

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Trabalho Prático 2

Sistema de Despacho de Transporte por Aplicativo

Cristiano Martins Guimarães Grandi
Matrícula: 2025423440

Belo Horizonte
25 de novembro de 2025

1 Introdução

Com a expansão da empresa multinacional *CabAl* para o Brasil, sob a marca *Cabe Aí*, surge a necessidade de implementar um sistema de despacho eficiente que suporte a inovação de corridas compartilhadas. O contexto atual de mobilidade urbana exige soluções que não apenas transportem passageiros, mas que o façam otimizando recursos. A motivação principal para a adoção do sistema de compartilhamento (tipo táxi-lotação) reside na redução de custos tanto para o usuário final, que paga uma tarifa menor, quanto para a eficiência operacional da frota.

O problema central abordado neste trabalho é a alocação dinâmica de veículos para atender demandas de transporte, respeitando restrições rígidas de capacidade (η), tempo (δ), distância espacial (α, β) e eficiência operacional (λ). O desafio computacional é identificar, em tempo hábil, quais demandas podem ser combinadas sem violar essas restrições.

A solução empregada utiliza uma abordagem de **Simulação de Eventos Discretos (SED)**. Diferente de uma simulação contínua, o sistema modelado avança o tempo através de saltos discretos marcados pela ocorrência de eventos (solicitações de corrida, chegadas e partidas), gerenciados por uma estrutura de fila de prioridade (*MinHeap*). Isso permite processar um grande volume de demandas de forma cronológica e eficiente.

2 Método

A implementação foi realizada na linguagem C, estruturada de forma modular com separação clara entre tipos de dados (*types.h*), estruturas de dados (*minheap.h*), lógica de corridas (*ride.h*), funções auxiliares (*util.h*) e fluxo principal (*main.c*). O sistema baseia-se em quatro Tipos Abstratos de Dados (TADs) principais:

2.1 Tipos Abstratos de Dados

- **MinHeap (Escalonador):** Implementado em *minheap.h*, atua como o motor da simulação. É uma fila de prioridade que armazena eventos (paradas) ordenados pelo tempo. A operação *get_next* garante que o sistema sempre processe o evento mais iminente, fundamental para a corretude cronológica da SED.
 - *initialize(MinHeap*, int)*: Aloca memória para o heap com tamanho especificado
 - *insert_new(MinHeap*, RideStop*, double)*: Insere uma nova parada no heap, calculando seu tempo e mantendo a propriedade de heap mínimo através de *heapify*
 - *get_next(MinHeap*)*: Remove e retorna a parada com menor tempo, restaurando a propriedade de heap através de *heapify*
 - *peek(MinHeap*)*: Retorna a próxima parada sem removê-la
 - *finalize(MinHeap*, double)*: Processa todos os eventos restantes, imprimindo os resultados das corridas
- **Ride (Corrida):** Definida em *types.h* e manipulada em *ride.h*, esta estrutura agrupa as informações de uma viagem, contendo uma lista de passageiros (demandas)

e uma lista encadeada de paradas (`RideStop`). Ela gerencia o estado da corrida (individual ou compartilhada) e calcula métricas como a eficiência.

- `create_new_ride()`: Aloca e inicializa uma nova corrida vazia
- `add_ride_demand(Ride*, Demand)`: Adiciona uma demanda à corrida, atualizando o status (SINGLE ou COMBINED)
- `add_ride_stops(Ride*, Demand, double)`: Insere as paradas de origem e destino na lista encadeada de paradas, mantendo a ordem: todas as origens primeiro, seguidas de todos os destinos
- `calculate_ride_efficiency(Ride)`: Calcula a eficiência como a razão entre a soma das distâncias diretas de cada passageiro e a distância total percorrida
- `get_ride_total_distance(Ride)`: Percorre a lista de paradas calculando a distância total do trajeto
- `remove_last_added_demand(Ride*)`: Remove a última demanda adicionada (usado quando uma tentativa de compartilhamento falha)
- `remove_last_added_stops(Ride*)`: Remove as duas últimas paradas (origem e destino) da lista encadeada

- **RideStop (Parada)**: Representa uma parada (origem ou destino) no trajeto. Implementada como nó de lista duplamente encadeada, contém coordenadas (x, y) , tempo de chegada, distância acumulada, tipo (origem ou destino), ID da demanda associada e ponteiros para a corrida e paradas adjacentes.
- **Demand (Demanda)**: Armazena informações de uma solicitação: ID, tempo de solicitação, status (demandada, individual, combinada ou finalizada) e estruturas `RideStop` para origem e destino.

2.2 Funções Auxiliares

O módulo `util.h` fornece funções de suporte:

- `get_distance(RideStop, RideStop)`: Calcula a distância euclidiana entre duas paradas usando `hypot()`
- `meets_distance_criteria(Ride*, Demand, double, double)`: Verifica se uma demanda satisfaz as restrições espaciais α e β em relação a todas as demandas já presentes na corrida

2.3 Algoritmo de Despacho e Compartilhamento

O fluxo principal, implementado em `main.c`, lê os parâmetros de configuração e as demandas, processando-as sequencialmente. Para cada nova demanda, o sistema:

1. Itera sobre as corridas ativas (ainda não finalizadas)
2. Verifica se a corrida tem capacidade disponível (η)
3. Verifica o critério temporal: se o tempo de solicitação da nova demanda está dentro da janela δ em relação ao início da corrida

4. Verifica as restrições espaciais usando `meets_distance_criteria()`, garantindo que as distâncias entre origens (α) e destinos (β) sejam respeitadas
5. Tenta adicionar a demanda à corrida usando `add_ride_demand()` e `add_ride_stops()`
6. Calcula a eficiência resultante com `calculate_ride_efficiency()`
7. Se a eficiência for maior ou igual a λ , aceita o compartilhamento; caso contrário, remove a demanda usando `remove_last_added_demand()` e `remove_last_added_stops()`
8. Se nenhuma corrida compatível for encontrada, cria uma nova corrida individual
9. Insere a primeira parada (origem) da corrida no MinHeap usando `insert_new()`

Após processar todas as demandas, o sistema chama `finalize()` no MinHeap, que processa os eventos cronologicamente, inserindo paradas subsequentes conforme as anteriores são processadas, até que todas as corridas sejam concluídas.

3 Análise de Complexidade

A eficiência do sistema depende majoritariamente das operações no MinHeap e da busca por corridas compartilháveis.

- **Espaço:** A complexidade de espaço é $O(N)$, onde N é o número de demandas, para armazenar as estruturas de dados de entrada. O Heap ocupa espaço proporcional ao número de eventos ativos simultâneos.
- **Tempo (Heap):** As operações de inserção (`insert_new`) e remoção (`get_next`) no MinHeap possuem complexidade $O(\log K)$, onde K é o número de eventos agendados.
- **Tempo (Simulação):** Para cada demanda, o algoritmo itera sobre as corridas ativas para tentar o compartilhamento. No pior caso, onde nenhuma combinação é possível, a complexidade aproxima-se de $O(N \cdot M)$, onde M é a janela de corridas ativas consideradas (limitadas por δ).

4 Estratégias de Robustez

Para garantir a estabilidade e confiabilidade do sistema, foram implementadas cinco estratégias principais de programação defensiva, organizadas em um módulo dedicado de validação e verificação:

4.1 Validação de Entrada

Implementada no módulo `validation.h`, esta estratégia valida todos os dados de entrada antes do processamento:

- **Parâmetros de Configuração:** A função `validate_config_params()` verifica se os parâmetros do sistema estão em intervalos válidos. Valores fora desses intervalos causam encerramento controlado do programa com mensagem de erro descriptiva.

- **Validação de Demandas:** A função `validate_demand()` verifica cada solicitação individualmente, garantindo que coordenadas sejam válidas, que origem e destino sejam diferentes ($\text{distância} > 0.01$), que o tempo de solicitação seja não-negativo e o número de demandas positivo. Demandas inválidas são descartadas com aviso, permitindo que o sistema continue processando as demais.

4.2 Verificação de Alocação de Memória

Todas as chamadas a `malloc()` foram instrumentadas com verificação de retorno `NULL`. As funções `create_new_ride()`, `initialize()` e `create_new_stop()` verificam se a alocação foi bem-sucedida antes de prosseguir. Em caso de falha de alocação, o sistema imprime mensagem de erro detalhada indicando o contexto da falha e encerra a execução com `exit(1)`, prevenindo segmentation faults por acesso a ponteiros `NULL`. Esta abordagem garante que o programa não continue operando em estado inconsistente quando recursos de memória são insuficientes.

4.3 Proteção contra Divisão por Zero

Operações aritméticas críticas foram protegidas contra divisão por zero para prevenir resultados indefinidos que corromperiam o estado do sistema. A função `calculate_stop_time()` verifica se a velocidade é maior que zero antes de calcular o tempo como razão entre distância e velocidade. Similarmente, `calculate_ride_efficiency()` verifica se a distância total é maior que `0.0001` (tolerância para comparação de floats) antes de calcular a eficiência como razão entre distância original e distância total. Quando violações são detectadas, as funções retornam valores de erro (`-1`) e imprimem mensagens descriptivas, permitindo diagnóstico preciso do problema.

4.4 Verificação de Limites de Arrays

Proteção contra buffer overflow foi implementada no array `demands[MAX_CAPACITY]` através de verificações em todas as operações de acesso. A função `add_ride_demand()` verifica se `demand_number` é menor que `MAX_CAPACITY` antes de adicionar uma nova demanda, enquanto `remove_last_added_demand()` verifica se há demandas para remover (`demand_number > 0`). A função `meets_distance_criteria()` também valida que o número de demandas não excede a capacidade máxima antes de iterar sobre o array. Violações de limites resultam em mensagem de erro detalhada e aborto da operação, prevenindo corrupção de memória e comportamento indefinido.

4.5 Validação de Invariantes de Estruturas de Dados

Implementada no módulo `invariants.h`, esta estratégia verifica propriedades estruturais que devem sempre ser verdadeiras:

- **Invariante Temporal:** A função `validate_ride_temporal_consistency()` verifica que os tempos de paradas são monotonicamente crescentes ao longo da corrida, garantindo a consistência temporal do sistema.
- **Invariante do Heap:** A função `validate_heap_times()` verifica que todos os tempos no MinHeap são não-negativos, e `is_valid_minheap()` verifica a propriedade de heap mínimo (cada pai tem tempo menor ou igual aos filhos).

Estas validações são chamadas em pontos críticos (antes de finalizar o heap) e ajudam a detectar bugs de lógica durante desenvolvimento e testes.

4.6 Consistência Geométrica

O cálculo de distâncias utiliza a função `hypot()` da biblioteca matemática padrão, garantindo precisão em ponto flutuante e tratamento adequado de casos extremos (coordenadas muito grandes ou muito pequenas), evitando erros de overflow/underflow que ocorreriam com cálculo manual de $\sqrt{x^2 + y^2}$.

5 Análise Experimental

Os experimentos visaram avaliar o impacto dos parâmetros de configuração no desempenho do sistema, conforme sugerido na especificação. Nos experimentos, fixamos os parâmetros base como $\eta = 3$, $\Delta = 30s$, $\lambda = 0.1$, $\alpha = 1500$, $\beta = 3000$. A partir deles, foram variados α , β e λ .

5.1 Configuração do Experimento e Geração de Dados

Para garantir a reproduzibilidade e testar o sistema sob condições de estresse controlado, não foram utilizados apenas dados aleatórios uniformes. Foi desenvolvido um script auxiliar em Python para gerar um conjunto de 1000 demandas sintéticas (`input_1000.txt`).

A geração dos dados seguiu uma lógica de agrupamento: foram definidos 9 pontos-base de coordenadas (ex: $(0, 0)$, $(100, 100)$, $(-100, 0)$), e as origens e destinos de cada demanda foram gerados aplicando uma distribuição normal com desvio padrão de 50 ao redor desses pontos.

Para os experimentos a seguir, fixou-se a capacidade do veículo ($\eta = 3$), a velocidade ($\gamma = 35$) e o tempo máximo de espera ($\delta = 30$), variando-se apenas as restrições espaciais.

5.1.1 Métricas Avaliadas

Para avaliar o desempenho do sistema de compartilhamento, foram coletadas três métricas principais em cada experimento:

- 1. Número de Corridas:** Representa a quantidade total de veículos despachados para atender todas as demandas. Esta métrica é inversamente proporcional à eficiência do agrupamento: quanto menor o número de corridas para um conjunto fixo de demandas, maior foi a taxa de compartilhamento. Um sistema ideal de compartilhamento de corridas minimiza esta métrica respeitando as restrições de qualidade de serviço.
- 2. Distância Total Percorrida:** Soma das distâncias percorridas por todos os veículos da frota. Esta métrica reflete o custo operacional total do sistema, incluindo consumo de combustível, desgaste dos veículos e emissões. O compartilhamento eficiente tende a reduzir esta métrica, pois substitui múltiplas trajetórias individuais por trajetos otimizados que atendem múltiplos passageiros. No entanto, desvios excessivos para coleta/entrega podem aumentar a distância total, evidenciando o *trade-off* entre agrupamento e eficiência de rota.

3. Proporção Corridas/Demandas: Razão entre o número de corridas realizadas e o número total de demandas. Esta métrica normalizada varia entre 0 e 1, onde 1.0 indica ausência total de compartilhamento (cada demanda gerou uma corrida individual) e valores próximos de 0 indicam alto grau de agrupamento. Por exemplo, uma proporção de 0.5 significa que, em média, cada corrida atendeu 2 demandas. Esta métrica é particularmente útil para comparar o desempenho do sistema sob diferentes configurações de parâmetros, independentemente do tamanho do conjunto de dados.

5.2 Impacto da Variação da Distância Máxima entre Origens (α)

O parâmetro α define o raio máximo de desvio permitido para coletar passageiros adicionais em relação à origem da primeira demanda. No experimento, variou-se α no intervalo [0, 500] metros. A proporção corridas/demandas é uma métrica direta da eficiência do agrupamento: um valor de 1.0 indica que cada demanda gerou uma corrida individual (sem compartilhamento), enquanto valores menores indicam agrupamento bem-sucedido.

A hipótese inicial é que valores muito baixos de α impedem o compartilhamento, pois exigem que os passageiros estejam praticamente no mesmo local, resultando em proporções próximas de 1.0.

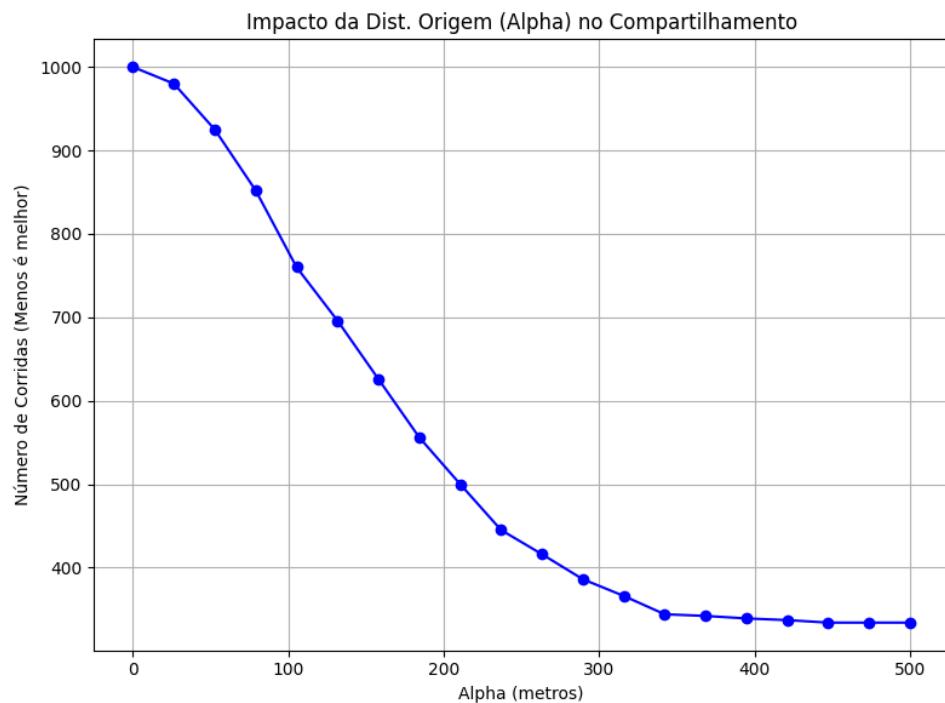


Figura 1: Impacto do relaxamento da restrição espacial (α) no número de corridas.

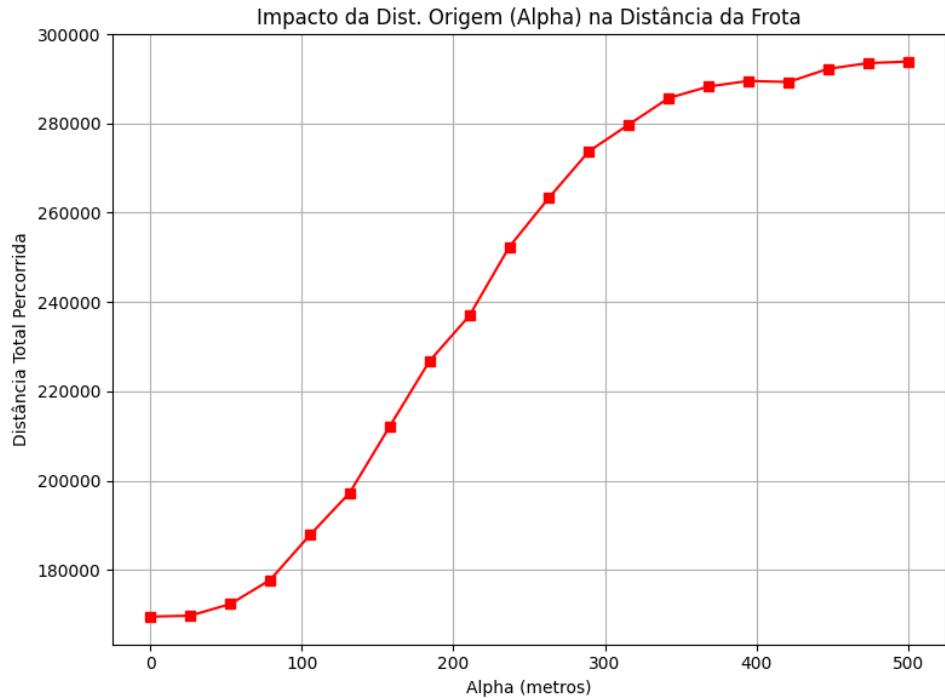


Figura 2: Impacto do relaxamento da restrição espacial (α) na distância total percorrida.

Conforme observado nos resultados obtidos, o relaxamento de α resultou em uma redução no número total de corridas. Isso indica que o algoritmo foi capaz de agrupar mais passageiros em um único veículo.

No entanto, observa-se um ponto de saturação. A partir de certo valor de α (aproximadamente 300), o ganho marginal de agrupamento diminui consideravelmente, pois o fator limitante passa a ser a capacidade do veículo (η), a eficiência (λ) ou o tempo de espera (δ), e não mais a distância física entre as origens.

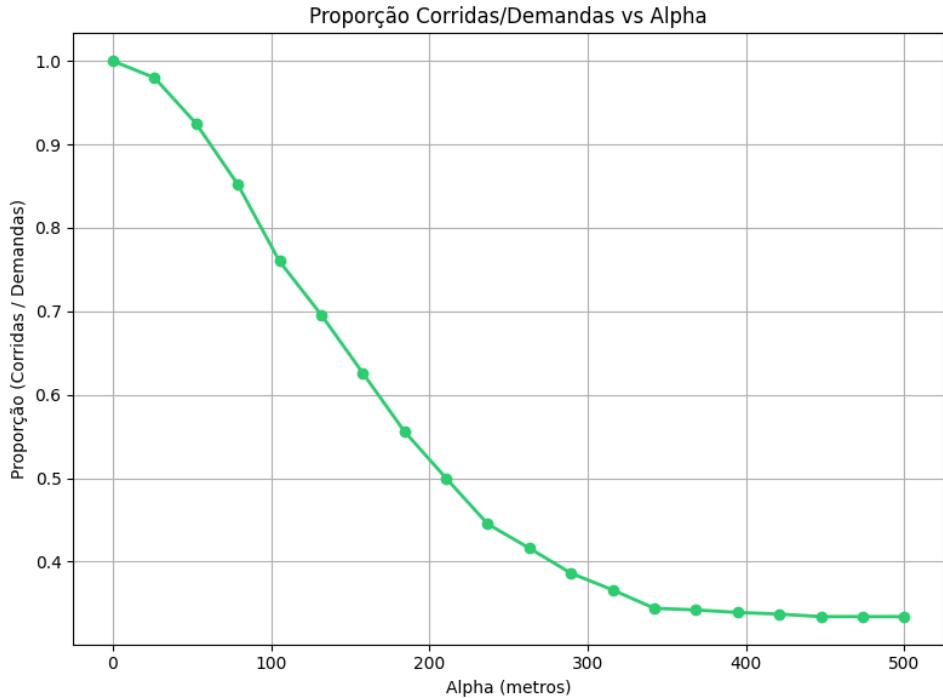


Figura 3: Proporção entre número de corridas e demandas em função de α .

Os resultados confirmam a hipótese: com α próximo de 0, a proporção se aproxima de 1.0, indicando ausência de compartilhamento. À medida que α aumenta, observa-se uma redução significativa na proporção, demonstrando que o relaxamento da restrição espacial permite agrupar mais demandas por corrida. A curva apresenta um ponto de saturação em torno de 300 metros, onde o ganho marginal diminui, sugerindo que outros parâmetros (β , η ou λ) passam a limitar o agrupamento.

5.3 Impacto da Variação da Distância Mínima entre Destinos (β)

O parâmetro β restringe a dispersão dos pontos de desembarque. O experimento variou β no intervalo [0, 500] metros, mantendo α fixo em seu valor base. Este parâmetro atua como um filtro secundário crítico: mesmo que dois passageiros tenham origens próximas (satisfiado por α), eles só podem compartilhar a corrida se seus destinos também forem compatíveis. Com β restritivo, apenas passageiros com destinos muito próximos podem ser agrupados, resultando em proporções elevadas (próximas de 1.0).

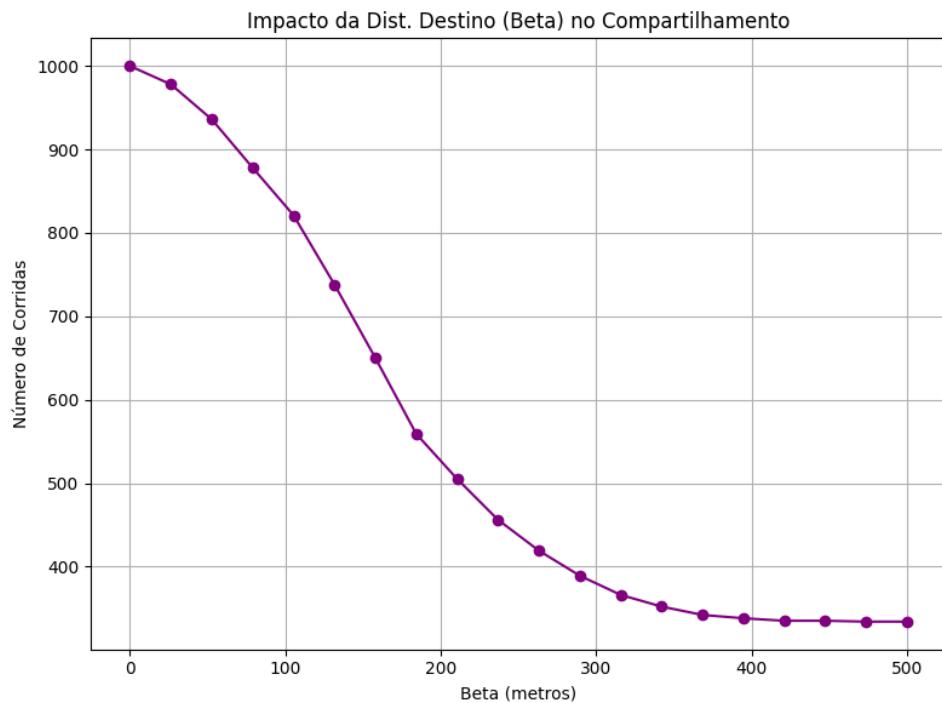


Figura 4: Impacto do relaxamento da restrição espacial (β) no número de corridas.

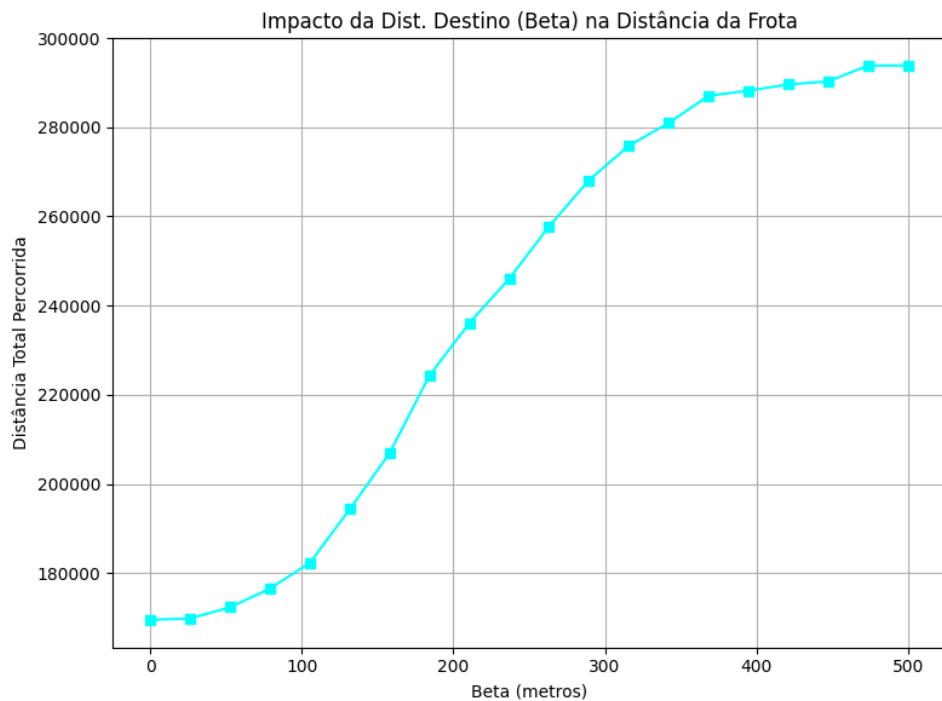


Figura 5: Impacto do relaxamento da restrição espacial (β) na distância total percorrida.

O gráfico de "Distância Total da Frota" em função de β revela a eficiência do sistema. Com β muito restrito (próximo de 0), o sistema opera quase como um táxi individual, resultando em uma distância total percorrida alta (soma de todas as trajetórias individuais). À medida que β aumenta, a distância total da frota tende a cair drasticamente, pois

múltiplos trajetos individuais são substituídos por trajetos otimizados compartilhados, validando a eficácia da lógica de compartilhamento de corridas implementada.

Neste experimento, fixamos os parâmetros base ($\eta = 3, \Delta = 30s, \lambda = 0.1$) e variamos a distância máxima entre destinos (β) de 0m 500m.

Observa-se que, à medida que β aumenta, o sistema encontra mais oportunidades de compartilhamento, reduzindo o número total de veículos necessários. No entanto, o aumento excessivo de β pode degradar a eficiência individual de cada passageiro devido aos desvios maiores.

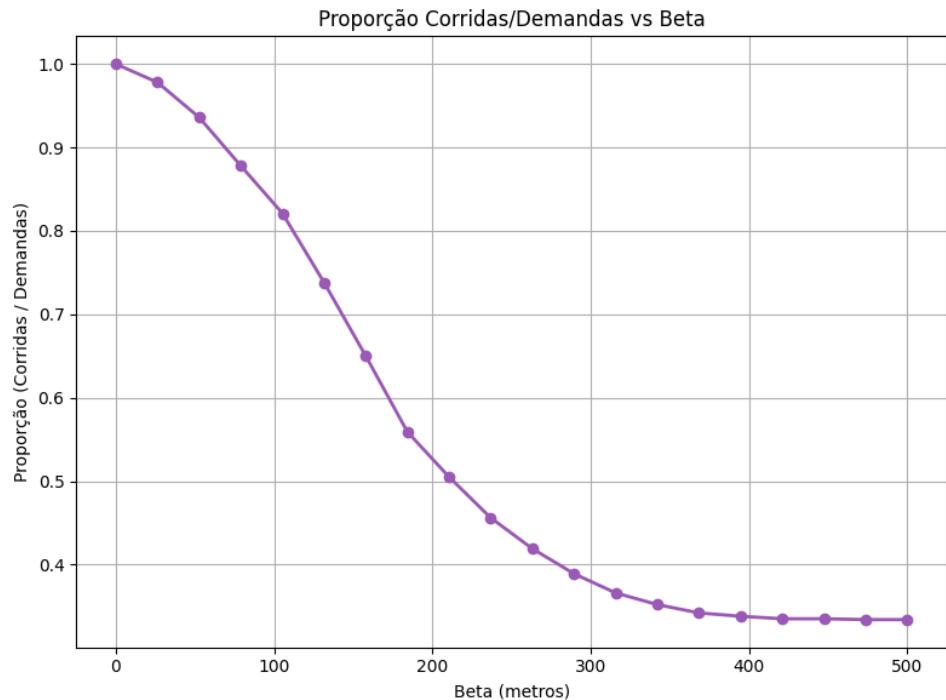


Figura 6: Proporção entre número de corridas e demandas em função de β .

O gráfico confirma o papel crítico de β no agrupamento. O relaxamento progressivo de β reduz a proporção corridas/demandas, permitindo que o sistema agrupe demandas com destinos mais dispersos. A curva demonstra que β é um gargalo significativo: mesmo com origens compatíveis, destinos incompatíveis impedem o compartilhamento. O comportamento é similar ao observado com α , indicando que ambos os parâmetros espaciais (origem e destino) devem ser ajustados em conjunto para otimizar o agrupamento no sistema.

5.4 Eficiência Mínima (Variação de λ)

O parâmetro λ representa a eficiência mínima aceitável para cada passageiro em uma corrida compartilhada, definida como a razão entre a distância direta (origem-destino) e a distância real percorrida. Valores baixos de λ (ex: 0.1) permitem desvios significativos, facilitando o agrupamento, enquanto valores próximos de 1.0 exigem trajetos quase diretos, inviabilizando compartilhamentos. Este parâmetro controla o trade-off entre eficiência operacional da frota (mais compartilhamento) e qualidade de serviço individual (menor tempo de viagem).

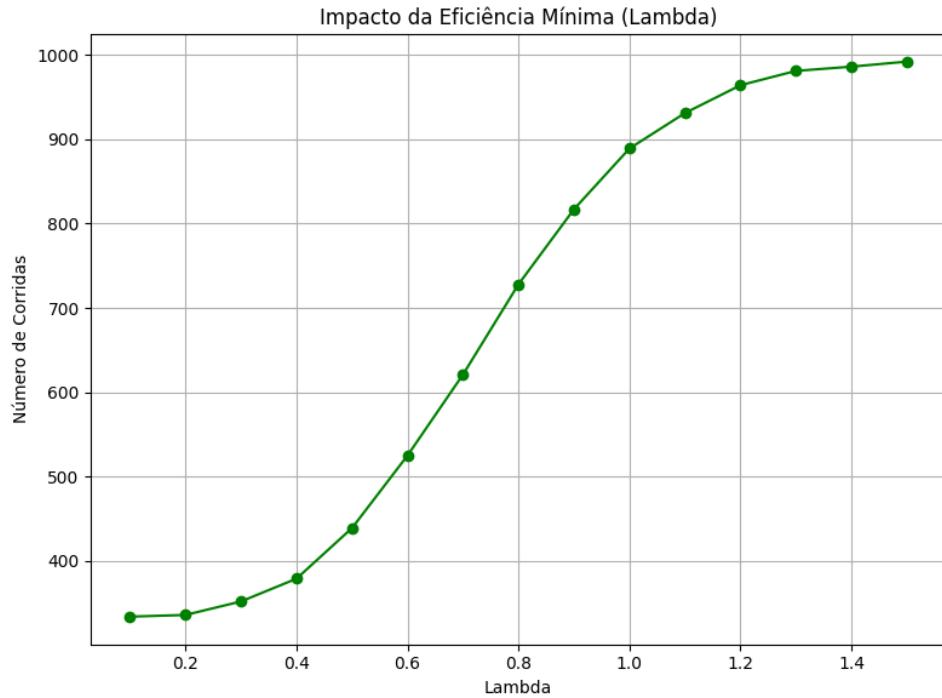


Figura 7: Relação entre exigência de eficiência (λ) e taxa de compartilhamento.

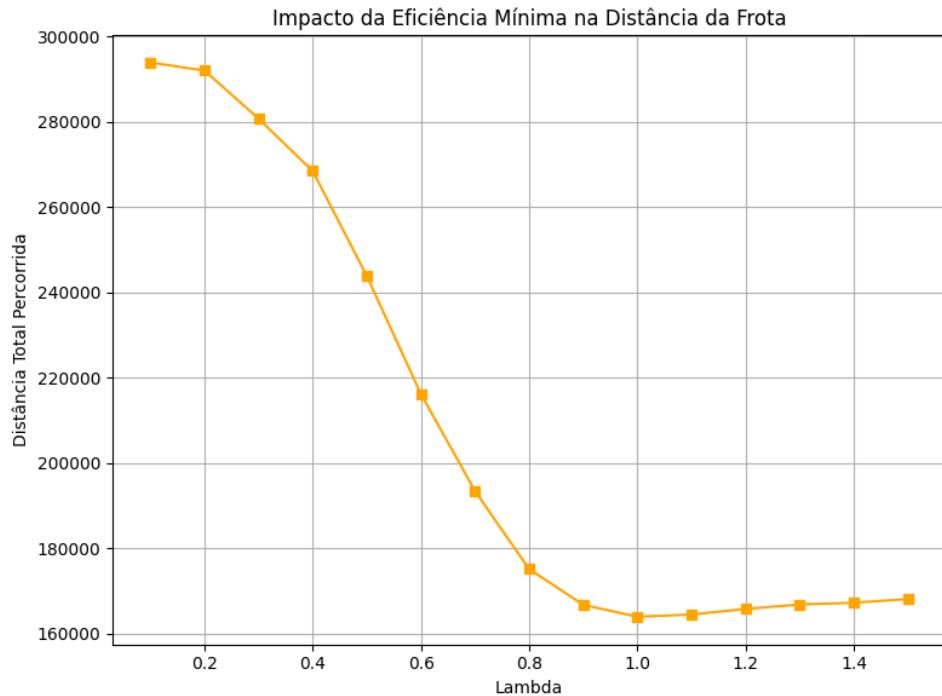


Figura 8: Relação entre exigência de eficiência (λ) e distância total percorrida.

Os gráficos revelam o comportamento esperado do sistema em relação à eficiência mínima. O número de corridas aumenta monotonicamente com λ , indicando que restrições mais rígidas de eficiência reduzem as oportunidades de agrupamento. Com λ próximo de 1.0, o sistema opera quase exclusivamente com corridas individuais, maximizando o

número de veículos necessários.

A distância total percorrida pela frota apresenta comportamento interessante: inicialmente, com λ baixo, a distância é relativamente alta devido aos desvios necessários para coletar e entregar múltiplos passageiros. À medida que λ aumenta, o sistema rejeita compartilhamentos com desvios excessivos, o que pode reduzir ligeiramente a distância total em alguns casos. No entanto, com λ muito alto, a distância total volta a aumentar, pois o sistema é forçado a realizar múltiplas corridas individuais ao invés de trajetos compartilhados otimizados. Este comportamento evidencia que existe um ponto ótimo de λ que equilibra compartilhamento e eficiência de rota.

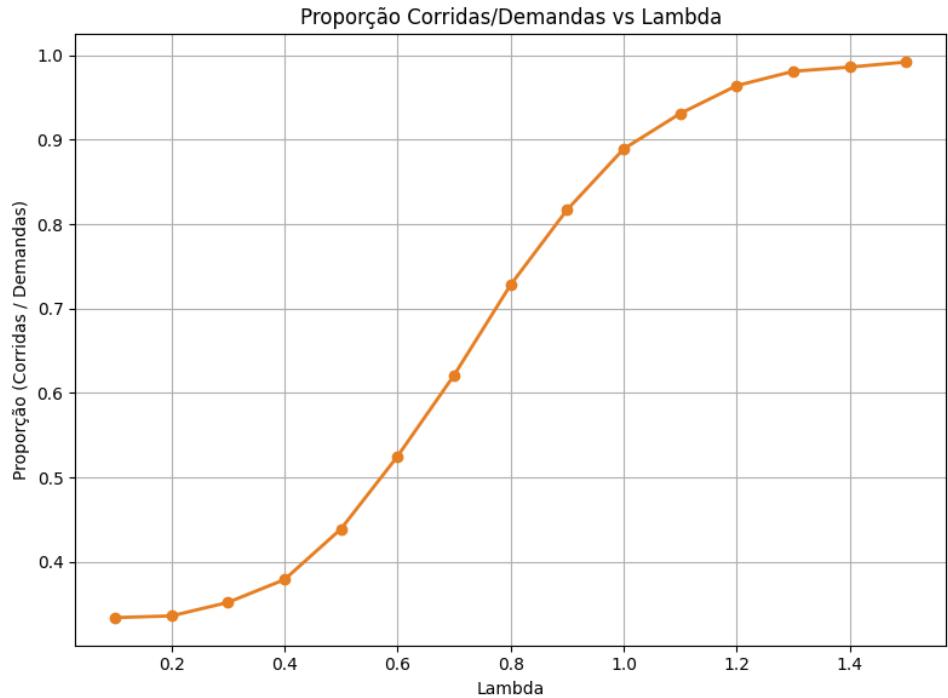


Figura 9: Proporção entre número de corridas e demandas em função de λ .

Os resultados demonstram claramente o impacto de λ no agrupamento. Com valores baixos (0.1 a 0.5), a proporção corridas/demandas permanece relativamente baixa, indicando alto grau de compartilhamento. À medida que λ aumenta, o sistema torna-se progressivamente mais restritivo, rejeitando compartilhamentos que impliquem desvios excessivos. Com λ próximo de 1.0, a proporção se aproxima de 1.0, indicando que o sistema opera quase exclusivamente com corridas individuais. Este comportamento evidencia que λ é o parâmetro de controle mais direto do trade-off entre custo operacional e qualidade de serviço.

6 Conclusões

Neste trabalho, foi implementado um simulador de despacho de corridas baseado em Simulação de Eventos Discretos (SED), capaz de avaliar e executar compartilhamento de veículos sob múltiplas restrições operacionais. A abordagem de SED mostrou-se adequada para modelar o sistema de transporte, onde o estado do sistema evolui através de eventos pontuais no tempo (solicitações de corrida, partidas e chegadas) ao invés de mudanças

contínuas. O uso da estrutura de dados *MinHeap* como escalonador de eventos provou-se essencial para gerenciar a ordem cronológica dos eventos de forma eficiente, garantindo que cada evento seja processado no momento correto da simulação.

A implementação da SED permitiu avaliar sistematicamente o impacto dos parâmetros de configuração no desempenho do sistema. Os experimentos demonstraram que a eficiência de um sistema de compartilhamento de corridas é um trade-off complexo entre múltiplas dimensões: restrições espaciais (α e β), temporais (δ) e de qualidade de serviço (λ). A análise experimental confirmou que os parâmetros espaciais devem ser ajustados em conjunto para otimizar o agrupamento, e que λ controla diretamente o equilíbrio entre eficiência operacional da frota e qualidade de serviço individual.

A metodologia de simulação adotada demonstrou ser uma ferramenta poderosa para análise de sistemas complexos de despacho, permitindo explorar cenários e configurações que seriam impraticáveis de testar em ambiente real. A modularidade do código e a separação clara entre estruturas de dados e lógica de simulação facilitam futuras extensões, como a incorporação de múltiplas classes de veículos, priorização dinâmica de demandas ou algoritmos de roteamento mais sofisticados.

7 Bibliografia

1. WIKIPEDIA. *Simulação de eventos discretos*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Simulacao_de_eventos_discretos. Acesso em: nov. 2025.
2. Slides das aulas de Estrutura de Dados acerca de Heap. DCC/UFMG, 2025.