

**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 *CabAl* para o Brasil sob a marca *Cabe Aí*, surge a necessidade de implementar um sistema de despacho eficiente que suporte corridas compartilhadas. A motivação reside na redução de custos para usuários e na eficiência operacional da frota.

O problema central é a alocação dinâmica de veículos respeitando restrições de capacidade ( $\eta$ ), tempo ( $\delta$ ), distância espacial ( $\alpha, \beta$ ) e eficiência ( $\lambda$ ). O desafio computacional é identificar quais demandas podem ser combinadas sem violar essas restrições.

A solução empregada utiliza Simulação de Eventos Discretos (SED), onde o sistema avança através de eventos pontuais (solicitações, chegadas e partidas) gerenciados por uma fila de prioridade (*MinHeap*), permitindo processar 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  $\alpha$  e  $\beta$  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 ( $\eta$ )
3. Verifica o critério temporal: se o tempo de solicitação da nova demanda está dentro da janela  $\delta$  em relação ao início da corrida
4. Verifica as restrições espaciais usando `meets_distance_criteria()`, garantindo que as distâncias entre origens ( $\alpha$ ) e destinos ( $\beta$ ) 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  $\lambda$ , 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  $\delta$ ).

### 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 ( $distância > 0.01$ ), 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 descritivas, 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 Invariante 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  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\lambda$ .

### 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 ( $\alpha$ )

O parâmetro  $\alpha$  define o raio máximo de desvio permitido para coletar passageiros adicionais em relação à origem da primeira demanda. No experimento, variou-se  $\alpha$  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  $\alpha$  impedem o compartilhamento, pois exigem que os passageiros estejam praticamente no mesmo local, resultando em proporções próximas de 1.0.

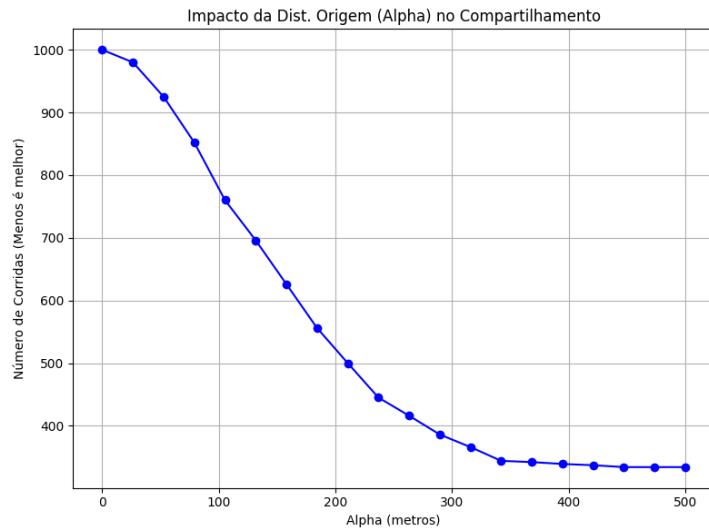


Figura 1: Impacto do relaxamento da restrição espacial ( $\alpha$ ) no número de corridas.

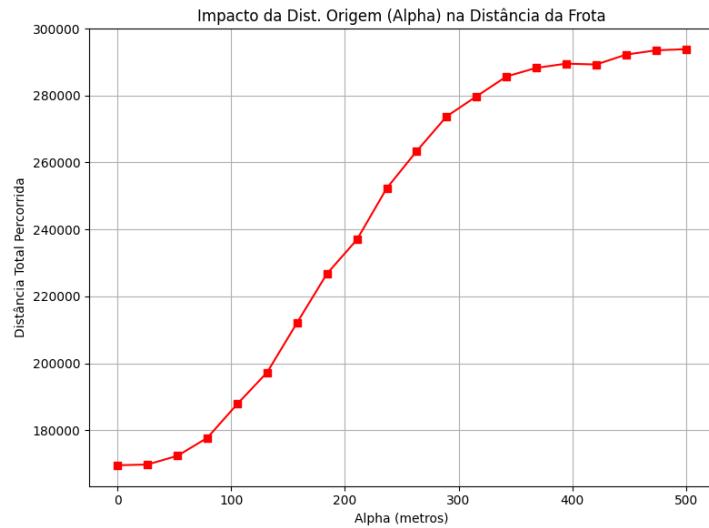


Figura 2: Impacto do relaxamento da restrição espacial ( $\alpha$ ) na distância total percorrida.

O relaxamento de  $\alpha$  reduz o número de corridas, permitindo maior agrupamento. Observa-se saturação em torno de 300 metros, onde outros parâmetros passam a limitar o agrupamento.

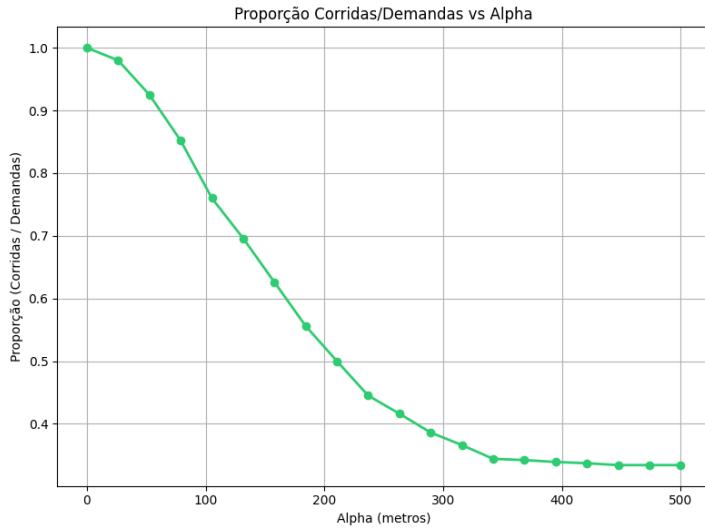


Figura 3: Proporção entre número de corridas e demandas em função de  $\alpha$ .

A proporção diminui significativamente com o aumento de  $\alpha$ , confirmando maior agrupamento. A saturação em 300 metros indica que outros parâmetros se tornam limitantes.

### 5.3 Impacto da Variação da Distância Mínima entre Destinos ( $\beta$ )

O parâmetro  $\beta$  restringe a dispersão dos pontos de desembarque. O experimento variou  $\beta$  no intervalo [0, 500] metros, mantendo  $\alpha$  fixo em seu valor base. Este parâmetro atua como um filtro secundário crítico: mesmo que dois passageiros tenham origens próximas (satisfiado por  $\alpha$ ), eles só podem compartilhar a corrida se seus destinos também forem compatíveis. Com  $\beta$  restritivo, apenas passageiros com destinos muito próximos podem ser agrupados, resultando em proporções elevadas (próximas de 1,0).

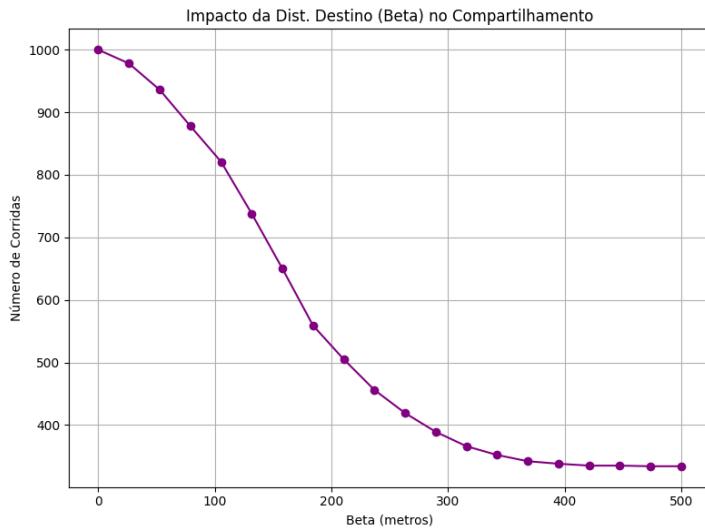


Figura 4: Impacto do relaxamento da restrição espacial ( $\beta$ ) no número de corridas.

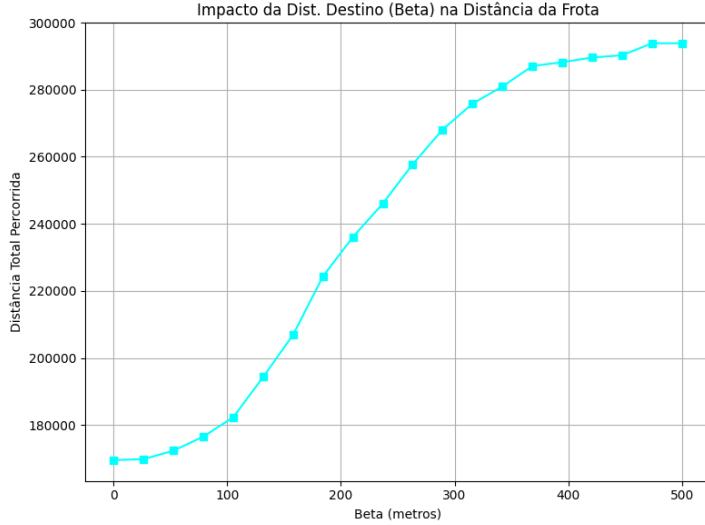


Figura 5: Impacto do relaxamento da restrição espacial ( $\beta$ ) na distância total percorrida.

Com  $\beta$  restrito, o sistema opera como táxi individual. O aumento de  $\beta$  reduz drasticamente a distância total e o número de veículos, mas valores excessivos degradam a eficiência individual.

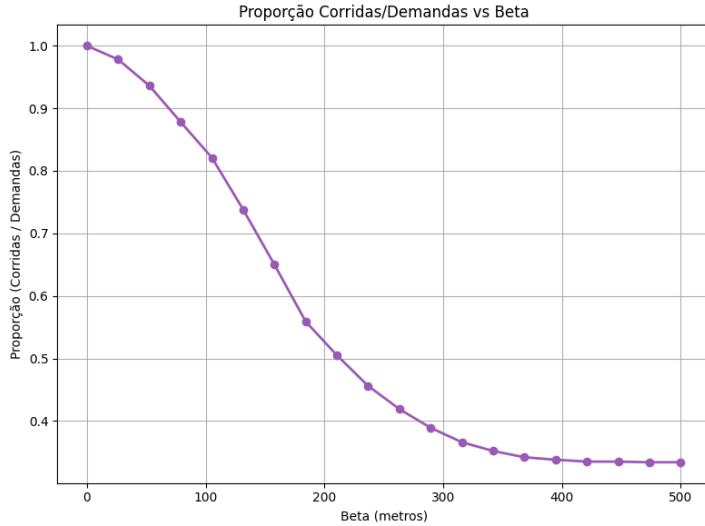


Figura 6: Proporção entre número de corridas e demandas em função de  $\beta$ .

O parâmetro  $\beta$  atua como gargalo crítico: destinos incompatíveis impedem compartilhamento mesmo com origens compatíveis. Ambos os parâmetros espaciais devem ser ajustados em conjunto.

#### 5.4 Eficiência Mínima (Variação de $\lambda$ )

O parâmetro  $\lambda$  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  $\lambda$  (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).

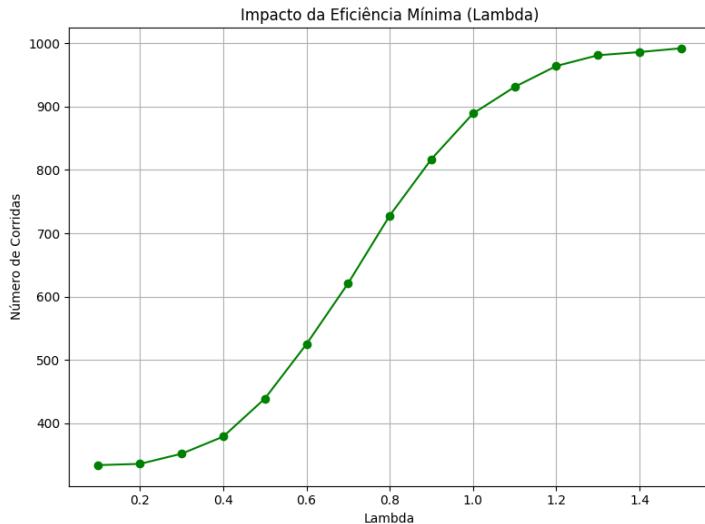


Figura 7: Relação entre exigência de eficiência ( $\lambda$ ) e taxa de compartilhamento.

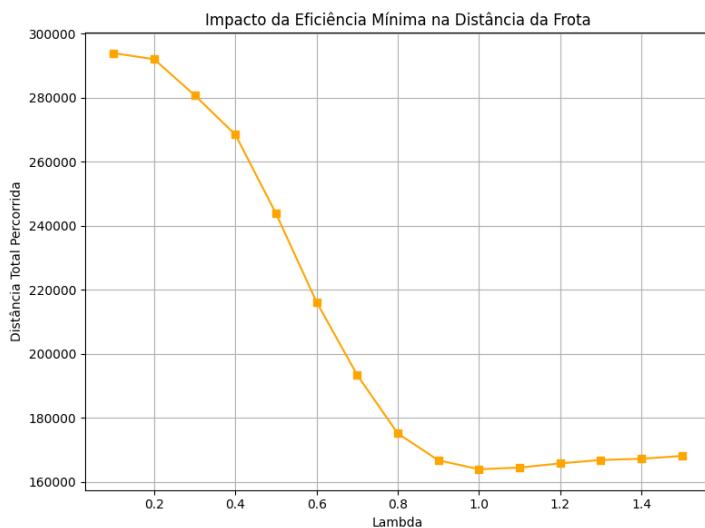


Figura 8: Relação entre exigência de eficiência ( $\lambda$ ) e distância total percorrida.

O número de corridas aumenta monotonicamente com  $\lambda$ . A distância total apresenta comportamento não-linear: alta com  $\lambda$  baixo (desvios), reduz em valores médios, e aumenta novamente com  $\lambda$  alto (corridas individuais), evidenciando um ponto ótimo.

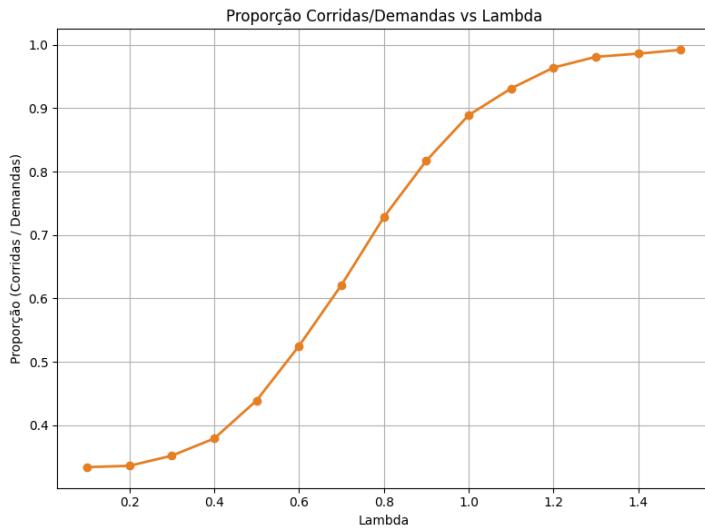


Figura 9: Proporção entre número de corridas e demandas em função de  $\lambda$ .

Com  $\lambda$  baixo, a proporção permanece baixa (alto compartilhamento). Com  $\lambda$  próximo de 1.0, a proporção se aproxima de 1.0 (corridas individuais). Este parâmetro controla diretamente o trade-off entre custo operacional e qualidade de serviço.

## 6 Conclusões

Foi implementado um simulador de despacho baseado em Simulação de Eventos Discretos (SED), capaz de avaliar compartilhamento de veículos sob múltiplas restrições. A abordagem de SED mostrou-se adequada para modelar o sistema, onde o estado evolui através de eventos pontuais. O uso de *MinHeap* como escalonador provou-se essencial para gerenciar a ordem cronológica dos eventos.

Os experimentos demonstraram que a eficiência do sistema é um trade-off complexo entre restrições espaciais ( $\alpha$  e  $\beta$ ), temporais ( $\delta$ ) e de qualidade de serviço ( $\lambda$ ). A análise confirmou que os parâmetros espaciais devem ser ajustados em conjunto, e que  $\lambda$  controla diretamente o equilíbrio entre eficiência operacional e qualidade de serviço. A modularidade do código facilita futuras extensões, como múltiplas classes de veículos 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](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.