

Modelagem Computacional da Coleta Urbana de Resíduos em Teresina: Estrutura e Resultados da Simulação

João Gabriel Silva Rabelo
Instituição Icev

Resumo

Este trabalho apresenta uma abordagem computacional para simular a coleta de resíduos sólidos urbanos em Teresina, utilizando um modelo orientado a objetos desenvolvido em Java. A simulação modela cinco zonas urbanas (Norte, Sul, Leste, Sudeste e Centro), com caminhões pequenos para coleta local, duas estações de transferência (Estação A na Zona Norte e Estação B na Zona Leste) e caminhões grandes para transporte ao aterro (localizado na Zona Sul). O simulador permite configurar parâmetros como taxas de geração de lixo, capacidades dos caminhões, tempos de espera e limites de viagens diárias, possibilitando a análise de diferentes cenários operacionais. No primeiro dia de simulação (1380 minutos), foram geradas 482 toneladas de resíduos, com 385 toneladas coletadas (79,9% de progresso) e 348 toneladas enviadas ao aterro, utilizando 8 caminhões grandes e mantendo um tempo médio de espera de 1,9 minutos nas estações. No início do segundo dia, a geração de 569 toneladas adicionais elevou o total para 1051 toneladas, reduzindo o progresso geral para 38,3%, devido à interrupção da simulação antes da retomada da coleta. Gargalos foram identificados na limitação de 20 viagens diárias por caminhão pequeno e na alocação de recursos entre zonas, sugerindo ajustes como aumento do número de caminhões ou flexibilização dos limites de viagens. A ferramenta demonstra potencial para apoiar o planejamento logístico e a tomada de decisões em sistemas de gerenciamento de resíduos urbanos, com possibilidades de melhorias futuras, como a adição dinâmica de caminhões pequenos.

Palavras-chave: Coleta de resíduos, simulação computacional, logística urbana, otimização, Teresina.

1 Introdução

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos é um desafio crescente em cidades como Teresina, onde o aumento populacional e a expansão urbana elevam significativamente o volume de lixo gerado. Sistemas de coleta eficientes demandam planejamento logístico detalhado para minimizar custos operacionais, reduzir tempos de espera e mitigar impactos ambientais, como emissões de gases de efeito estufa e congestionamentos. Este estudo desenvolve uma simulação computacional orientada a objetos, implementada em Java, para modelar a coleta de resíduos em cinco zonas de Teresina (Norte, Sul, Leste, Sudeste e Centro). A simulação considera caminhões pequenos para coleta local, estações de transferência para consolidação de resíduos e caminhões grandes para transporte ao aterro. A flexibilidade dos parâmetros configuráveis pelo usuário permite testar diversas configurações operacionais, fornecendo insights para otimização do sistema e identificando gargalos logísticos. Além disso, o modelo suporta análises detalhadas do desempenho operacional, como progresso de coleta por zona, tempos de espera nas estações e eficiência no uso de caminhões, contribuindo para a melhoria da gestão de resíduos em contextos urbanos.

2 Metodologia

2.1 Modelo da Simulação

A simulação foi implementada em Java, utilizando uma arquitetura orientada a objetos para representar os componentes do sistema de coleta de resíduos. Os principais elementos do modelo incluem:

- **Zonas:** Cinco áreas urbanas (Norte, Sul, Leste, Sudeste e Centro) com taxas de geração de lixo configuráveis. No primeiro dia, cada zona gerou quantidades variando entre 69,6 e 163,2 toneladas, totalizando 482 toneladas. No início do segundo dia, foram geradas quantidades adicionais (Norte: 103,7 t; Sul: 111,7 t; Leste: 153,6 t; Sudeste: 70,5 t; Centro: 129,8 t), elevando o total acumulado para 1051 toneladas.
- **Caminhões Pequenos:** Cinco caminhões com capacidades de {2, 4, 8, 8, 10} toneladas (um de 2 t, um de 4 t, dois de 8 t e um de 10 t), limitados a 20 viagens diárias por caminhão, conforme definido pelo usuário. Os tempos de coleta variam de acordo com a capacidade (20–100 minutos, a uma taxa de 100 kg/min), e os tempos de viagem entre zonas e estações variam entre 30–60 minutos em horários de pico (6h–9h e 17h–20h) e 15–30 minutos fora de pico.
- **Estações de Transferência:** Duas estações, Estação A (Zona Norte) e Estação B (Zona Leste), equipadas com caminhões grandes de 20 toneladas de capacidade. O tempo máximo de espera para caminhões pequenos nas estações é de 60 minutos, e a tolerância de espera para caminhões grandes antes de partirem para o aterro é de 30 minutos, ambos configuráveis.
- **Aterro:** Localizado na Zona Sul, recebe resíduos transportados pelos caminhões grandes.
- **Simulador:** Gerencia a interação entre os componentes, simulando 1440 minutos (24 horas) no primeiro dia e encerrando no início do segundo dia (00:00). O simulador opera em passos de 1 minuto, atualizando o estado do sistema em tempo real.

2.2 Interface Gráfica e Visualização

A interface do simulador utiliza um terminal textual para exibir logs em tempo real, detalhando eventos como início e fim de coletas, viagens, descarregamentos e filas nas estações. Relatórios horários fornecem resumos do progresso de coleta por zona, tempos médios de espera, status dos caminhões pequenos e grandes, e o número mínimo de caminhões grandes necessários. Embora a ausência de um mapa gráfico limite a visualização espacial, a interface textual é altamente informativa, permitindo depuração detalhada e análise operacional. Para cada evento, são registrados detalhes como a placa do caminhão, zona de operação, carga transportada, tempos de viagem e descarregamento, e pontuações de seleção de estações (baseadas em filas e distâncias). Relatórios finais e intermediários oferecem uma visão consolidada do desempenho do sistema, facilitando a identificação de gargalos e a avaliação de cenários alternativos.

2.3 Parâmetros da Simulação

Os parâmetros configuráveis pelo usuário incluem:

- **Geração de Lixo:** Intervalos por zona – Norte (69,6–120 t), Sul (84–156 t), Leste (93,6–163,2 t), Sudeste (67,2–132 t), Centro (84–144 t) – com valores específicos gerados no primeiro dia (Norte: 114,7 t; Sul: 117,6 t; Leste: 94,0 t; Sudeste: 70,1 t; Centro: 86,1 t) e no segundo dia (Norte: 103,7 t; Sul: 111,7 t; Leste: 153,6 t; Sudeste: 70,5 t; Centro: 129,8 t).

- **Capacidade dos Caminhões Pequenos:** {2, 4, 8, 8, 10} toneladas.
- **Capacidade dos Caminhões Grandes:** 20 toneladas.
- **Número Inicial de Caminhões Grandes:** 2, com adição dinâmica quando a tolerância de espera é excedida.
- **Número de Caminhões Pequenos:** 5, fixo durante a simulação.
- **Tempos de Viagem:** 30–60 minutos em horários de pico (6h–9h e 17h–20h) e 15–30 minutos fora de pico, dependendo da origem e destino.
- **Limites de Espera:** 60 minutos para caminhões pequenos nas estações e 30 minutos para caminhões grandes antes de partirem para o aterro.
- **Quantidade Máxima de Viagens Diárias:** 20 por caminhão pequeno.

2.4 Execução da Simulação

A simulação foi executada por 1440 minutos (24 horas no primeiro dia, encerrando no início do segundo dia). Caminhões pequenos iniciam a coleta nas zonas, enchendo suas capacidades (2–10 toneladas) a uma taxa de 100 kg/min. Após a coleta, selecionam uma estação de transferência com base em uma pontuação que considera o tamanho da fila e a distância. Caminhões grandes descarregam no aterro quando atingem 20 toneladas ou excedem a tolerância de 30 minutos. Novos caminhões grandes são adicionados automaticamente se o tempo de espera dos caminhões pequenos ultrapassa 60 minutos. O simulador registra eventos como lixo gerado, coletado, enviado ao aterro, tempos de espera, viagens realizadas e status dos caminhões. A interface exibe logs detalhados e relatórios horários, permitindo monitoramento contínuo e análise pós-simulação.

2.5 Análise de Resultados

O desempenho foi avaliado com base nos seguintes indicadores:

- **Lixo Total Coletado:** Quantidade de resíduos coletada pelos caminhões pequenos em todas as zonas.
- **Progresso da Coleta:** Percentual do lixo coletado em relação ao gerado, por zona e total.
- **Tempo Médio de Espera:** Média dos tempos de espera dos caminhões pequenos nas filas das estações.
- **Número Mínimo de Caminhões Grandes:** Quantidade ajustada dinamicamente para atender à demanda, com base na tolerância de espera.
- **Lixo Enviado ao Aterro:** Quantidade de resíduos transportada pelos caminhões grandes ao aterro.

3 Resultados

A simulação foi executada por 1440 minutos, com resultados detalhados nos relatórios horários. Abaixo estão as estatísticas consolidadas para o final do primeiro dia (1380 minutos) e o início do segundo dia (1440 minutos):

No início do segundo dia, foram geradas 569 adicionais de resíduos, aumentando o total para 1051. Isso causou uma queda na eficiência geral de coleta para 38,3% ao considerar o período

Table 1: Estatísticas da Simulação por Zona (Dia 1, 23:00)

Zona	Lixo Gerado ()	Lixo Coletado ()	Lixo Aterro ()	Lixo Acumulado ()	Progresso (%)
Norte	115	91	–	24	79,6
Sul	118	116	–	2	98,7
Leste	94	66	–	28	70,2
Sudeste	70	48	–	22	68,5
Centro	86	64	–	22	74,3
Total	482	385	348	97	79,9

Tempo Médio de Espera: 1,9
Caminhões Grandes Usados: 8

Table 2: Estatísticas da Simulação por Zona (Dia 2, 00:00)

Zona	Lixo Gerado ()	Lixo Coletado ()	Lixo Aterro ()	Lixo Acumulado ()	Progresso (%)
Norte	218	98	–	120	44,9
Sul	229	116	–	113	50,6
Leste	248	76	–	172	30,8
Sudeste	141	48	–	93	34,1
Centro	216	64	–	152	29,6
Total	1052	402	360	650	38,3

Tempo Médio de Espera: 1,9
Caminhões Grandes Usados: 8

total da simulação, com 402 coletadas e 649 não coletadas. No entanto, essa queda se deve principalmente ao fato de a simulação ter terminado imediatamente após a geração do novo resíduo, antes que as operações de coleta pudessem ser retomadas, e não reflete o desempenho operacional do sistema durante a coleta ativa.

3.1 Análise Gráfica dos Resultados

A seguir, apresentam-se os principais gráficos baseados nos relatórios de simulação registrados durante todas as horas de operação:



Figure 1: Lixo Total Coletado por Hora



Figure 2: Progresso Total de Coleta por Hora

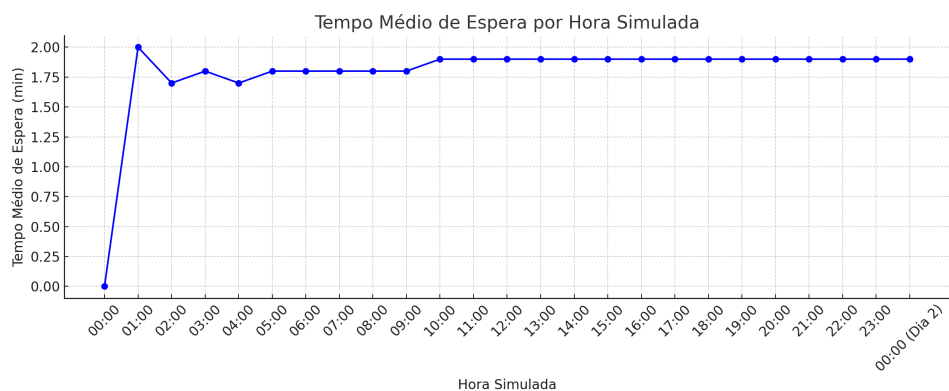


Figure 3: Tempo Médio de Espera nas Estações por Hora

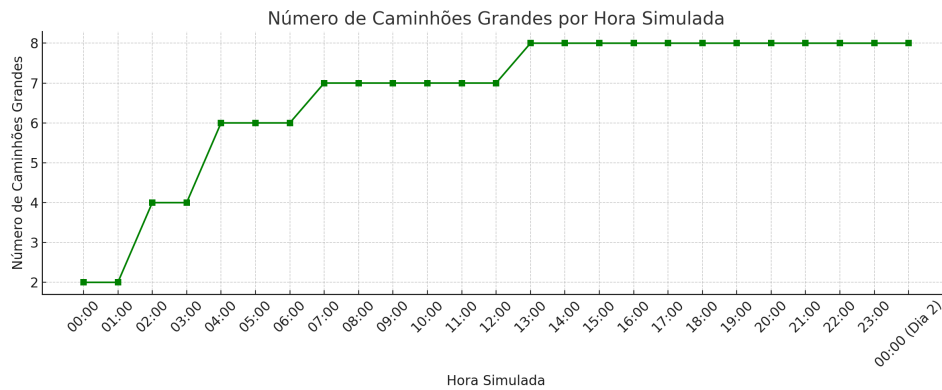


Figure 4: Caminhões Grandes Utilizados por Hora



Figure 5: Lixo Total Enviado ao Aterro

3.2 Análise dos Gráficos

- **Lixo Coletado por Hora:** O gráfico mostra um aumento constante de 23 t (1:00) para 385 t (23:00) no primeiro dia, com um pequeno incremento para 402 t no início do segundo dia, refletindo a continuidade da coleta antes da pausa. - **Progresso de Coleta por Hora:** O progresso cresce de 4,9% (1:00) para 79,9% (23:00) no primeiro dia, caindo para 38,3% no segundo dia devido à geração de 569 t adicionais sem tempo suficiente para coleta. - **Tempo Médio de Espera por Hora:** O tempo de espera varia entre 1,7 e 2,0 minutos, estabilizando em 1,9 minutos após a 10ª hora, indicando eficiência nas estações, apesar de picos iniciais devido à sincronização inicial das coletas. - **Caminhões Grandes Utilizados por Hora:** O número aumenta de 2 (1:00) para 8 (19:00 em diante), refletindo a adição dinâmica de caminhões para atender à demanda e evitar filas longas. - **Lixo Enviado ao Aterro por Hora:** O total enviado ao aterro cresce de 0 t (1:00) para 348 t (23:00), alcançando 360 t no início do segundo dia, com picos correspondendo aos despachos de caminhões grandes.

4 Discussão

A simulação demonstra alta flexibilidade, permitindo ajustes nos parâmetros para testar diferentes configurações operacionais. No primeiro dia, o progresso de 79,9% é robusto, com a Zona Sul alcançando 98,7% de coleta, enquanto a Zona Leste (70,2%) apresenta o menor desempenho, indicando uma alocação desigual de recursos. A diferença no progresso entre zonas pode ser atribuída à maior concentração de caminhões pequenos na Zona Sul (devido à redistribuição adaptativa) e à maior distância do aterro na Zona Leste, impactando os tempos de viagem.

O tempo médio de espera de 1,9 minutos nas estações reflete eficiência operacional, com filas curtas (geralmente 0–1 caminhão) e tempos de descarregamento rápidos (2–10 minutos). No entanto, a adição de 8 caminhões grandes indica que a tolerância de 30 minutos para caminhões grandes foi frequentemente excedida, resultando em despachos de caminhões parcialmente cheios (ex.: 2–12 t). Isso sugere uma oportunidade de otimização, como aumentar a tolerância de espera para consolidar mais carga por viagem ou ajustar a capacidade dos caminhões grandes.

A restrição de 20 viagens diárias por caminhão pequeno foi um gargalo significativo, com o caminhão JHT7P93 (2 t) atingindo o limite às 19:30 do primeiro dia, interrompendo suas operações até o reset no segundo dia. A redistribuição adaptativa de caminhões para zonas com maior acumulação de lixo (ex.: Sul e Norte) foi eficaz, mas insuficiente para lidar com o volume adicional de 569 t gerado no segundo dia. A queda no progresso para 38,3% no início do segundo dia é enganosa, pois a simulação foi pausada imediatamente após a geração de novos resíduos, antes que a coleta pudesse ser retomada.

Para melhorar o desempenho, podem ser considerados os seguintes ajustes em outras simulações: - **Aumentar o Número de Caminhões Pequenos:** Adicionar mais caminhões pequenos (ex.: 1–2 unidades) para cobrir o volume de lixo gerado, especialmente em zonas como Leste e Centro. - **Flexibilizar o Limite de Viagens:** Aumentar o limite de 20 viagens diárias ou permitir que caminhões pequenos sejam reativados dinamicamente durante o dia. - **Otimizar a Tolerância de Espera:** Aumentar a tolerância de 30 minutos para caminhões grandes, permitindo maior consolidação de carga e reduzindo viagens parcialmente cheias.

Enquanto que Para melhorar o simulador em si, pode ser considerados o seguinte ajuste: - **Adição Dinâmica de Caminhões Pequenos:** Implementar a funcionalidade sugerida para adicionar caminhões pequenos durante a simulação, permitindo adaptação a picos de geração de resíduos.

A análise dos logs intermediários revela que o sistema mantém eficiência durante a coleta ativa, com picos de progresso entre 19:00 e 23:00 (66,9%–79,9%). A geração de 569 t no segundo dia destaca a necessidade de capacidade adicional para lidar com variações diárias no volume de resíduos. A interface textual, embora eficaz para depuração, poderia ser complementada por uma visualização gráfica (ex.: mapa interativo) para facilitar a interpretação espacial dos movimentos dos caminhões.

5 Conclusão

A simulação desenvolvida é uma ferramenta poderosa para modelar e otimizar a coleta de resíduos sólidos em Teresina, oferecendo flexibilidade para testar diferentes configurações operacionais. No primeiro dia, o progresso de 79,9% demonstra um desempenho robusto, com 385 t coletadas de 482 t geradas, embora 97 t tenham permanecido não coletadas. A Zona Sul alcançou 98,7% de progresso, enquanto a Zona Leste (70,2%) indica a necessidade de maior alocação de recursos. A geração de 569 t adicionais no segundo dia reduziu o progresso geral para 38,3%, mas isso reflete a interrupção da simulação antes da retomada da coleta, não uma falha operacional.

O tempo médio de espera de 1,9 minutos e o uso de 8 caminhões grandes sugerem eficiência nas estações, mas a limitação de 20 viagens diárias por caminhão pequeno e os despachos

de caminhões grandes parcialmente cheios são gargalos que podem ser abordados. Ajustes como aumentar o número de caminhões pequenos, flexibilizar o limite de viagens, ajustar os tempos de espera ou implementar a adição dinâmica de caminhões pequenos podem melhorar o desempenho. A interface textual é eficaz para análise detalhada, mas a inclusão de visualizações gráficas (ex.: mapas ou dashboards) em futuras iterações poderia aprimorar a usabilidade.

O modelo destaca o potencial da simulação computacional para apoiar a tomada de decisão na gestão de resíduos urbanos, permitindo avaliar cenários, identificar gargalos e propor otimizações. Futuras iterações poderiam incorporar funcionalidades como previsão de geração de resíduos, otimização de rotas com algoritmos de roteamento (ex.: algoritmo do vizinho mais próximo) ou integração com dados reais de Teresina para maior realismo. Essa abordagem fortalece a capacidade de planejar sistemas logísticos eficientes e sustentáveis, com aplicações potenciais em outras cidades com desafios semelhantes.