

# Documento de Requisitos - Iterum

Versão 0.5 – Setembro, 2025

## Ficha Técnica

Equipe Responsável pela Elaboração:

- Arthur Willyams
- Guilherme Firpo
- Gustavo Souto
- Kaylane Justino
- Thais Silveira
- Luiz Felipe

**Público Alvo:** Comutadores locais / estudantes e funcionários da FAFIRE e Nova Roma, Pequenas empresas de entrega, Pesquisadores e estudantes de Computação / Mobilidade, usuários de apps de navegação alternativos, Prefeituras / órgãos de planejamento urbano ou startups / fornecedores de mobilidade.

**Dúvidas, críticas e sugestões:** Encaminhar por escrito para o endereço postal: Rua Padre Carapuzeiro, 590, Boa Viagem, Recife PE, 51020-280 ou para o endereço eletrônico: [arthur.soares@novaroma.edu.br](mailto:arthur.soares@novaroma.edu.br). Recomenda-se identificar o assunto com o título desta obra e o remetente com nome e endereço completos para envio de respostas.

## Sumário

---

1	Introdução				
2	Contexto				(Background)
2.1.	Necessidades		Valor	dos	Stakeholders
2.2.			do		Esperado
2.3.	Escopo			Negócio	(Reduzido)
2.4.	Restrições e Premissas				
3	Motivação		e		Tecnologias
3.1.	Motivação		Acadêmica	e	Prática
3.2.	Tecnologias de Apoio				
4	Bases de Dados para Análise				
5	Modelagem da Rede		de	Transporte	do Recife
5.1.	Componentes		do	Grafo	Multimodal

5.2.	Exemplo	Simplificado	da	Estrutura	do	Grafo
5.3.	Visualização do Grafo					
6	Complexidade		e			Algoritmos
6.1.		Níveis	de			Complexidade
6.2.	Algoritmos Propostos					
7	Oportunidades de Negócio					
8	Métricas		de			Sucesso
8.1.	Métricas	de	Desempenho	e		Algoritmo
8.2.	Métricas	de	Eficiência			Operacional
8.3.	Métricas de Satisfação e Usabilidade					
9	Visão Estratégica					

## 1. Introdução

---

Este documento especifica o sistema Iterum, fornecendo aos desenvolvedores as informações necessárias para o projeto e implementação, assim como para a realização dos testes e homologação do sistema. Destina-se igualmente a membros da equipe de produto, pesquisadores envolvidos na comparação de algoritmos, gestores de frotas e potenciais parceiros institucionais (ex.: prefeituras ou empresas de logística) que necessitem compreender o escopo do projeto, as metas de negócio e os critérios de sucesso adotados. O objetivo deste documento é reunir, de forma clara e concisa, os requisitos de negócio, o contexto (background), as oportunidades identificadas, os objetivos de negócio, as métricas que serão usadas para avaliar o sucesso e a visão estratégica de longo prazo do Iterum.

---

## 2. Contexto (Background)

O projeto Iterum surge a partir da necessidade de enfrentar os desafios de mobilidade urbana vivenciados diariamente no trajeto entre a FAFIRE e Nova Roma, em Recife. Esse percurso é marcado por fatores que dificultam a previsibilidade e a eficiência do deslocamento, como trânsito intenso em horários de pico, variações climáticas, acidentes e diferentes condições das vias. Essas situações impactam negativamente estudantes, trabalhadores e motoristas que realizam o trajeto, gerando perdas de tempo, aumento de custos e maior exposição a riscos de segurança.

### 2.1. Necessidades dos Stakeholders

Os stakeholders do Iterum possuem diferentes expectativas e necessidades que orientam o desenvolvimento do sistema:

- **Usuários finais (estudantes, trabalhadores e motoristas):** Necessitam de rotas mais rápidas, seguras e adaptáveis às condições em tempo real.

- **Gestores institucionais:** Buscam maior confiabilidade na mobilidade entre locais de interesse, além de dados que possam apoiar decisões estratégicas.
- **Pesquisadores e patrocinadores acadêmicos:** Esperam que o sistema forneça evidências comparativas de algoritmos e promova avanços na análise de problemas de mobilidade.
- **Empresas de logística e transporte:** Identificam a oportunidade de reduzir custos operacionais e aumentar a produtividade por meio de rotas otimizadas.

## 2.2. Valor Esperado

O Iterum foi concebido para entregar valor tanto tangível quanto intangível. Entre os benefícios concretos, espera-se a redução do tempo de deslocamento, a diminuição dos custos operacionais com transporte, o aumento da segurança em trajetos críticos e a melhoria da confiabilidade nas previsões de rotas. Do ponto de vista intangível, o sistema deve fortalecer a imagem institucional por meio da inovação tecnológica, oferecer suporte à pesquisa acadêmica e estimular práticas mais sustentáveis de mobilidade. Dessa forma, o projeto não apenas resolve problemas imediatos, mas também gera impactos estratégicos e de longo prazo para organizações e sociedade.

## 2.3. Escopo do Negócio (Reduzido)

O escopo do Iterum abrange diferentes áreas impactadas, como mobilidade urbana, logística acadêmica e empresarial, análise de dados e planejamento estratégico. Os processos que serão transformados incluem a definição de rotas, o planejamento de transporte, a coleta e utilização de dados de mobilidade e a avaliação de cenários para apoiar decisões acadêmicas e organizacionais.

Para esta fase do projeto, o escopo foi **reduzido e focado** nas seguintes variáveis:

- **Horário:** Análise e otimização de rotas especificamente para o período das **17h às 19h** (horário de pico).
- **Ponto de Partida:** FAFIRE
- **Ponto de Destino:** FNR (Faculdade Nova Roma)
- **Modais:** Exclusivamente **Uber (Moto ou Carro)**, considerando trajetos ininterruptos.
- **Limite de Rotas:** Foco em **3 rotas principais** que utilizam as vias Conde da Boa Vista, Agamenon Magalhães ou Cais de Santa Rita para acessar via Pina ou Via Mangue.

O sistema não contempla, nesta primeira fase, a integração total com todos os sistemas de transporte urbano nem a gestão completa de frotas empresariais, funcionalidades que podem ser consideradas em fases futuras.

## 2.4. Restrições e Premissas

O projeto Iterum está sujeito a algumas restrições importantes: o orçamento é limitado ao escopo acadêmico, existe dependência de dados externos (como APIs de mapas) e há a necessidade de cumprir os prazos definidos pelo cronograma acadêmico. Além disso, algumas premissas foram estabelecidas, como a disponibilidade de dados confiáveis de mobilidade, o

engajamento efetivo dos stakeholders e a possibilidade de futuras expansões para integrar novas funcionalidades e contextos urbanos.

---

### 3. Motivação e Tecnologias

#### 3.1. Motivação Acadêmica e Prática

A motivação do Iterum é dupla. No âmbito prático, busca-se oferecer uma ferramenta capaz de otimizar deslocamentos e melhorar a experiência dos usuários, contribuindo para maior eficiência e segurança no transporte urbano. No campo acadêmico, o sistema se propõe a servir como um ambiente de experimentação e comparação de algoritmos, destacando-se de outras soluções de mobilidade urbana por aliar rigor teórico e aplicação prática em um contexto real. Do ponto de vista acadêmico, a proposta fundamenta-se na aplicação da teoria dos grafos, utilizada para modelar a rede urbana e representar os elementos que compõem a mobilidade na região. A análise de algoritmos de caminho mínimo — como Dijkstra, A\*, Bellman-Ford e Floyd-Warshall — permite explorar diferentes estratégias de otimização de rotas, avaliando seus pontos fortes e limitações em cenários reais. Além disso, a perspectiva de complexidade computacional agrega um caráter diferenciado ao projeto, permitindo discutir problemas de difícil resolução, como roteamento de múltiplos veículos e carpooling, frequentemente classificados como NP-difíceis.

#### 3.2. Tecnologias de Apoio

Para viabilizar essa proposta, foram definidas tecnologias que permitem tanto a coleta quanto a análise eficiente dos dados. O desenvolvimento será conduzido em Python, utilizando bibliotecas como NetworkX para manipulação de grafos, OSMnx e dados do OpenStreetMap para mapeamento urbano, e eventualmente a Google Maps API como recurso complementar. Ferramentas como Jupyter Notebook e Graphviz serão empregadas para experimentação, visualização e documentação dos resultados, enquanto formatos como CSV e JSON viabilizarão o armazenamento estruturado das informações.

##### 3.2.1. Análise de Séries Temporais e Variações Sazonais

A análise das variações sazonais é fundamental para garantir que as previsões de tempo de viagem do sistema Iterum sejam precisas e reflitam a realidade dinâmica do trânsito. A partir dos dados de velocidade das vias do Portal de Dados Abertos da Cidade do Recife, podemos identificar padrões de comportamento de tráfego que se repetem em diferentes horários do dia e dias da semana.

O **Método da Porcentagem para Média Móvel** será usado para isolar os padrões sazonais do tráfego. O procedimento será o seguinte:

- 10 **Coleta e Agrupamento de Dados:** Os dados de velocidade média das vias, disponíveis em intervalos de 15 minutos, serão agrupados por hora e por dia da semana para o período de pico (17h-19h).

- 11 **Cálculo da Média Móvel:** Uma média móvel de 7 dias será calculada para cada hora do dia. Isso suavizará as flutuações diárias e nos dará uma tendência de longo prazo da velocidade do tráfego.
- 12 **Determinação do Índice Sazonal:** Para cada hora do dia, o valor real da velocidade será dividido pela média móvel correspondente. A média dessas razões para todas as semanas nos dará o índice sazonal para aquela hora. Por exemplo, se o índice sazonal para 18h for 0.75, significa que a velocidade média nesse horário é, em geral, 25% menor do que a média geral, o que indica um congestionamento.

A utilização de modelos de Série Temporal é essencial para o projeto Iterum, pois os dados de tráfego exibem uma dependência temporal clara. Ignorar essa dependência resultaria em previsões imprecisas e em um algoritmo de otimização de rotas ineficaz. Para o projeto, a adoção de um modelo de Série Temporal permitirá:

- **Previsão de Curto Prazo:** Estimar o tempo de viagem para o futuro próximo, utilizando dados em tempo real para ajustar a otimização da rota.
- **Ajuste Dinâmico:** O sistema poderá se adaptar a condições inesperadas, como um acidente ou um evento que altere o fluxo, ajustando as previsões com base nos dados mais recentes.

O modelo **Prophet** será o principal candidato para essa tarefa, sendo robusto, flexível e especialmente projetado para dados com forte sazonalidade e feriados, o que se alinha perfeitamente com o comportamento do trânsito urbano. Além disso, sua facilidade de uso o torna uma excelente escolha para a fase acadêmica do projeto.

### 3.2.2. Modelo de Regressão para Previsão de Tempo de Viagem

Para a modelagem dos dados do projeto Iterum, as seguintes variáveis serão utilizadas:

- **Variável Dependente:**
  - **Tempo de Viagem por Trecho (aresta):** O tempo, em minutos, necessário para percorrer cada segmento da via. Esta é a variável-chave que o modelo de regressão buscará prever.
- **Variáveis Independentes:**
  - **Distância do Trecho:** O comprimento de cada segmento de via em quilômetros.
  - **Horário:** O horário específico do dia (entre 17h e 19h).
  - **Modal:** Variável categórica que diferencia Uber Carro e Uber Moto.
  - **Condição Climática:** Variável categórica (ex: ensolarado, chuvoso, nebuloso), que pode ser obtida por meio de APIs de clima.
  - **Índice de Segurança:** Um valor numérico para cada trecho, baseado nos dados de sinistros (acidentes) da CTTU.
  - **Dia da Semana:** Variável categórica (segunda a sexta).
  - **Ocorrências de Trânsito:** Variável binária (0 ou 1) que indica a presença de acidentes, obras ou outros incidentes que afetam o fluxo.

O modelo de regressão linear múltipla terá como objetivo prever o tempo de viagem de um trecho de via. O esboço do modelo, com base nas variáveis definidas, é o seguinte:

$$\text{TempoViagem} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Distancia} + \beta_2 \cdot \text{Horario} + \beta_3 \cdot \text{Modal} + \beta_4 \cdot \text{Clima} + \beta_5 \cdot \text{Seguranca} + \beta_6 \cdot \text{DiaSemana} + \beta_7 \cdot \text{Ocorrencia} + \epsilon$$

Onde:

- TempoViagem: Variável dependente.
  - $\beta_0$ : Intercepto do modelo.
  - $\beta_1, \dots, \beta_7$ : Coeficientes que representam o impacto de cada variável independente no tempo de viagem.
  - Distancia: Variável contínua.
  - Horario: Variável contínua ou codificada.
  - Modal, Clima, DiaSemana, Ocorrencia: Variáveis categóricas que serão convertidas em variáveis "dummy" (binárias) no momento da implementação.
  - Seguranca: Variável contínua, representando um índice de segurança.
  - $\epsilon$ : Termo de erro aleatório.
- 

## 4. Bases de Dados para Análise

Para a modelagem e análise da rede de transporte, serão utilizadas as seguintes bases de dados e fontes de informação:

- **Portal de Dados Abertos da Cidade do Recife:**
  - **Velocidade das Vias - Quantitativo por Velocidade Média (2016-2025):** Conjuntos de dados anuais que apresentam os quantitativos de veículos por velocidade média em intervalos de 15 minutos. Formatos: JSON, CSV. (Relevante para análise de tráfego no horário especificado).
    - Links: [2025](#), [2024](#), [2023](#), [2022](#), [2021](#), [2019](#), [2018](#), [2016](#)
  - **Registro de velocidade das vias 2013 - 2016:** Informações do fluxo de veículos das vias monitoradas com quantidade de veículos e velocidade média em intervalos de 15 minutos. Formatos: CSV, JSON. (Pode complementar os dados de velocidade).
    - Link: [Registro de velocidade das vias 2013 - 2016](#)
  - **Registro das Infrações de Trânsito:** Relação das multas de trânsito registradas pela CTTU. Formatos: PDF, JSON, CSV. (Pode indicar pontos de maior fiscalização ou problemas de tráfego).
    - Link: [Registro das Infrações de Trânsito](#)
  - **Chamados de Sinistros (Acidentes) de Trânsito com e sem vítimas 2015 a 2024:** Dados de acidentes de trânsito. Formatos: CSV, JSON. (Relevante para análise de segurança das rotas).
    - Link: [Chamados de Sinistros \(Acidentes\) de Trânsito com e sem vítimas 2015 a 2024](#)
  - **Malha Ciclovária do Recife:** Dados georreferenciados da malha ciclovária. Formatos: CSV, GeoJSON, JSON. (Menos relevante para modais Uber, mas útil para contexto geral de mobilidade).

- Link: [Malha Ciclovitária do Recife](#)
  - **Malha Viária de Trens do Grande Recife:** Dados sobre o sistema de trens urbanos. Formatos: GeoJSON, JSON. (Menos relevante para modais Uber, mas útil para contexto multimodal).
    - Link: [Malha Viária de Trens do Grande Recife](#)
  - **Google Maps API:** Para obtenção de dados de rotas, tempo de viagem em tempo real e informações de tráfego, essenciais para a calibração do modelo no horário de pico.
  - **OpenStreetMap (OSM):** Para dados de mapeamento urbano detalhados, que servirão de base para a construção da topologia da rede.
  - **Consórcio Grande Recife de Transporte Metropolitano:** Para informações adicionais sobre o transporte público na região metropolitana, que podem complementar a compreensão do fluxo de tráfego, embora o foco seja em modais privados. Link: <https://www.granderecife.pe.gov.br/>
- 

## 5. Modelagem da Rede de Transporte do Recife

A modelagem da rede de transporte do Recife será realizada por meio de um Grafo Multimodal, conforme as especificações de escopo reduzido. Os nós do grafo representarão pontos de parada e interconexão, e as arestas representarão os trechos de deslocamento, com atributos que refletem as características do trajeto no horário de pico (17h-19h) para os modais Uber (Moto ou Carro).

### 5.1. Componentes do Grafo Multimodal

#### Nós (Vértices)

Os nós do grafo representarão pontos geográficos relevantes na rede de transporte, incluindo:

- **Nó de Origem:** FAFIRE
- **Nó de Destino:** FNR (Faculdade Nova Roma)
- **Nós de Interconexão/Pontos Chave nas Rotas:**
  - Início/Fim das vias principais (Conde da Boa Vista, Agamenon Magalhães, Cais de Santa Rita).
  - Entradas/Saídas para Via Pina e Via Mangue.
  - Principais cruzamentos e pontos de decisão ao longo das rotas.
  - Pontos de interesse ou gargalos de tráfego conhecidos no horário de pico.

#### Arestas (Conexões)

As arestas representarão os trechos de deslocamento entre os nós. Cada aresta terá os seguintes atributos, considerando o horário de pico (17h-19h) e os modais (Uber Moto/Carro):

- **Distância:** Comprimento do trecho (em km).

- **Tempo de Viagem:** Tempo estimado para percorrer o trecho (em minutos), considerando o tráfego no horário de pico. Este atributo será crucial para a otimização.
- **Custo:** Custo estimado do trecho para o modal Uber (considerando fatores como distância e tempo).
- **Modal:** Indicação do modal aplicável (Uber Carro, Uber Moto).
- **Segurança:** Um índice ou valor que represente a segurança percebida ou histórica do trecho (baseado em dados de sinistros, se disponíveis).

## 5.2. Exemplo Simplificado da Estrutura do Grafo

Para ilustrar a estrutura do grafo, considere a seguinte representação:

- N\_FAFIRE = Nó da FAFIRE
- N\_FNR = Nó da FNR
- N\_CBV\_INICIO = Início da Conde da Boa Vista
- N\_CBV\_FIM = Fim da Conde da Boa Vista
- N\_AGAMENON\_INICIO = Início da Agamenon Magalhães
- N\_AGAMENON\_FIM = Fim da Agamenon Magalhães
- N\_CSR\_INICIO = Início do Cais de Santa Rita
- N\_CSR\_FIM = Fim do Cais de Santa Rita
- N\_PINA\_ENTRADA = Entrada da Via Pina
- N\_PINA\_SAIDA = Saída da Via Pina
- N\_MANGUE\_ENTRADA = Entrada da Via Mangue
- N\_MANGUE\_SAIDA = Saída da Via Mangue

As arestas conectariam esses nós, com os atributos mencionados. Por exemplo:

- (N\_FAFIRE, N\_CBV\_INICIO, {distancia: X, tempo: Y, custo: Z, modal: 'Uber Carro/Moto', segurança: S})
- (N\_CBV\_INICIO, N\_CBV\_FIM, {distancia: X, tempo: Y, custo: Z, modal: 'Uber Carro/Moto', segurança: S})
- (N\_CBV\_FIM, N\_PINA\_ENTRADA, {distancia: X, tempo: Y, custo: Z, modal: 'Uber Carro/Moto', segurança: S})
- (N\_PINA\_SAIDA, N\_FNR, {distancia: X, tempo: Y, custo: Z, modal: 'Uber Carro/Moto', segurança: S})

E assim por diante para as outras rotas e suas interconexões.

## 5.3. Visualização do Grafo

O esboço da estrutura do grafo multimodal pode ser visualizado da seguinte forma:

*[Image failed to load: Grafo Multimodal da Rede de Transporte do Recife]*



Esta representação visual ajuda a compreender a conectividade e as principais rotas consideradas no escopo reduzido do projeto.

---

## 6. Oportunidades de Negócio

A análise do sistema Iterum, concebido inicialmente como um projeto técnico-acadêmico para otimização de rotas entre FAFIRE e Nova Roma, revela um significativo potencial para aplicações comerciais e expansão estratégica. As oportunidades de negócio derivadas deste projeto fundamentam-se em sua capacidade de evoluir de um estudo de caso específico para uma plataforma robusta de inteligência em mobilidade urbana.

- **Expansão e Escalabilidade Geográfica:** A metodologia de modelagem de grafos e análise de rotas, aplicada ao trajeto FAFIRE ↔ Nova Roma, pode ser replicada e escalada para outras áreas urbanas, abrangendo bairros, cidades inteiras ou regiões metropolitanas. A estrutura do sistema permite a adaptação a diferentes malhas viárias, bastando para isso a coleta de dados correspondentes, como os obtidos via OpenStreetMap.
- **Integração com Plataformas de Mobilidade:** O sistema apresenta potencial para ser integrado como um módulo especializado em aplicativos de navegação já existentes (como Google Maps) ou em plataformas de transporte público. A sua capacidade de considerar múltiplas variáveis, como segurança, clima e tipo de via, e de comparar a eficiência de diferentes algoritmos oferece um diferencial competitivo para otimizações de rotas multimodais que vão além do menor tempo, incorporando fatores como custo energético e segurança.
- **Soluções para Logística e Entregas (Last-Mile):** A análise de problemas complexos, como o roteamento de múltiplos veículos, posiciona o Iterum como uma base para o desenvolvimento de soluções B2B (Business-to-Business) voltadas para o setor de logística. Empresas de entrega poderiam utilizar o sistema para otimizar suas frotas, reduzir custos com combustível e tempo de operação, além de desviar de áreas com acidentes ou outros obstáculos dinâmicos.
- **Consultoria em Planejamento Urbano:** O sistema pode ser empregado como uma ferramenta de simulação para gestores públicos e consultorias de urbanismo. A capacidade de modelar cenários com variáveis como tráfego em horário de pico e acidentes permite a análise de impacto de intervenções urbanas, como a construção de novas vias, alterações no sentido do tráfego ou a implementação de ciclovias, oferecendo embasamento técnico para a tomada de decisão.
- **Inovação Social e Segurança Pública:** Ao permitir a ponderação de fatores como segurança e zonas perigosas, o projeto abre uma oportunidade para o desenvolvimento de aplicações com forte apelo social. A funcionalidade de sugerir rotas mais seguras, especialmente em determinados horários, pode ser de grande valor para os cidadãos e fomentar parcerias com órgãos de segurança pública. O planejamento de um sistema de input colaborativo de usuários enriquece essa possibilidade.
- **Plataforma Acadêmica e de Pesquisa:** O foco explícito na análise de complexidade computacional e na comparação de algoritmos clássicos (Dijkstra, A\*, Floyd-Warshall, entre outros) consolida o Iterum como um produto com viabilidade acadêmica. A

plataforma pode servir como um laboratório para o avanço da pesquisa em otimização de rotas e mobilidade urbana.

---

## 7. Métricas de Sucesso

Para avaliar o sucesso do projeto Iterum, serão utilizadas as seguintes métricas:

### 7.1. Métricas de Desempenho e Algoritmo

- **Tempo de Resposta do Algoritmo:** Medir o tempo necessário para o algoritmo calcular a rota otimizada. (Objetivo: minimização).
- **Precisão da Previsão de Tempo de Viagem:** Comparar o tempo de viagem previsto pelo sistema com o tempo real de deslocamento. (Objetivo: alta precisão).
- **Eficiência da Otimização de Rotas:** Quantificar a redução percentual no tempo de viagem ou custo em comparação com rotas não otimizadas ou rotas padrão. (Objetivo: maximização da redução).

### 7.2. Métricas de Eficiência Operacional

- **Redução de Custos Operacionais:** Avaliar a diminuição de custos (combustível, manutenção) para os usuários dos modais Uber devido às rotas otimizadas.
- **Aumento da Produtividade:** Medir o ganho de tempo para os usuários, que pode ser revertido em maior produtividade ou qualidade de vida.
- **Utilização de Dados:** Frequência e volume de uso das bases de dados externas (APIs de mapas, dados de tráfego) para manter o modelo atualizado.

### 7.3. Métricas de Satisfação e Usabilidade

- **Feedback dos Usuários:** Coletar avaliações e comentários dos usuários sobre a utilidade, precisão e segurança das rotas sugeridas.
  - **Taxa de Adoção:** Medir a quantidade de usuários que utilizam o sistema para planejar seus deslocamentos.
  - **Usabilidade da Interface:** Avaliar a facilidade de uso da ferramenta de consulta de rotas.
- 

## 8. Visão Estratégica

A visão estratégica de longo prazo do Iterum é se consolidar como uma plataforma de inteligência em mobilidade urbana, capaz de integrar múltiplos modais e variáveis para

oferecer soluções de otimização de rotas adaptáveis a diferentes contextos urbanos. A partir do estudo de caso FAFIRE-FNR, o projeto visa expandir sua aplicabilidade para outras regiões e se tornar uma referência tanto para a pesquisa acadêmica quanto para o desenvolvimento de soluções comerciais inovadoras no setor de transporte e logística. A contínua incorporação de dados em tempo real e a evolução dos algoritmos de otimização serão pilares para alcançar essa visão, contribuindo para cidades mais eficientes, seguras e sustentáveis.

---

## 6. Complexidade e Algoritmos

A otimização de rotas em redes de transporte, especialmente em cenários urbanos dinâmicos como o de Recife, envolve desafios computacionais significativos. A complexidade do problema é influenciada por diversos fatores, incluindo o tamanho da rede, a variabilidade dos atributos das arestas (tempo de viagem, custo, segurança) e a necessidade de respostas em tempo real.

### 6.1. Níveis de Complexidade

Podemos elencar diferentes níveis de complexidade para o problema de otimização de rotas no contexto do Iterum:

- **Complexidade de Dados:** Refere-se ao volume e à heterogeneidade dos dados de entrada. A rede de transporte do Recife, com suas múltiplas vias, pontos de interesse e dados de tráfego em constante mudança, gera um grande volume de informações. A integração de dados de diferentes fontes (OpenStreetMap, Google Maps API, dados da CTTU) e a necessidade de processá-los para extrair atributos relevantes para as arestas (tempo de viagem no horário de pico, índices de segurança) adicionam uma camada de complexidade.
- **Complexidade do Grafo:** O grafo multimodal que representa a rede de transporte pode ser denso e dinâmico. A inclusão de múltiplos atributos nas arestas (distância, tempo, custo, modal, segurança) transforma o problema de busca de caminho mínimo em um problema de caminho mais curto com múltiplos critérios, o que é inerentemente mais complexo do que a busca por um único critério.
- **Complexidade Temporal (Horário de Pico):** A restrição de horário (17h-19h) implica que os atributos das arestas, especialmente o tempo de viagem, não são estáticos. O tráfego intenso nesse período exige que o modelo considere variações significativas, o que pode levar à necessidade de algoritmos que se adaptem a grafos com pesos variáveis ou que sejam executados repetidamente com dados atualizados.
- **Complexidade de Otimização:** A busca pela

rota "ótima" não é trivial. Dependendo da função objetivo (minimizar tempo, minimizar custo, maximizar segurança, ou uma combinação ponderada desses fatores), o problema pode se tornar um problema de otimização multicritério, que geralmente não possui uma única solução ótima, mas sim um conjunto de soluções Pareto-ótimas.

- **Complexidade de Implementação:** A construção de um sistema que integre as bases de dados, modele o grafo, aplique os algoritmos e apresente os resultados de forma compreensível exige um esforço de desenvolvimento considerável, especialmente na garantia da performance e escalabilidade.

## 6.2. Algoritmos Propostos

Para a resolução do problema de otimização de rotas no grafo multimodal, considerando os atributos das arestas e o escopo reduzido, os seguintes algoritmos são propostos:

- **Algoritmo de Dijkstra:** É um algoritmo clássico para encontrar os caminhos mais curtos entre nós em um grafo com pesos de aresta não negativos. É adequado para encontrar a rota mais rápida ou a mais barata, se os pesos representarem tempo ou custo, respectivamente. Sua complexidade é tipicamente  $O(E + V \log V)$  com uma fila de prioridade, onde  $V$  é o número de vértices e  $E$  é o número de arestas. Pode ser aplicado para cada critério de otimização separadamente (tempo, custo).
- **Algoritmo A (A-estrela):\*** Uma extensão do algoritmo de Dijkstra que utiliza uma função heurística para guiar a busca, tornando-o mais eficiente em muitos casos. É particularmente útil quando se busca um caminho entre dois pontos específicos (FAFIRE e FNR, neste caso) e pode ser adaptado para considerar múltiplos critérios através de uma função de custo que combine os atributos das arestas. A eficácia do A\* depende da qualidade da heurística.
- **Adaptação para Otimização Multi-objetivo (Dijkstra e A):\***
- A principal adaptação necessária para ambos os algoritmos será a criação de uma **função de custo ponderada** para cada aresta do grafo. Em vez de usar apenas um único peso (como tempo ou distância), a aresta terá um custo composto por múltiplos critérios, conforme a seguinte fórmula:
- $$\text{Custo}(u,v) = w1 \cdot \text{Tempo}(u,v) + w2 \cdot \text{Custo}(u,v) + w3 \cdot \text{ImpactoAmbiental}(u,v)$$
- Onde:
  - Tempo: O tempo de viagem, previsto pelo modelo de regressão (Seção 3.2.2).
  - Custo: O valor estimado da viagem para o trecho.
  - Impacto Ambiental: Uma estimativa do impacto (ex: emissões de CO2) baseada no modal e na distância.
- Os pesos (w1, w2, w3) serão ajustáveis, permitindo que o usuário escolha o que é mais importante: uma rota mais rápida, mais barata ou mais sustentável. A diferença entre a implementação de Dijkstra e A\* estará na função de busca:
  - **Dijkstra:** O algoritmo explorará o grafo a partir da origem, sempre escolhendo o nó com o menor custo total acumulado até o momento.
  - **A:\*** O algoritmo A\* usará uma heurística, como a distância em linha reta entre o nó atual e o destino, para guiar a busca de forma mais eficiente. A função de avaliação será:  $f(n) = g(n) + h(n)$ , onde  $g(n)$  é o custo acumulado até o nó  $n$  (usando a função de custo ponderada acima) e  $h(n)$  é a heurística.

- Essa abordagem multi-objetivo permitirá ao sistema Iterum ir além da simples otimização por menor tempo, oferecendo soluções mais inteligentes e personalizadas para os usuários.
- **Algoritmo de Bellman-Ford:** Embora mais lento que Dijkstra para grafos com pesos não negativos (complexidade  $O(VE)$ ), o Bellman-Ford tem a vantagem de poder lidar com pesos de aresta negativos. Isso pode ser relevante se, em futuras expansões, forem introduzidos cenários onde certos trechos possam ter um "custo" negativo (por exemplo, bônus por usar uma via específica ou por evitar um congestionamento extremo que é modelado como um custo negativo para desincentivar a rota).
- **Algoritmo de Floyd-Warshall:** Este algoritmo encontra os caminhos mais curtos entre *todos* os pares de nós em um grafo (complexidade  $O(V^3)$ ). Embora seja mais custoso computacionalmente para um único par de origem-destino, pode ser útil para pré-calcular todas as distâncias e tempos entre os nós de interconexão, o que pode acelerar consultas subsequentes em um sistema que precise de muitas consultas de rota entre diferentes pontos.

### Considerações para a Escolha e Adaptação:

A escolha final e a adaptação dos algoritmos dependerão da ponderação dos atributos das arestas (tempo, custo, segurança, impacto ambiental) e da função objetivo definida. Para o escopo inicial, Dijkstra e A\* são os candidatos mais promissores devido à sua eficiência e capacidade de lidar com grafos com pesos não negativos. A complexidade computacional de cada algoritmo será um fator crítico na decisão, visando um equilíbrio entre a precisão da otimização e o tempo de resposta do sistema, especialmente considerando o cenário de horário de pico.

---

## 7. Oportunidades de Negócio

A análise do sistema Iterum, concebido inicialmente como um projeto técnico-acadêmico para otimização de rotas entre FAFIRE e Nova Roma, revela um significativo potencial para aplicações comerciais e expansão estratégica. As oportunidades de negócio derivadas deste projeto fundamentam-se em sua capacidade de evoluir de um estudo de caso específico para uma plataforma robusta de inteligência em mobilidade urbana.

- **Expansão e Escalabilidade Geográfica:** A metodologia de modelagem de grafos e análise de rotas, aplicada ao trajeto FAFIRE ↔ Nova Roma, pode ser replicada e escalada para outras áreas urbanas, abrangendo bairros, cidades inteiras ou regiões metropolitanas. A estrutura do sistema permite a adaptação a diferentes malhas viárias, bastando para isso a coleta de dados correspondentes, como os obtidos via OpenStreetMap.
- **Integração com Plataformas de Mobilidade:** O sistema apresenta potencial para ser integrado como um módulo especializado em aplicativos de navegação já existentes (como Google Maps) ou em plataformas de transporte público. A sua capacidade de considerar múltiplas variáveis, como segurança, clima e tipo de via, e de comparar a eficiência de diferentes algoritmos oferece um diferencial competitivo para otimizações

de rotas multimodais que vão além do menor tempo, incorporando fatores como custo energético e segurança.

- **Soluções para Logística e Entregas (Last-Mile):** A análise de problemas complexos, como o roteamento de múltiplos veículos, posiciona o Iterum como uma base para o desenvolvimento de soluções B2B (Business-to-Business) voltadas para o setor de logística. Empresas de entrega poderiam utilizar o sistema para otimizar suas frotas, reduzir custos com combustível e tempo de operação, além de desviar de áreas com acidentes ou outros obstáculos dinâmicos.
  - **Consultoria em Planejamento Urbano:** O sistema pode ser empregado como uma ferramenta de simulação para gestores públicos e consultorias de urbanismo. A capacidade de modelar cenários com variáveis como tráfego em horário de pico e acidentes permite a análise de impacto de intervenções urbanas, como a construção de novas vias, alterações no sentido do tráfego ou a implementação de ciclovias, oferecendo embasamento técnico para a tomada de decisão.
  - **Inovação Social e Segurança Pública:** Ao permitir a ponderação de fatores como segurança e zonas perigosas, o projeto abre uma oportunidade para o desenvolvimento de aplicações com forte apelo social. A funcionalidade de sugerir rotas mais seguras, especialmente em determinados horários, pode ser de grande valor para os cidadãos e fomentar parcerias com órgãos de segurança pública. O planejamento de um sistema de input colaborativo de usuários enriquece essa possibilidade.
  - **Plataforma Acadêmica e de Pesquisa:** O foco explícito na análise de complexidade computacional e na comparação de algoritmos clássicos (Dijkstra, A\*, Floyd-Warshall, entre outros) consolida o Iterum como um produto com viabilidade acadêmica. A plataforma pode servir como um laboratório para o avanço da pesquisa em otimização de rotas e mobilidade urbana.
- 

## 8. Métricas de Sucesso

Para avaliar o sucesso do projeto Iterum, serão utilizadas as seguintes métricas:

### 8.1. Métricas de Desempenho e Algoritmo

- **Tempo de Resposta do Algoritmo:** Medir o tempo necessário para o algoritmo calcular a rota otimizada. (Objetivo: minimização).
- **Precisão da Previsão de Tempo de Viagem:** Comparar o tempo de viagem previsto pelo sistema com o tempo real de deslocamento. (Objetivo: alta precisão).
- **Eficiência da Otimização de Rotas:** Quantificar a redução percentual no tempo de viagem ou custo em comparação com rotas não otimizadas ou rotas padrão. (Objetivo: maximização da redução).

### 8.2. Métricas de Eficiência Operacional

- **Redução de Custos Operacionais:** Avaliar a diminuição de custos (combustível, manutenção) para os usuários dos modais Uber devido às rotas otimizadas.

- **Aumento da Produtividade:** Medir o ganho de tempo para os usuários, que pode ser revertido em maior produtividade ou qualidade de vida.
- **Utilização de Dados:** Frequência e volume de uso das bases de dados externas (APIs de mapas, dados de tráfego) para manter o modelo atualizado.

### 8.3. Métricas de Satisfação e Usabilidade

- **Feedback dos Usuários:** Coletar avaliações e comentários dos usuários sobre a utilidade, precisão e segurança das rotas sugeridas.
  - **Taxa de Adoção:** Medir a quantidade de usuários que utilizam o sistema para planejar seus deslocamentos.
  - **Usabilidade da Interface:** Avaliar a facilidade de uso da ferramenta de consulta de rotas.
- 

## 9. Visão Estratégica

A visão estratégica de longo prazo do Iterum é se consolidar como uma plataforma de inteligência em mobilidade urbana, capaz de integrar múltiplos modais e variáveis para oferecer soluções de otimização de rotas adaptáveis a diferentes contextos urbanos. A partir do estudo de caso FAFIRE-FNR, o projeto visa expandir sua aplicabilidade para outras regiões e se tornar uma referência tanto para a pesquisa acadêmica quanto para o desenvolvimento de soluções comerciais inovadoras no setor de transporte e logística. A contínua incorporação de dados em tempo real e a evolução dos algoritmos de otimização serão pilares para alcançar essa visão, contribuindo para cidades mais eficientes, seguras e sustentáveis.