência: A solução encapsula os procedimentos e operacionalização das técnicas de M&S aplicadas na solução que são apresentados ao usuário como serviços *front – end*;
- Realismo: Permite a carga de dados reais, por exemplo, dados de cobertura de antenas de telefonia móvel com dados de alcance das rodovias e de malhas rodoviárias, agregando fidelidade e realismo na simulação da rastreabilidade;
- Experimentação: Sem restrições para múltiplas replicações do ciclo “configuração → simulação → avaliação de resultados” até que o resultado atenda os critérios

de gestão e operacionalização de uma rota.

Na seção 2 deste artigo são apresentados os principais trabalhos correlatos. A seção 3 apresenta modelo proposto e descreve as propriedades contempladas para simulação multifatores dos processos de roteirização. A seção 4 apresenta a infraestrutura de simulação, módulos de dados e implementação das propriedades. Estudos de caso, experimentação e resultados são discutidos na seção 5, seguida de conclusões e perspectivas.

## 2. Trabalhos relacionados e motivação

O atendimento combinado de múltiplos fatores, ou propriedades, na definição de rotas para veículos de carga é um problema recorrente em estudos e pesquisas [Arnold et al. 2019] [Falvo et al. 2018] [Garrido and Castro 2012]. A efetividade de soluções logísticas tem sustento importante na qualidade do trabalho de roteirização. As estratégias tradicionais de roteirização atendem os aspectos fundamentais, principalmente distância e tempo. Contudo, encontram limites quando da ampliação de fatores relevantes para a definição de rotas. Por exemplo, o encadeamento de janelas de atendimento para evitar espera, relação entre menor distância com menor área de sombreamento, volume de trafegabilidade por períodos observados ou em tempo real, variabilidade da intensidade dos congestionamentos de tráfego, entre outros. Tais aspectos são objeto recorrente de estudos e pesquisas.

A simulação computacional tem sido utilizada no apoio à tomada de decisões no contexto de sistemas de informação [da Silva and Pasin 2022], como por exemplo, na análise do impacto de mudanças em planos de mobilidade urbana (UMP). Na solução proposta por Silva et.al.(2022), a simulação computacional foi utilizada para analisar o comportamento de diferentes fluxos de tráfego sobre um cenário de mobilidade urbana. A contribuição e impacto em sistemas de informação, segundo autores, é aferir que tecnologias baseadas em simulação de tráfego para avaliação de planos de mobilidade urbana podem apoiar o processo de tomada de decisões mesmo com a indisponibilidade de um conjunto de dados integral. Afora o uso de M&S, essa aferição seria viável apenas com a realização de experimentos sobre o cenário de tráfego real.

Centros urbanos densos estão sujeitos a lentidão e congestionamentos difíceis de prever. Nestas condições, operadores logísticos podem alocar uma quantidade de entregas excessiva para um veículo regular de carga com roteiro que se mostra mais lento que o previsto. Isto ocasiona o não cumprimento das entregas e dos prazos. Novais (2011) apresenta uma solução de roteirização dinâmica aplicando simulação matemática em conjunto com algoritmos genéticos [Novaes et al. 2011]. Quando um veículo regular se mostra impossibilitado de cumprir o roteiro logístico, um veículo auxiliar assume parte das entregas. O roteiro do veículo auxiliar é definido de forma dinâmica. Na proposta dos autores, a primeira etapa consiste na roteirização estática preliminar através do PCV (Problema do Caixeiro Viajante), onde são previamente definidas as tarefas e roteiro do veículo regular. Então, o algoritmo genético é executado durante os atendimentos para avaliar a necessidade de realocação de novos serviços quando há risco de descumprimento dos prazos de entrega. Se atraso é confirmado, ocorre realocação de carga para caso reserva, preservando o veículo principal para a próxima entrega com condições de atendimento dos

prazos. As transferências de carga podem resultar em um custo elevado pelo aumento do efetivo de veículos em demandas de rotas geradas dinamicamente. Trata-se de solução com foco no atendimento complementar corretivo dos resultados de práticas tradicionais de roteirização.

O problema de deslocamento do *staff* de enfermagem [Falvo et al. 2018], e respectivo custo, em uma região limitada é abordado na perspectiva de roteirização. Os autores defendem que algoritmos aplicados ao VRP (*Vehicle Routing Problem*) são aplicáveis na otimização dos processos de deslocamentos do *staff* de enfermagem em sistemas de saúde. O artigo apresenta, como solução, uma plataforma que adapta algoritmos de roteamento veicular cooperativos ao sistema de saúde para reduzir os custos de deslocamento. Resultados preliminares apresentados pelos autores apontam reduções de custos entre 1% e 21% nas diferentes simulações realizadas.

Uma outra abordagem baseada em heurísticas autoadaptativas é apresentada por Garrido e Castro (2012). A proposta sugere o uso do conhecimento já adquirido sobre rotas para solucionar problemas de roteirização, estática ou dinâmica, construindo ou melhorando rotas parciais [Garrido and Castro 2012]. Contribuições baseadas em heurísticas, adicionalmente, apresentam estratégias que permitem a roteirização entre instâncias (carga e descarga) em larga escala com baixa demanda de processamento computacional [Arnold et al. 2019]. Os autores também propõem uma *benchmark set* para testes em larga escala de instâncias. Embora os resultados demonstrem ganhos na solução de problemas de roteamento de veículos, os artigos não exploram aspectos multifatores na definição das heurísticas. Em Zong (2022) os autores também apresentam o uso de heurística, baseada em aprendizado, na solução de problemas de roteamento de veículos em larga escala [Zong et al. 2022]. Nesse trabalho, é proposto o framework RBG (*Rewriting – by – Generating*) que, comparado aos antecessores, trata as heurísticas de forma hierárquica.

Em Torres (1997) são investigados os efeitos da interação entre cronogramas de produção e as operações de roteamento e transporte das mercadorias em uma rede logística [Ruiz-Torres and Tyworth 1997]. Modelos de simulação foram utilizados para analisar diferentes estratégias de cronograma, ou escalonamento, de produção e sua interação com os meios de distribuição. Os modelos foram baseados em cenários reais de fabricação e distribuição. Resultados demonstraram que algumas combinações de escalonamento de produção e de roteirização podem resultar em redução de custos de fabricação e de logística, mantendo os níveis de produtividade e qualidade. Lee (2010) apresenta um estudo similar usando modelagem e simulação para avaliar a interação entre produção e a eficácia das operações de roteirização na redução do custo geral [Lee and Farahmand 2010]. Resultados similares foram identificados em ambas as contribuições.

É justificável a realização de estudos e pesquisas voltados para o desenvolvimento de instrumentos mais completos para o suporte às operações de roteirização. Soluções que contemplam multifatores na definição de rotas têm potencial tanto para redução de custos, a exemplo dos estudos correlatos, bem como para maior flexibilidade ao administrar múltiplas variáveis nas decisões de roteirização. A próxima seção apresenta o modelo

conceitual, e métodos para roteirização com multifatores por M&S, proposta neste trabalho.

### 3. Modelagem conceitual e composição multifatores

Esta seção descreve o modelo conceitual [Robinson 2013] da solução proposta neste trabalho para roteirização por M&S. A etapa de modelagem conceitual, definida como uma abstração do modelo de simulação, é contemplada no ciclo de vida da simulação [Balci 2012]. São definidos e descritos os elementos, entidades, comportamentos, módulos ou partes do modelo em um nível de abstração de projeto não dependente do ambiente ou infraestrutura de implementação do modelo.

Nesta etapa da construção da solução para roteirização foram definidas e descritas as propriedades contempladas no modelo proposto. O termo 'propriedades' é empregado para definir os fatores apoiados pelo modelo. O objetivo e os princípios de cada propriedade são introduzidos, a seguir, antes da apresentação da especificação do modelo. Em seguida, a construção do modelo sobre um *framework* de simulação de propósito geral é apresentada.

#### 3.1. Propriedades do modelo de roteirização

As características de cada uma das propriedades definidas para integrar o modelo de simulação proposto neste trabalho são aqui descritas. Podendo ser aplicadas na configuração do modelo individualmente ou agrupadas, cada propriedade trata de um fator em particular sem detrimento das relações funcionais entre as propriedades. Ou seja, o comportamento da simulação exercido pela configuração de cada propriedade influencia no comportamento das demais propriedades em tempo de simulação. A seção seguinte discute a arquitetura do modelo responsável pela composição das propriedades para representação de rotas. As propriedades são:

- **Sombreamento:** Rotas com trechos de sombreamento (ausência de comunicação) podem não ser aceitáveis de acordo com o valor ou periculosidade da carga. Nestes casos, pode ser necessário priorizar a rastreabilidade em detrimento da distância. A propriedade de sombreamento permite ao modelo identificar a rota com maior tempo de rastreabilidade e menor distância.
- **Áreas indevidas:** Permite, na configuração do modelo, definir trechos de rota como 'áreas indevidas' que a simulação tentará evitar, ou reduzir o tempo de permanência, no processamento da roteirização. Trechos podem ser configurados como 'áreas indevidas' por motivos variados, tais como: condições da pavimentação, número de trechos urbanos, alto índice de incidentes, entre outros.
- **Tempo de carregamento e descarregamento:** Esta propriedade permite contabilizar, no tempo total da rota, o tempo atribuído às tarefas de carga e descarga em cada ponto. Tratando-se de modelo de simulação, este tempo pode ser discretizado. Assim, esta propriedade depende da existência de um histórico do veículo para mensurar o tempo gasto em cada uma destas operações.
- **Tipo do veículo:** O tamanho, limite de velocidade, entre outros, são informações relevantes para estabelecer as condições de trafegabilidade de um veículo. Esta propriedade permite ao modelo processar a roteirização aplicando as informações

das características do veículo nos comportamentos previstos no modelo (velocidade, tempo de carga/descarga, seleção de trechos urbanos), bem como realizar comparativos isonômicos com veículos de mesmo tipo em rotas distintas.

- **Capacidade do veículo:** A capacidade do veículo, afeta diretamente a velocidade média que ele conseguirá manter conforme o percentual de carga, em relação à capacidade, a cada trecho. Com base nesta propriedade, o modelo atualiza a velocidade média inversamente proporcional aos eventos de descarga, integrada com a propriedade 'Tipo de Veículo'.
- **Unidades de descarga:** Esta propriedade é aplicada como atributo nas operações de atualização do percentual de carga do veículo sempre que houver uma descarga.
- **Velocidade do veículo:** Este atributo permite regular a velocidade média do veículo considerando informações sobre fragilidade da carga, capacidade carregada e total, tipo de transporte, quantidade de produtos a serem descarregados, rodovias com e sem pavimentação.
- **Janelas de atendimento:** Esta propriedade permite ao modelo selecionar rotas cujo tempo de espera no ponto de carga/descarga seja o menor possível de acordo com os horários de início e fim de atendimento aos transportadores de produtos. Assim, é possível que uma rota com distância maior permita reordenar pontos de parada numa cronologia que resulte em um tempo total de viagem menor.

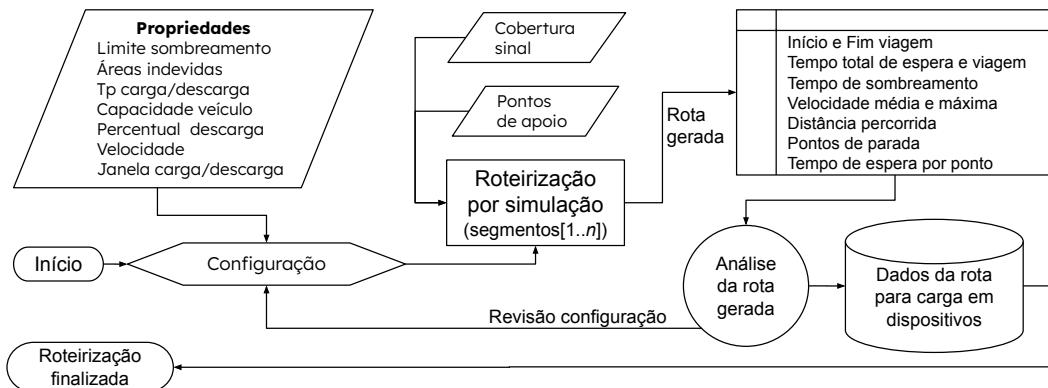
As propriedades são configuradas individualmente antes do início de uma simulação. Durante a simulação, as propriedade são aplicadas no processamento da roteirização de forma integrada, ou seja, respeitando a relação de causa e efeito entre eventos conduzidos por cada propriedade e entre elas. Cada ação de cada propriedade é delimitada por eventos. Por definição, um evento é a mudança de estado de uma propriedade do modelo, durante a simulação, em um determinado instante de tempo. Por exemplo, a entrada de um veículo em um segmento de rota com sombreamento é marcada, na simulação, por um evento no instante de tempo em que o veículo sai de um estado 'rastreável' e entra em estado 'não é rastreável'. A relação entre as propriedades é transparente à configuração e é controlada pelo simulador. O método para composição multifatores é discutido na próxima seção.

### 3.2. Propriedades e composição multifatores do modelo

O modelo proposto tem como principal mérito a composição das propriedades de modo interdependente e configurável. Ou seja, o modelo atende os requisitos configurados para cada propriedade de forma cooperada durante a simulação. Por exemplo, a rota com menor distância e a rota com menor sombreamento podem ser distintas. A composição multifatores aplica o conceito de *model composability* descrito em Sarjoughian (2006) e permite, na execução do modelo, identificar o melhor equilíbrio entre menor rota e menor sombreamento possíveis [Sarjoughian 2006].

A operacionalização da simulação é baseada no princípio de que existe uma relação funcional entre os módulos que tratam de cada uma das propriedades. Esta relação é definida durante a composição das propriedades no processo de construção do modelo. Além disso, o princípio de causalidade, quando a causa precede o efeito na execução de eventos de simulação, garante coerência temporal dos eventos simulados. O processamento da roteirização parte de uma rota inicial geralmente selecionada pela menor

distância. A partir desta rota inicial, as propriedades passam a ser aplicadas sistematicamente.



**Figura 1: Arquitetura do modelo de simulação**

A Figura 1 ilustra a arquitetura do modelo proposto. A etapa de especificação da arquitetura, conforme o ciclo de vida de M&S [Balci 2012], sucede a definição do modelo conceitual. Nesta etapa são definidas as partes ou componentes do modelo, sua topologia de comunicação e as relações funcionais entre os componentes. As relações funcionais contemplam a especificação de dados que são recebidos e enviados por cada componente no exercício da simulação.

Conforme ilustrado na Figura 1, o componente de configuração define, inicialmente, as propriedades a serem contempladas em um exercício do modelo para análise de melhor rota. Os valores dos parâmetros para cada propriedade também são configurados neste módulo, assim como o conjunto de propriedades que serão habilitadas na execução do modelo. A seleção de propriedades e definição dos valores dos seus parâmetros é prerrogativa do usuário do modelo e depende do tipo de transporte para o qual a rota está sendo gerada. O módulo 'Roteirização por simulação', ilustrado na Figura 1, representa o processamento do modelo para escolha de melhor rota. Os demais módulos representam verificação das informações da rota calculada e a geração de resultados. Alterações na configuração das propriedades pode ser realizada seguida de novo processamento da roteirização.

O processo de roteirização por simulação, então, aplica a configuração das propriedades usando bases de dados da malha rodoviária em análise com base em dados disponíveis no componente *cobertura de sinal* e *pontos de apoio*. As rotas calculadas são então analisadas. Uma revisão das configurações pode ser realizada, por exemplo, para tolerar maiores trechos com sombreamento, seguida de nova execução do modelo. Os dados de roteirização gerados pelo modelo podem ser utilizados para alimentar dispositivos tais como GPS.

#### 4. Infraestrutura de simulação

O modelo proposto possui funcionalidades específicas não disponíveis em ambientes de simulação de propósito geral tais como *Arena* [DiFrischia 2018], *FlexSim*

[Nordgren 2002] e *AnyLogic* [Company 2020]. Neste trabalho foi adotado o ambiente *AnyLogic* que apoia o conceito de simulação baseada em agentes [Collier and Ozik 2013] e possui um conjunto de bibliotecas básicas suficiente para subsidiar as novas funcionalidades que definem o comportamento específico das propriedades do modelo proposto. Também, oferece condições para a codificação de módulos específicos que implementam os processos necessários ao controle do comportamento de cada propriedade.

Esta seção discute a implementação do modelo proposto e sua integração com as funcionalidades básicas do *AnyLogic*<sup>1</sup> (versão *Personal Learning Edition*). Inicialmente, a seção apresenta as operações básicas do *AnyLogic*. Em seguida, discute os principais módulos responsáveis pela carga de dados e formação da malha rodoviária, pontos de apoio e cobertura de sinal de rastreamento. A estratégia para a implementação dos módulos de gerenciamento das propriedades é então apresentada. Os módulos de controle do comportamento da cobertura de sinal, do sombreamento e de área indevida são apresentados. Os módulos que gerenciam as demais propriedades, descritas na Seção 3, foram implementados em mesmo teor.

#### 4.1. Operações básicas do *AnyLogic*

O ambiente *AnyLogic* disponibiliza um conjunto de bibliotecas e funcionalidades básicas suficientes para subsidiar a implementação do comportamento específico do modelo. A implementação atende os requisitos das propriedades especificados no modelo conceitual.

As entidades (veículo, rota, sinal, cidade, cliente) foram representadas como agentes no *AnyLogic*. O comportamento de cada agente é configurado a partir do conjunto prévio de dados sobre o comportamento conhecido (histórico) da entidade do sistema real que o agente representa. Durante a simulação, o comportamento de cada agente sofre influência dos eventos anteriores na linha de tempo simulado. O avanço do tempo simulado é conduzido pelas funcionalidades do *AnyLogic*. A relação de causa e efeito entre agentes está implementada nos módulos específicos do modelo proposto. Por exemplo, o agente *routes* contém as coordenadas do ponto onde o veículo deve parar para operações de carga/descarga. Este agente opera, na simulação, com dados sobre horário de atendimento do ponto e com a quantidade de produtos a serem descarregados. O próximo evento do agente *routes* depende do tempo de ocorrência dos eventos de carga/descarga.

As bibliotecas predefinidas da ferramenta *Anylogic*, utilizadas nos blocos que representam comportamentos de uso geral, não foram aplicadas. Tais bibliotecas não implementam elementos necessários para representar o impacto das propriedades no processamento das rotas por simulação. Assim, a linguagem *Java* foi adotada para implementar o comportamento específico das propriedades. Esta linguagem possui um conjunto de procedimentos suficiente para executar as operações de controle do comportamento dos agentes. Alguns exemplos dos procedimentos são:

- Mover veículo;
- Calcular distância entre veículo e ponto;
- Aumentar ou reduzir a velocidade do veículo.

---

<sup>1</sup><https://www.anylogic.com/>

Por exemplo, o movimento de um veículo é executado através do comando `truck.moveTo(city)`. O `truck` é o agente veículo, `city` são rodovias ou cidades e `moveTo` simula o movimento, através da rota selecionada, para o local destino.

O evento `eventVerifyRoute` efetua comparações entre pontos a partir do raio de análise configurado. Os tempos e distâncias obtidos, como tempo em sombreamento e em área indevida, distância percorrida entre segmentos ou nas áreas a serem evitadas, são analisados em tempo de simulação para obter a melhor alternativa de rota perante a rota inicial. A roteirização por simulação parte de uma rota inicial definida apenas pela menor distância, ou pode ser fornecida como parâmetro de entrada no modelo. Então, ao aplicar o comportamento das propriedades sobre a rota inicial, a simulação realiza alterações sistemáticas nas rotas até identificar a rota que atende todas as propriedades ativas de forma combinada e equilibrada.

As funções `getSpeed()` e `setSpeed()` são utilizadas, respectivamente, para verificar e alterar a velocidade do veículo durante a execução do modelo. O aumento de velocidade ocorre, por exemplo, após uma operação de descarga que torna o veículo mais leve. A redução de velocidade pode ocorrer, por exemplo, quando o veículo acessa um segmento de rota configurado como segmento não pavimentado.

#### 4.2. Módulos de carga e gestão dos dados de configuração do modelo

A solução proposta permite a configuração do modelo para diferentes malhas rodoviárias, pontos de passagem e de carga/descarga nos segmentos de rotas e áreas de cobertura de sinal de telefonia para simulação da rastreabilidade. A configuração dessas informações requer a importação de dados conhecidos da malha rodoviária, paradas e cobertura de sinal de comunicação do sistema real em estudo. A importação dos dados ocorre na fase de configuração do modelo que antecede a sua execução, sem impacto no efetivo exercício do modelo.

Os casos de teste deste trabalho, apresentados na próxima seção, utilizaram uma base de dados de uma empresa do ramo de roteirização e rastreamento, com devida ocultação de informações passíveis de identificação de dados não públicos.

Por exemplo, informações sobre localizações e horários de atendimento aos veículos de transporte são carregados para processar, no modelo, o comportamento nos pontos de parada. Cada agente possui uma tabela própria de dados, importados pelo modelo antes do início da simulação, que são utilizados pelas funcionalidades do modelo durante a execução.

#### 4.3. Integração das propriedades na infraestrutura de simulação

A terceira parte que compõem a infraestrutura necessária ao ciclo de simulação para o modelo proposto é dada pelo conjunto de funcionalidades específicas que implementam o comportamento das propriedades do modelo. Como exemplo, esta seção discute a implementação da propriedade de sombreamento. Utilizando os dados de cobertura de sinal de comunicação configurados no modelo, esta propriedade identifica quando o veículo esta em área sombreada. Ou seja, deixa de enviar sua localização por falta de sinal de telefonia. Esta propriedade é, então, utilizada pela simulação para identificar a rota

mais curta sem sombreamento ou com o menor sombreamento possível. No desenvolvimento das demais propriedades foi aplicado o mesmo método de codificação e integração na infraestrutura de simulação.

**Rotas com áreas de sombreamento:** A função “*eventSignal*”, ou evento de consulta da cobertura do sinal, é executada a cada segundo do tempo simulado. A função verifica se existe disponibilidade de sinal de acordo com o avanço do veículo no percurso da rota. As coleções de dados de cobertura possuem informações sobre os mapas de cobertura de sinal das operadoras de telefonia, conforme carga/configuração desses dados, para realizar a verificação do sinal. O Algoritmo 1 ilustra o procedimento implementado para esta propriedade:

---

**Algoritmo 1** Evento de consulta da cobertura do sinal

---

```

for colecao = 0, 1, 2, . . . do
    busca coleção do veículo
if veículo não esta em coleção then
    for torre = 0, 1, 2, . . . do
        busca torre próxima

```

---

Este modo de verificação é adotado tanto no teste do segmento inicial, e também no teste para os novos segmentos selecionados durante as análises em tempo de simulação. Cada segmento é delimitado pelo trecho de rota que liga o ponto corrente (atual) até o próximo ponto da rota. A função “*eventSignalSegment*” implementa o mesmo algoritmo da função anterior, porém, nos limites do segmento de rota.

A função de verificação da rota, denominado “*eventVerifyRoute*”, realiza as comparações entre diferentes rotas de deslocamento em teste entre paradas origem e destino. Ou seja, assumindo um ponto A origem e um ponto B destino, o algoritmo testa todas as possíveis rotas entre A e B observando as seguintes configurações:

- 1 - menor sombreamento;
- 2 - menor tempo em áreas indevidas;
- 0 - equilíbrio entre 1 e 2.

O algoritmo desta função é ilustrado no Algoritmo 2. Nesta função, os tempos e distâncias obtidos durante os testes das rotas possíveis entre pontos origem e destino são usados para calcular a rota entre A e B que melhor contemple as propriedades conforme configurações 1, 2 ou 0. Assim, em cada mudança, o agente *truck* é redirecionado para um novo ponto que será salvo como resultante dos testes.

Neste exemplo foram consideradas as propriedades de sombreamento e áreas indevidas. A implementação das funções para as demais propriedades do modelo foi conduzida com aplicação do mesmo método. Na execução do modelo, o atendimento das propriedades ocorre de forma conciliada. Por exemplo, se o usuário opta por reduzir o sombreamento, o modelo simula todas as rotas possíveis e seleciona a rota com menor distância que atende a propriedade de sombreamento configurada pelo usuário, buscando o melhor equilíbrio entre distância e redução de áreas sombreadas.

---

**Algoritmo 2** Evento dos testes conforme a prioridade
 

---

```

if primeiro teste a ser executado then
  recebe os dados provenientes da rota predefinida
  if a rota inicial não conter nenhum dado a ser melhorado then
    finaliza os testes
if houver mudanças then
  a prioridade define os valores que serão recebidos
  1 - menor sombreamento
  2 - menor tempo em áreas indevidas
  0 - conciliando ambas
for cidades = 0, 1, 2, . . . do
  procura até encontrar uma cidade ainda não visitada
  envia o veículo para a cidade
if finalizou os testes then
  envia o veículo para uma nova cidade caso houver mudanças
  envia o veículo para a rota normal se não houver mudanças
  
```

---

Na próxima seção são apresentados casos de teste onde a atuação das propriedades no processo de roteirização é experimentada. Resultados e análises são então discutidos.

## 5. Roteirização por simulação: testes e resultados

Esta seção apresenta os casos de testes, resultados e análises. Foram utilizados três cenários de testes. No primeiro cenário (caso de teste 1) o modelo foi configurado para representar o comportamento de uma rota real já percorrida por um veículo de carga. O primeiro objetivo deste caso de teste foi realizar uma análise comparativa entre uma rota real e a mesma rota simulada utilizando o modelo proposto com propriedades desativadas. A rota gerada pelo modelo foi equivalente à rota real, como esperado. O segundo objetivo foi verificar o impacto no comportamento da rota (coluna Descrições na Tabela 1) quando ativadas as propriedades de redução de áreas sombreadas e áreas indevidas. A seção 5.1 apresenta os resultados.

No segundo cenário (caso de teste 2), foi definida uma rota com pontos de parada distribuídos em áreas mais limítrofes da malha rodoviária usada nos testes. O modelo foi simulado, inicialmente, apenas para definição de rota com menor distância. Em seguida, com as propriedades de distância e sombreamento, e distância, sombreamento e áreas indevidas ativadas. O impacto das propriedades na definição das rotas é discutido na seção 5.2.

No terceiro cenário (caso de teste 3), o mesmo cenário do caso de teste 2 foi utilizado, contudo, para verificar o impacto da ativação das propriedades de sombreamento e janelas de atendimento de forma isolada e também combinada. A seção 5.3 discute o teste e resultados.

O número de segmentos de rota calculados para cada roteirização por simulação depende do número de pontos de carga e descarga e o número de rotas que ligam dois pontos. Para cada ponto, a simulação analisa os segmentos de rota para todos os demais

pontos e seleciona o segmento que melhor atende as propriedades ativas naquela execução do modelo. O aumento do número de testes de segmentos de rota em uma simulação é exponencial para cada novo ponto de parada e número de vias de ligação entre dois pontos.

Por exemplo, considerando um modelo com os pontos 1, 2 e 3, sendo a partida e chegada no ponto 1, o modelo testa as rotas entre 1 e 2, entre 1 e 3, 2 e 3. Assumindo que existam 3 rotas entre todos os pontos, são  $3^3$  repetições para calcular a melhor rota. Ou seja, sendo  $P$  o número de pontos de parada e  $R$  o número de rotas entre pontos, o número de repetições para cálculo da melhor rota é dado por  $P^R$ . O número de simulações de segmentos de rota pode ser reduzido pela limitação da variável de 'raio de limitação de pontos' que limita o número de testes a partir de cada ponto. O tempo de processamento de cada simulação, então, varia de acordo com a quantidade de pontos, variável de raio, propriedades ativas e número de segmentos de rotas que ligam os pontos. No modelo mais simples, que considera apenas distância (no caso de teste 1) as simulações consumiram menos de uma hora. No caso de teste 3, ativando a propriedade de janelas de atendimento, o tempo passou de 2 horas. Os testes foram executados em um i7 4790K – 16GB RAM – GTX 1060 6GB.

Ao final do exercício de uma simulação são coletados dados de: tempo de viagem, tempo e distância em área de sombreamento, tempo em áreas indevidas, velocidade máxima e mínima, tempo ocioso, tempo em espera. Além disso, o modelo retorna a previsão de chegada em cada ponto para cada rota gerada. Os testes permitiram validar o comportamento do modelo pela confirmação dos resultados a partir de um conjunto conhecido de dados (rota real) e a observação do impacto na roteirização quando da ativação, combinada, de propriedades. O ambiente também está preparado para executar replicações da simulação completa de roteirização e fornecer, como resultado, os valores médios das replicações.

As funcionalidades que atuam com geolocalização dependem de dados de cobertura de comunicação, ou cobertura de sinal. Nos estudos de caso apresentados neste trabalho, foram utilizados dados públicos sobre a cobertura de sinal GPRS/2G. Os arquivos em formato *shapefile* foram obtidos do site da Anatel<sup>2</sup>. Estes dados de cobertura de sinal são utilizados, em intervalos de 1 segundo, no tempo simulado, para verificar se o veículo esta ou não esta na área de cobertura de cada operadora de telefonia. A propriedade de sombreamento utiliza este serviço do modelo. Na infraestrutura de simulação, os dados são aplicados no trabalho de plotagem das coberturas de sinal em um mapa 2D.

Algumas importações são necessárias para a tomada de decisões que o modelo efetua durante a simulação. A base de dados da ferramenta permite carregar informações agregando fidelidade e detalhamento. Os dados importados são:

- Cidades: permite a alternância da rota em tempo de simulação, permitindo encontrar rotas alternativas para refinar a escolha. Neste arquivo temos a latitude e longitude de todos os pontos que serão utilizados, estes podem ser cidades ou intersecções de rodovias.
- Dados de clientes: nestes dados temos a latitude, longitude e o tempo de permanência do veículo em determinado local, podendo ser um carregamento ou

---

<sup>2</sup><https://sistemas.anatel.gov.br/se/public/cmap.php>

descarregamento. As informações garantem uma acurácia ao definir o tempo de permanência do veículo em tempo de simulação.

- Evitar: as áreas que devem ser evitadas podem ser importadas por meio de sua latitude, longitude e raio. Assim definimos os locais que devemos ignorar caso a configuração esteja habilitada, garantindo a melhor decisão.
- Sinal: os dados obtidos da Anatel, contém algumas informações importantes, são elas, número da estação, operadora, endereço completo e sua latitude e longitude. Com estes dados, permitem aprimorar a decisão ao validar se há uma conexão com alguma operadora.
- Rota: coordenadas dos pontos que serão percorridos para realizar as operações de carga ou descarga, além disso, tempos a porcentagem a ser descarregada, início e fim de horário de atendimento.
- Rodovias: para uma melhor utilização no modelo, foram mapeados as rodovias utilizando o *Google Maps* e com as marcações *GIS* da ferramenta, possibilitou cadastrar os segmentos de rodovias, agrupando-as em uma lista de rodovias, tornando os testes otimizados.

### 5.1. Caso de teste 1

No primeiro estudo de caso, foram envolvidos 8 pontos de parada, incluindo partida e chegada. O modelo foi executado em três configurações distintas: com todas as propriedades desativadas; com a propriedade 'sombreamento' ativada; com as propriedades 'sombreamento' e 'áreas indevidas' ativadas. Em todas as configurações o modelo sempre busca a menor distância que atenda aos requisitos configurado nas propriedades ativas. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

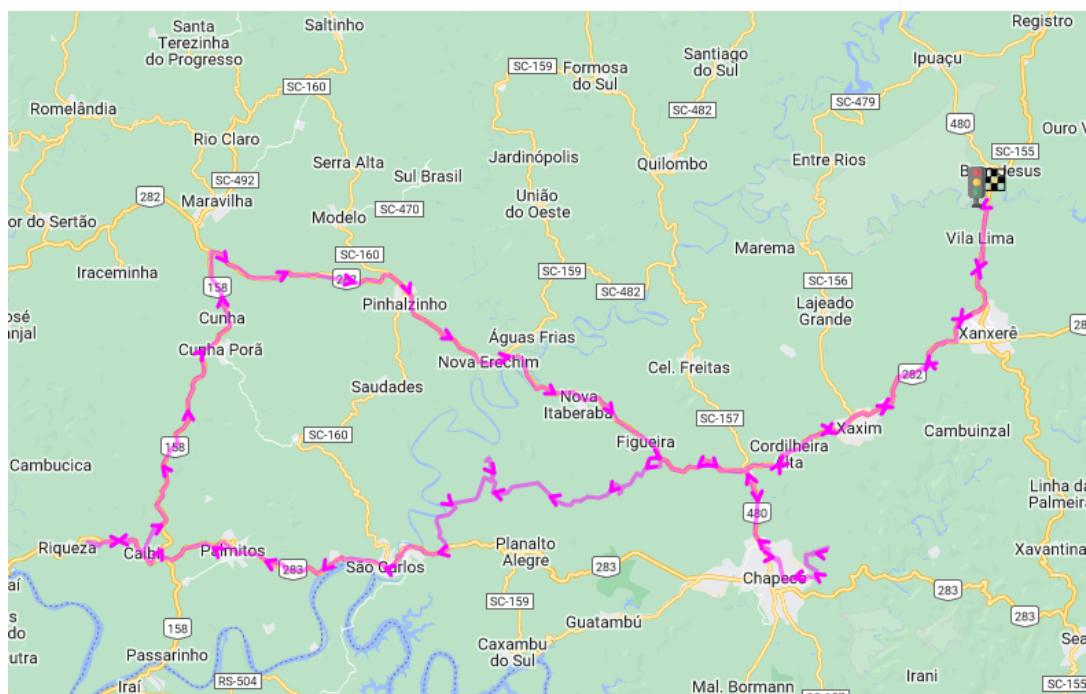
**Tabela 1: Comparação de resultados obtidos na rota 1.**

Rota 1 - tecnologia: 2G				
Descrições	Entrada (rota real)	Simulação Config. de entrada	Sombreamento	Sombreamento e áreas indevidas
H. de início	07:39:03	07:39:03	07:39:03	07:39:03
H. de fim	17:41:57	18:06:17	16:35:22	17:56:58
T. de espera	01:58:35	02:04:02	02:13:11	01:57:56
T. de viagem	10:02:54	10:26:17	08:55:22	10:17:58
T. de sombreamento	07:11:01	05:00:20	04:20:54	04:42:37
T. em área indevida	-	00:18:04	00:17:10	00:00:00
V. média (km/h)	38	40	47	47
V. máxima (km/h)	112	112	112	112
Distância percorrida	339,71	329,97	313,77	388,20

A análise comparativa entre comportamento real (coluna Entrada) da Tabela 1 e simulação com propriedades desativadas (coluna Simulação) demonstra similaridade entre os tempos de espera, tempos de viagem, velocidade média e distância percorrida. Esta observação demonstra a fidelidade do modelo em relação ao comportamento real sob condições equivalentes de roteirização quando nenhuma das propriedades está

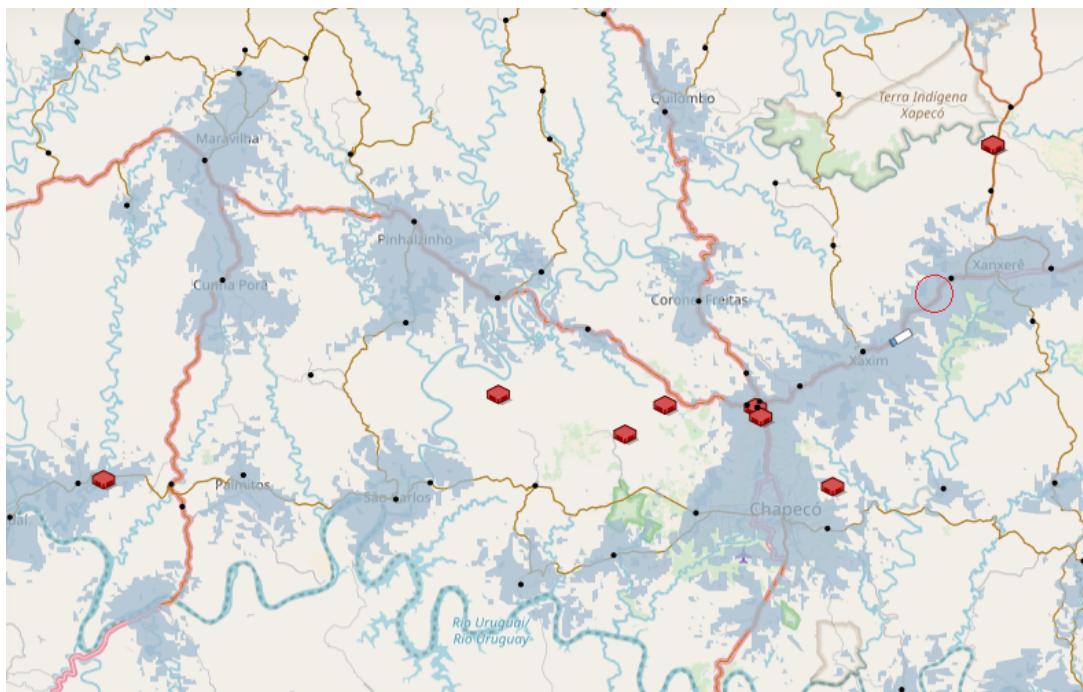
ativa. Observa-se uma diferença no tempo de sombreamento entre ambas. Foi constatada diferença entre as informações de cobertura de sinal fornecidas pelas operadoras e o efectivo tempo de comunicação ativa no percurso real do veículo (coluna Entrada). Ou seja, a diferença provém da discrepancia entre fonte de informações de configuração e dados do comportamento real, não da fidelidade do modelo.

Quando da ativação das propriedades de sombreamento e áreas indevidas, observamos que, na rota gerada, o tempo de permanência em áreas indevidas foi reduzido a zero, ocorreu redução do tempo de permanência em área sombreada, e a velocidade média aumentou. A Figura 3 ilustra, com um círculo em vermelho, a 'área indevida' neste estudo de caso. Na simulação com a propriedade de área indevida habilitada, quando o veículo acessa a área indevida é iniciada a contagem de tempo para todos os segmentos de rodovia. Se o tempo que está nessa área for maior que a tolerância definida, a simulação deste segmento é interrompida e o modelo passa para a simulação de outra rota buscando evitar área indevida. A tolerância de tempo em área indevida pode ser configurada. Por exemplo, se o tempo de permanência em área indevida deve ser menor que 2 min, qualquer rota que exceda esta tolerância é descartada. Ao ativar apenas a propriedade de sombreamento, observa-se aumento da velocidade média e expressiva redução no tempo total da viagem na rota gerada por simulação, além da redução do tempo em área sombreada.

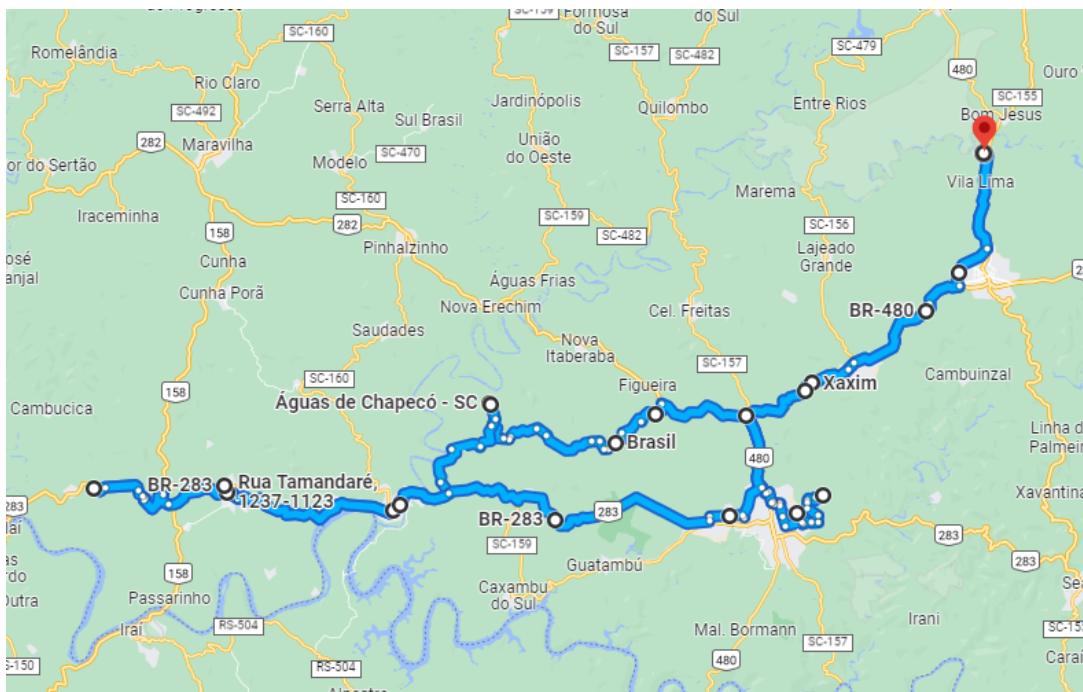


**Figura 2: Cenário 1: Rota real do sistema de rastreamento**

A Figura 2 apresenta a rota real gerada por técnicas tradicionais (coluna Entrada da Tabela 1). Esta rota foi utilizada para validar o modelo. A Figura 3 identifica os pontos de parada da rota em análise. A Figura 4 apresenta a rota gerada por simulação com a propriedade de sombreamento ativada. Observa-se que a rota é distinta da rota original que considera apenas menor distância. Conforme Tabela 1 o tempo de sombreamento

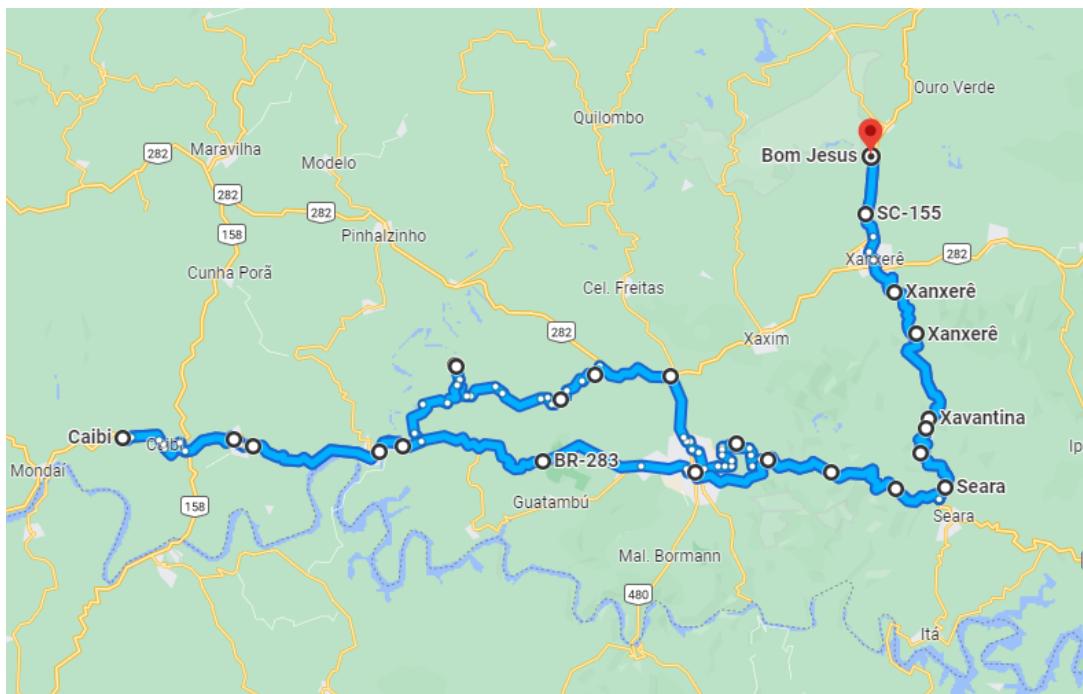


**Figura 3: Cenário 1: Pontos de parada plotados no modelo**



**Figura 4: Cenário 1: Sombreamento**

foi reduzido em aproximadamente 170 minutos. A Figura 5 apresenta a rota gerada por simulação com as propriedades de sombreamento e áreas indevidas ativadas. Observa-se, na Tabela 1 que as rotas indevidas foram evitadas na íntegra.



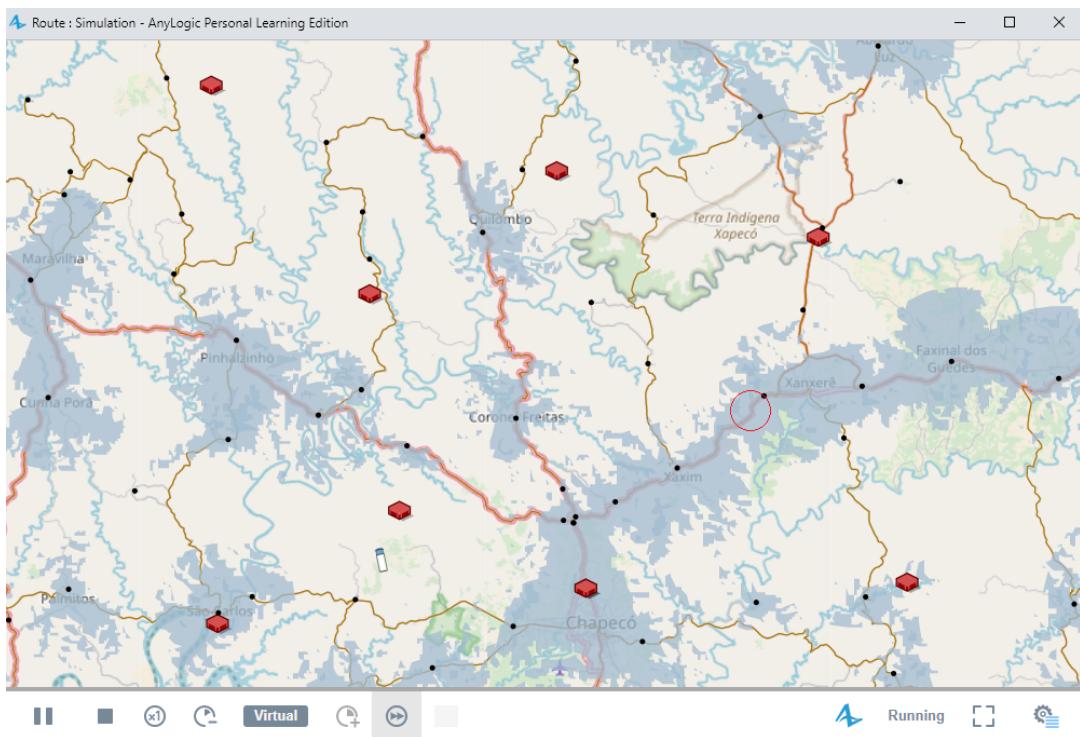
**Figura 5: Cenário 1: Sombreamento e áreas indevidas**

A simulação gerou rotas distintas de acordo com a ativação das propriedades. Observa-se que o modelo de simulação gera a rota que mais se aproxima do atendimento às propriedades ativas, característica não contemplada em técnicas tradicionais.

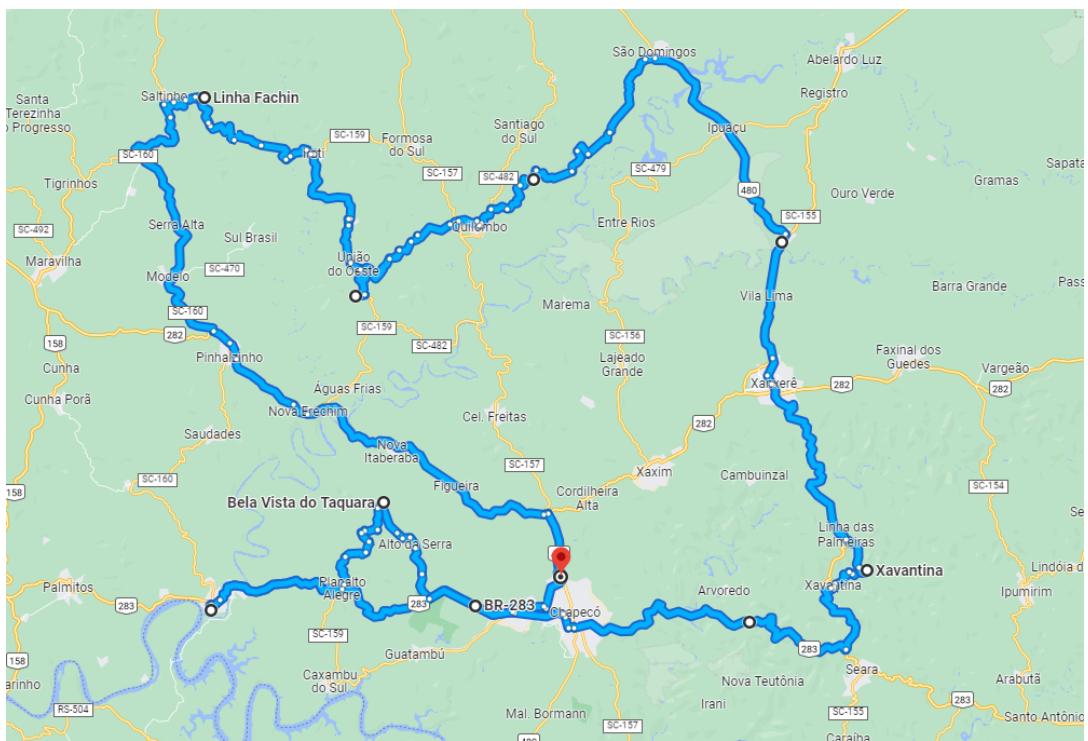
## 5.2. Caso de teste 2

No segundo estudo de caso foi criada uma rota nova, ainda não percorrida por veículos reais, com um conjunto de pontos de parada distribuídos de forma mais abrangente nos limites da mesma malha rodoviária do Caso de Teste 1. Além disso, a distância entre os pontos é similar, varia menos que as distâncias entre pontos no primeiro teste. Para cada ponto, também foram configuradas janelas de atendimento (tratado no caso de teste 3) que aumentam o tempo de espera quando do roteamento apenas por menor distância. Adicionalmente, com distâncias similares entre pontos, o fator distância passa a interferir em menor proporção no cálculo de rotas. O impacto das configurações das propriedades torna-se mais expressivo, permitindo averiguar o impacto da aplicação das propriedades, pelo modelo, no processo de roteirização.

Neste segundo estudo de caso, conforme Tabela 2, a rota gerada por simulação buscando apenas a menor distância submete o veículo ao sombreamento durante 12,5% a mais de tempo comparado com a rota gerada com a propriedade de sombreamento ativa. Ativando também a propriedade de áreas indevidas, a redução da exposição ao sombreamento é mais modesta, contudo, elimina as rotas por áreas indevidas. Além disso, embora a distância tenha crescido 19,7%, a velocidade média evoluiu 12,8%. A redução dos segmentos não pavimentados, provavelmente, foi o fator de maior impacto para esta mudança.

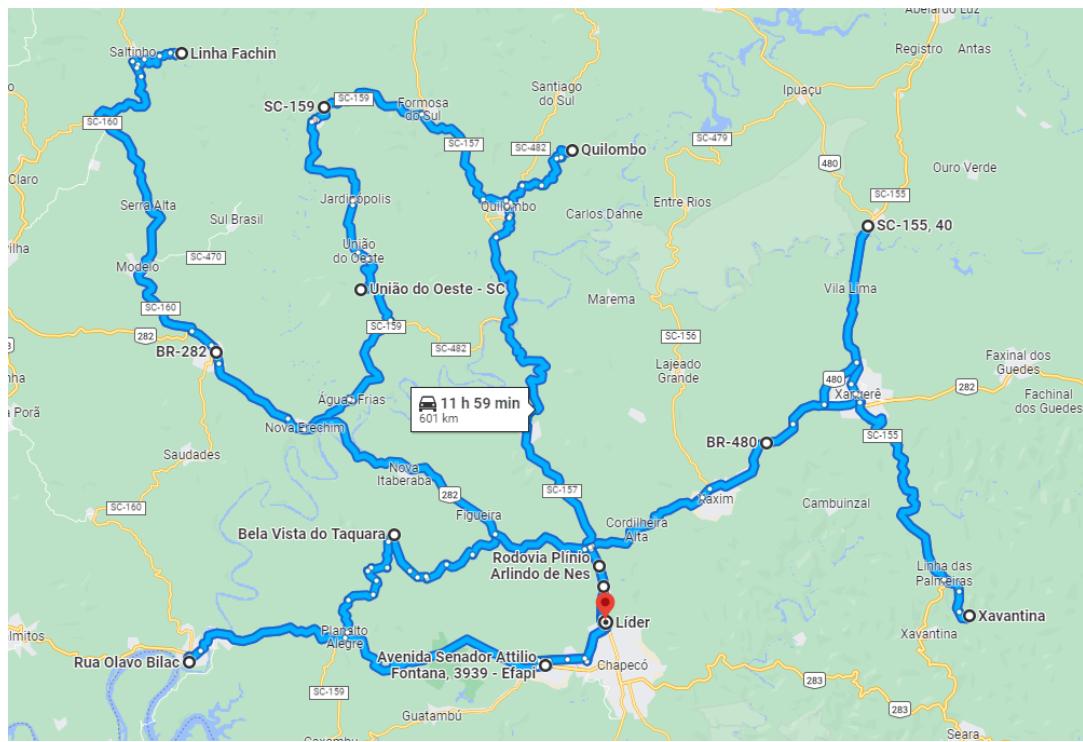


**Figura 6: Cenário 2: Pontos plotados no mapa**

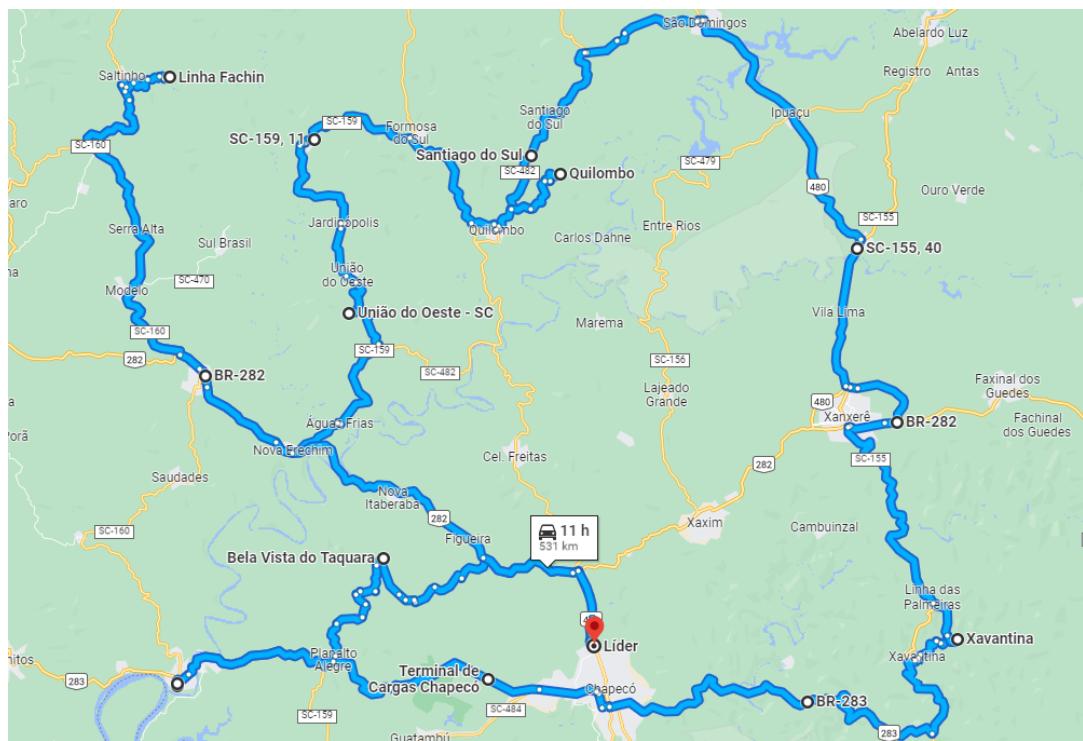


**Figura 7: Cenário 2: Rota inicial: menor distância**

A plotagem dos pontos da rota 2 é apresentada na Figura 6. A Figura 7 mostra a



**Figura 8: Cenário 2: Rota gerada: distância e sombreamento**



**Figura 9: Cenário 2: Rota gerada: distância, sombreamento e áreas indevidas**

rota gerada usando apenas o fator de menor distância. A rota gerada com sombreamento

**Tabela 2: Comparação de resultados obtidos na rota 2.**

Rota 2 - hipotética — tecnologia: 2G - operadora: Tim						
Descrições	Dia	Distância	Dia	Distância Sombreamento	Dia	Distância Sombreamento áreas indevidas
H. de início	1	06:00:00	1	06:00:00	1	06:00:00
H. de fim	1	22:15:22	2	01:51:54	1	23:21:26
T. de espera		02:15:12		02:08:06		02:26:24
T. de viagem		14:35:22		18:12:54		15:41:26
T. de sombreamento		09:54:22		08:41:11		09:33:37
T. em área indevida		00:00:00		00:26:12		00:00:00
V. média (km/h)		39		39		44
V. máxima (km/h)		90		90		90
Distância percorrida		480,33		615,33		575,59

ativo é apresentada na Figura 8 e a rota gerada com as três propriedades ativas é ilustrada na Figura 9. Observa-se que, nesta última configuração, a simulação gerou uma rota com melhor equilíbrio entre as propriedades ativas com modesto aumento do tempo total de viagem.

### 5.3. Caso de teste 3

Usando o mesmo cenário inicial do caso de teste 2, neste estudo de caso foram geradas rotas por simulação ativando a propriedade 'janela de atendimento' em dois momentos. No primeiro, ativamos apenas a propriedade 'janela de atendimento', e no segundo ativamos também o 'sombreamento'.

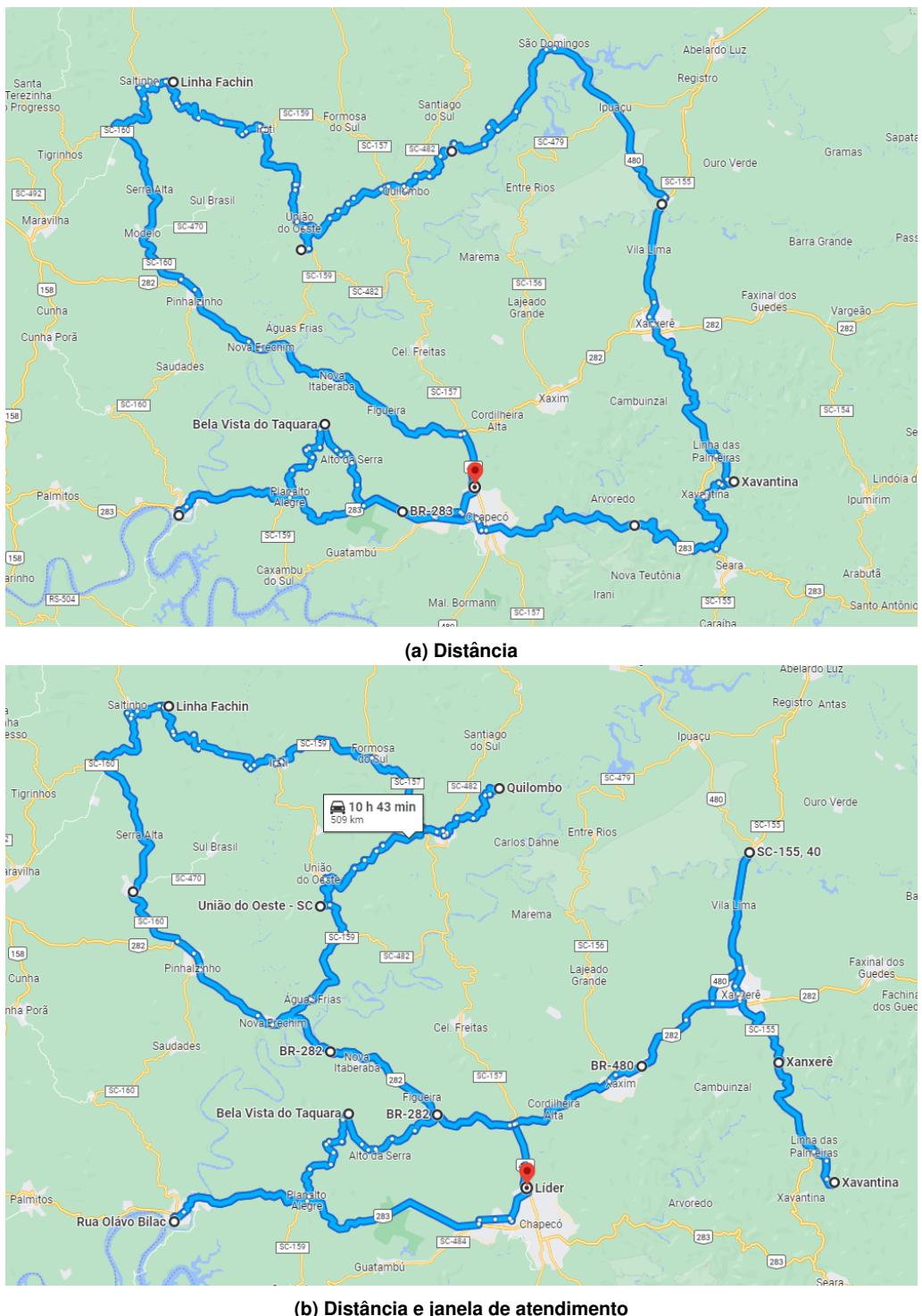
A simulação combinando menor distância e janela de atendimento gerou uma rota alternativa reordenando a ordem de atendimento dos pontos de parada da seguinte forma:

- Original:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$
- Reordenado:  $1 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 9$

Os pontos 1 e 9 são origem e destino, respectivamente, e não foram alterados. A Figura 10(a) ilustra a rota original (menor distância) e a Figura 10(b) demonstra, no mapa, a rota reordenada. Esta propriedade atua para evitar que o veículo consuma tempo aguardando o horário autorizado para início de carga/descarga.

A ativação da propriedade de janela de atendimento reduziu o tempo de viagem em aproximadamente 47% e o percurso aumentou aproximadamente 8% (Tabela 3). Um ganho considerado substancial com grande potencial de impacto na celeridade dos serviços e na redução de custos de logística. Observa-se, também, que o tempo de espera por início de atendimento nas paradas (ociosidade) foi reduzido a zero. A redução do sombreamento é um efeito colateral positivo das alterações na rota, pois esta propriedade não foi ativada neste estudo de caso.

No segundo momento, ativando janela de atendimento e sombreamento, o tempo de espera (ociosidade) se manteve em zero e o tempo de sombreamento foi reduzido



**Figura 10: Rota original e reordenada por janela de atendimento**

em aproximadamente 50%, como observado na Tabela 4. Embora a distância percorrida tenha aumentado em 14%, a velocidade média aumentou 25%. A confluência desses fatores explica a nova redução do tempo de viagem. Aproximadamente 1h26min a menos

**Tabela 3: Rota original vs janela de atendimento.**

Rota 3 - hipotética — tecnologia: 2G				
Janela de atendimento				
Descrições	Dia	Normal	Dia	Otimizando ociosidade
H. de início	1	06:00:00	1	06:00:00
H. de fim	2	18:02:27	2	01:18:50
T. de espera		02:49:48		02:49:47
T. de ociosidade		18:49:00		00:00:00
T. de viagem		36:02:27		19:18:50
T. de sombreamento		28:55:26		12:24:01
T. em área indevida		00:00:00		00:00:00
V. média (km/h)		34		32
V. máxima (km/h)		90		90
Distância percorrida		480,38		521,10

**Tabela 4: Rota original vs janela de atendimento e sombreamento.**

Rota 3 - hipotética — tecnologia: 2G				
Janela de atendimento e sombreamento				
Descrições	Dia	Otimizado	Dia	Sombreamento
H. de início	1	06:00:00	1	06:00:00
H. de fim	2	01:18:50	1	23:52:45
T. de espera		02:49:47		02:50:45
T. de ociosidade		00:00:00		00:00:00
T. de viagem		19:18:50		17:52:45
T. de sombreamento		12:24:01		08:45:28
T. em área indevida		00:00:00		00:00:00
V. média (km/h)		32		40
V. máxima (km/h)		90		90
Distância percorrida		521,10		596,02

que a rota com janela de atendimento ativa.

#### 5.4. Análise geral, fragilidades e potencialidades

Os estudos de caso demonstram a variação das rotas geradas pelo modelo de acordo com as diferentes configurações de propriedades ativas em cada um dos estudos de caso. O primeiro estudo de caso, como primeiro teste, comprova que o modelo é fidedigno ao roteiro real gerando roteiro equivalente quando apenas a propriedade de menor distância está ativa. Uma vez validado, a simulação com menor distância e sombreamento ativas gera nova rota com uma redução de aproximadamente 2h50min no tempo de viagem com sombreamento e com redução de 16 minutos no tempo total de viagem (Tabela 1). São evidências que validam o propósito do modelo.

Em resumo, os estudos de caso validam o mérito das estratégias propostas na concepção de um modelo de simulação que incorpora, de forma configurável, proprieda-

des não previstas de modo combinado em técnicas tradicionais de roteirização. Agregar celeridade e redução de custos em uma das operações que compõem os complexos sistemas de cadeias de distribuição e fornecimento tem particular impacto positivo econômico e social.

No decorrer do trabalho identificamos eventos, como por exemplo interrupções e lentidão no tráfego, que pode ser incorporados como propriedades. No entanto, não há previsão, na concepção do modelo, de estratégias para integração de novas propriedades em nível de interface. Para isso, intervenção em nível de desenvolvimento, com impacto no código que implementa as propriedades atuais, é necessário. Aspecto visto como fragilidade. Outra demanda, que está em desenvolvimento em trabalho de continuidade, é a construção de uma interface de configuração e execução do modelo. A interface está sendo desenvolvida na perspectiva de MaaS (Simulação como Serviço) [Cayirci 2013].

## 6. Conclusão e perspectivas

A assertividade nos processos de roteirização de veículos de carga reverbera substancialmente na gestão de uma ampla gama de atividades dependentes de processos logísticos. Além da menor distância, a roteirização também envolve variadas propriedades, ou fatores, com impacto significativo na produtividade e custos das rotas, geralmente não contempladas em estratégias tradicionais de roteirização.

Este trabalho apresentou uma solução para roteirização por simulação multifatores. O modelo proposto permite a configuração de múltiplas propriedades permitindo gerar rotas que atendem, além da menor distância, requisitos específicos e especializados para diferentes tipos de carga. Durante a simulação, o modelo identifica a rota que melhor atende os parâmetros das propriedades de forma interdependente, conciliada e equilibrada. Os resultados são úteis para apoio a decisão na perspectiva de sistemas de informação. As contribuições estão alinhadas com os grandes desafios 2016-2026 em sistemas de informação. Como abordado no Capítulo 9 dos grandes desafios, a interoperabilidade entre sistemas desenvolvidos em separado deriva na necessidade de estratégias de desenvolvimento colaborativo, entre organizações e seus sistemas de informação, para modelagem e execução de ações integradas, princípios naturais em modelagem e simulação de sistemas.

Nos estudos de caso, a roteirização por simulação multifatores se mostrou efetiva. A análise do impacto da ativação de diferentes subconjuntos de propriedades também demonstrou a versatilidade na configuração do modelo para atendimento de diferentes níveis de requisitos segundo os perfis de cargas.

Como trabalhos futuros, estão previstos estudos para incorporar ao modelo o trato de novas propriedades e a construção de interface que permita a operação do modelo na perspectiva de modelagem e simulação como serviço (MaaS) [Arcaini et al. 2015]. A adição de novas propriedades não requer intervenção na implementação do modelo, limitando a versatilidade para integrar propriedades não previstas e que possam ser relevantes em cenários distintos dos experimentados.

Atualmente, a configuração e operação do modelo requer intervenção nos blocos de código e carga de arquivos de dados. A falta de uma camada de abstração para operação

do modelo é fator limitante. Neste sentido, estão previstos, como trabalhos futuros, a construção de uma interface para configuração e operação do modelo em nível de usuário na perspectiva de MaaS.

Estudos de caso demonstraram que o modelo representou o comportamento de uma rota real conhecida. Nesse contexto, elencamos como perspectiva de continuidade do trabalho a aplicação de abordagens, tais como Dynamic-SoS [Manzano et al. 2020], na validação do modelo.

A M&S proporciona recursos e conceitos importantes no trato de processos no campo de logística de transportes. A possibilidade de prévia análise de cenários distintos para definição de rotas tem potencial destacado para melhorias na economicidade, celeridade e segurança na roteirização para veículos de carga. Inclusive, permitindo interoperabilidade com sistemas de informação que façam uso de dados logísticos no apoio a tomada de decisões.

## Referências

[Arcaini et al. 2015] Arcaini, P., Riccobene, E., and Scandurra, P. (2015). Modeling and validating self-adaptive service-oriented applications. *SIGAPP Appl. Comput. Rev.*, 15(3):35–48.

[Arnold et al. 2019] Arnold, F., Gendreau, M., and Sørensen, K. (2019). Efficiently solving very large-scale routing problems. *Comput. Oper. Res.*, 107(C):32–42.

[Balci 2012] Balci, O. (2012). A life cycle for modeling and simulation. *SIMULATION*, 88(7):870–883.

[Barboza et al. 2019] Barboza, T., Baião, F. A., and Santoro, F. M. (2019). A logic-based approach to automatically validate knowledge-intensive processes. *iSys - Brazilian Journal of Information Systems*, 12(1):76–99.

[Barcelos et al. 2022] Barcelos, B. F., Daysemara Cotta, M., Andrade, G. S., Costa, M. T. D., and Silva, V. R. d. (2022). Aplicação do problema do caixeiro viajante para otimizar rota de entrega em uma distribuidora. *Revista de Logística da FATEC-Carapicuíba*, (2):45–56.

[Boscarioli et al. 2017] Boscarioli, C., Araujo, R. M. d., and Suzana Maciel, R. (2017). *I GranDSI-BR: Grand Research Challenges in Information Systems in Brazil 2016-2026*. Sociedade Brasileira de Computação.

[Carson 2004] Carson, J. S. (2004). Introduction to modeling and simulation. In *Proceedings of the 36th Conference on Winter Simulation*, WSC '04, page 9–16. Winter Simulation Conference.

[Cayirci 2013] Cayirci, E. (2013). Modeling and simulation as a cloud service: a survey. In *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World*, WSC '13, page 389–400. IEEE Press.

[Collier and Ozik 2013] Collier, N. and Ozik, J. (2013). Test-driven agent-based simulation development. In *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World*, WSC '13, page 1551–1559. IEEE Press.

[Company 2020] Company, A. (2020). Anylogic 8.7.4 university version.

[da Silva and Pasin 2022] da Silva, M. and Pasin, M. (2022). Simulation as support to evaluate umps. In *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.

[D'Angelo et al. 2017] D'Angelo, G., Ferretti, S., and Ghini, V. (2017). Modeling the internet of things: a simulation perspective. In *2017 International Conference on High performance Computing Simulation (HPCS)*, pages 18–27.

[DiFrischia 2018] DiFrischia, T. (2018). Scenario analysis with arena simulation. In *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, WSC '18, page 4250. IEEE Press.

[Falvo et al. 2018] Falvo, V., Scalise, M., Lupia, F., Casella, P., and Cannataro, M. (2018). A cooperative vehicle routing platform for logistic management in healthcare. In *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Bioinformatics, Computational Biology, and Health Informatics*, BCB '18, page 689–692, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

[França and Travassos 2015] França, B. B. and Travassos, G. (2015). Experimentation with dynamic simulation models in software engineering: planning and reporting guidelines. *Empirical Software Engineering*, 21.

[Garrido and Castro 2012] Garrido, P. and Castro, C. (2012). A flexible and adaptive hyper-heuristic approach for (dynamic) capacitated vehicle routing problems. *Fundam. Inf.*, 119(1):29–60.

[Graciano Neto et al. 2011] Graciano Neto, V. V., Teles, R. M., Ivamoto, M., Mello, L. H. S., and de Carvalho, C. L. (2011). Um sistema de apoio à decisão baseado em agentes para tratamento de ocorrências no setor elétrico. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, 17(2):139–153.

[Hakim and Abbas 2019] Hakim, I. M. and Abbas, F. M. H. (2019). Optimization model of truck utilization to minimize outbound logistics cost. In *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial and Business Engineering*, ICIBE '19, page 62–66, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

[Lee and Farahmand 2010] Lee, E. and Farahmand, K. (2010). Simulation of a base stock inventory management system integrated with transportation strategies of a logistic network. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, WSC '10, page 1934–1945. Winter Simulation Conference.

[Li et al. 2022] Li, N., Haralambides, H., Sheng, H., and Jin, Z. (2022). A new vocation queuing model to optimize truck appointments and yard handling-equipment use in dual transactions systems of container terminals. *Computers Industrial Engineering*, 169:108216.

[Manzano et al. 2020] Manzano, W., Graciano Neto, V., and Nakagawa, E. (2020). Simulation of systems-of-systems dynamic architectures. pages 245–254.

[Molina et al. 2023] Molina, S., Costa, M., Nazário, A., Paiva, D., and Cagnin, M. (2023). Cenários abstratos de tratamento de exceções na interoperabilidade de processos-de-

processos de negócios. In *Anais do V Workshop em Modelagem e Simulação de Sistemas Intensivos em Software*, pages 11–20, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.

[Nordgren 2002] Nordgren, W. B. (2002). Flexsim: Flexsim simulation environment. In *Proceedings of the 34th Conference on Winter Simulation: Exploring New Frontiers*, WSC '02, page 250–252. Winter Simulation Conference.

[Novaes et al. 2011] Novaes, A. G., Burin, P. J., Bez, E. T., and Scholz-Reiter, B. (2011). Roteirização dinâmica de veículos usando simulação e algoritmo genético. *Transportes*, 19(3):85–92.

[Palhares et al. 2019] Palhares, R. A., Palhares, R. A., and Araujo, M. C. B. (2019). Roteirização de veículos: Aplicação do problema do caixeiro viajante em uma distribuidora de laticínios. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, 11(2):105–126.

[Rahman et al. 2024] Rahman, S. M. A., Rahman, M. F., Tseng, T.-L. B., and Kamal, T. (2024). A simulation-based approach for line balancing under demand uncertainty in production environment. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, WSC '23, page 2020–2030. IEEE Press.

[Robinson 2013] Robinson, S. (2013). Conceptual modeling for simulation. In *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World*, WSC '13, page 377–388. IEEE Press.

[Ruiz-Torres and Tyworth 1997] Ruiz-Torres, A. J. and Tyworth, J. E. (1997). Simulation based approach to study the interaction of scheduling and routing on a logistic network. In *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation*, WSC '97, page 1189–1194, USA. IEEE Computer Society.

[Santos et al. 2020] Santos, J., Neto, V. G., and Nakagawa, E. (2020). Business process modeling in systems of systems. In *Anais do II Workshop em Modelagem e Simulação de Sistemas Intensivos em Software*, pages 26–35, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.

[Sarjoughian 2006] Sarjoughian, H. S. (2006). Model composability. In *Proceedings of the 38th Conference on Winter Simulation*, WSC '06, page 149–158. Winter Simulation Conference.

[Silva et al. 2024] Silva, T., Nascimento, M. G., Valença, G., Lira, B., Fraga, G., Miranda, L., Olivia, M., Peixoto, S., and Andrade, E. (2024). Mapping and improvement of processes in the public sector: An experience report at the public ministry of accounts of pernambuco. *iSys - Brazilian Journal of Information Systems*, 17(1):2:1 – 2: 25.

[Teixeira et al. 2019] Teixeira, P. G., Lehtag, B. G. A., de Oliveira, L. W., de Carvalho, S. T., Veiga, E. F., and de Sousa Rocha, C. (2019). Modeling and simulation of a smart street lighting system. In *Anais do I Workshop em Modelagem e Simulação de Sistemas Intensivos em Software*, pages 44–48, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.

[Zong et al. 2022] Zong, Z., Wang, H., Wang, J., Zheng, M., and Li, Y. (2022). Rbg: Hierarchically solving large-scale routing problems in logistic systems via reinforcement learning. In *Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, KDD '22, page 4648–4658, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.