Otimização do Serviço de Embarque Remoto de um Aeroporto

ELE634 Laboratório de Sistemas II

André Costa Batista

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Elétrica

26 de setembro de 2025

Roteiro

Contexto do Problema

- Aeroporto em operação normal com embarques/desembarques remotos
- Ônibus idênticos transportam passageiros entre portões e aviões
- Número de passageiros $>$ capacidade do ônibus
- Necessidade de múltiplas viagens ou múltiplos ônibus
- Cada voo possui janelas de tempo específicas

Objetivo: Minimizar a distância total percorrida

Conceito de Requisições

Definição

Cada voo é desmembrado em um conjunto de **requisições**

Exemplo

- Voo com 150 passageiros
- Ônibus com capacidade para 50 passageiros
- Resultado: 3 requisições necessárias

Características das Requisições

- Cada requisição: coleta + entrega (acopladas)
- Janelas de tempo específicas para cada requisição
- Ordem dos embarques/desembarques deve ser respeitada

Restrições Operacionais

- **Garagem central**: Todos os ônibus partem da garagem
- **Reabastecimento obrigatório**: Após completar requisições
- **Limite de autonomia**: Distância máxima por viagem
- **Múltiplas viagens**: Ônibus pode fazer várias viagens por dia
- **Pares acoplados**: Coleta e entrega pela mesma unidade

Classificação na Literatura

- **PDPTW**: Pickup and Delivery Problem with Time Windows
- **DARP**: Dial-a-Ride Problem (pares acoplados)
- Problema de múltiplas viagens com reabastecimento

Palavras-chave e Área de Pesquisa

Área de Pesquisa

- **Otimização**
- **Pesquisa Operacional**
- **Roteamento de Veículos**
- **Problemas de Coleta e Entrega**
- **Múltiplas Viagens**

Diferencial do Problema

Combinação única de características: pares acoplados, múltiplas viagens, reabastecimento, janelas de tempo e limite de autonomia

Conjuntos do Modelo

- $N = \{1, 2, \ldots, n\}$: Conjunto de requisições
- $C = \{1, 2, \ldots, n\}$: Pontos de coleta
- $E = \{n+1, n+2, \ldots, 2n\}$: Pontos de entrega
- $V = \{1, 2, \ldots, r\}$: Conjunto das viagens
- $K = \{1, 2, \ldots, m\}$: Conjunto de ônibus disponíveis
- $N_0 = N \cup \{0\}$: Requisições + garagem (nó 0)

Observação

Para cada requisição $i \in N$, o ponto de coleta é i e o ponto de entrega é $i + n$

Parâmetros Principais

- d_{ij}: Distância entre pontos i e j
- D_{ij}: Distância entre requisições i e j

$$D_{ij} = d_{i,i+n} + d_{i+n,j}$$

- $c_{ij} = D_{ij}$: Custo (distância) entre requisições
- s_i: Duração de serviço na requisição i
- t_{ij}: Tempo de viagem entre pontos i e j
- T_{ij}: Tempo de viagem entre requisições i e j

$$T_{ij} = s_i + t_{i,i+1} + t_{i+1,j}$$

- e_i, l_i: Janela de tempo da requisição i
- $T^{\max}$: Tempo máximo permitido por viagem

Variáveis de Decisão

- $x_{ijvk} \in \{0,1\}$: Ônibus k viaja da requisição i para j na viagem v
- $B_{ivk} \geq 0$: Instante de início do serviço na requisição i pelo ônibus k na viagem v
- $y_{vk} \in \{0,1\}$: Ônibus k realiza a viagem v

Função Objetivo

Minimizar a distância total percorrida:

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{i \in N_0} \sum_{\substack{j \in N_0 \\ i \neq j}} c_{ij} x_{ijvk}$$

Restrições de Atendimento

Atendimento das Requisições

Cada requisição deve ser realizada exatamente uma vez:

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{\substack{i \in N_0, \\ i \neq j}} x_{ijvk} = 1, \quad \forall j \in N$$

Conservação de Fluxo

O fluxo é conservado em cada nó:

$$\sum_{\substack{i \in N_0, \\ i \neq j}} x_{ijvk} - \sum_{\substack{i \in N_0, \\ i \neq j}} x_{jivk} = 0, \quad \forall j \in N, \forall v \in V, \forall k \in K$$

Restrições de Viagem

Início e Fim de Cada Viagem

Cada viagem deve começar e terminar no depósito:

$$\sum_{j \in N} x_{0jvk} = y_{vk} \quad \forall k \in K, \forall v \in V \tag{1}$$

$$\sum_{i \in N} x_{i0vk} = y_{vk} \quad \forall k \in K, \forall v \in V \tag{2}$$

Sequência de Viagens

Viagem v só pode ser usada se $v - 1$ também for:

$$y_{vk} \leq y_{v-1,k} \quad \forall k \in K, \forall v \in V, v > 1$$

Restrições Temporais

Janela de Tempo da Coleta

$$e_i \sum_{j \in N_0} x_{jivk} \leq B_{ivk} \leq l_i \sum_{j \in N_0} x_{jivk}, \quad \forall i \in N, \forall v \in V, \forall k \in K$$

Sequência Temporal (Intra-viagem)

$$B_{ivk} + s_i + T_{ij} - M(1 - x_{ijvk}) \leq B_{jvk}$$

$$\forall i \in N, j \in N_0, i \neq j, \forall v \in V, \forall k \in K$$

Sequência Temporal (Inter-viagem)

$$B_{0,v-1,k} + s_0 + T_{0i} - M(1 - x_{0ivk}) \leq B_{ivk}$$

$$\forall i \in N, \forall v \in V, v > 1, \forall k \in K$$

Restrições de Tempo e Domínio

Limite de Tempo por Viagem

O tempo acumulado em uma viagem não pode exceder o limite máximo. Como B_{0vk} é o instante que o ônibus k chega à garagem para concluir a viagem v, então, no caso da primeira viagem ($v = 1$):

$$B_{0,1,k} \leq T^{\max} y_{1k}, \quad \forall k \in K$$

No caso das outras viagens ($v > 1$):

$$B_{0vk} - B_{0,v-1,k} \leq T^{\max} y_{vk}, \quad \forall k \in K, \forall v \in V, v > 1$$

Domínio das Variáveis

$$x_{ijvk} \in \{0,1\}, \quad \forall i,j \in N_0, \forall v \in V, k \in K \tag{3}$$

$$y_{vk} \in \{0,1\}, \quad \forall v \in V, k \in K \tag{4}$$

$$B_{ivk} \geq 0, \quad \forall i \in N, v \in V, k \in K \tag{5}$$

Principais Referências

Literatura Base

- **Savelsbergh & Sol (1995)**: Fundamentos do problema geral de coleta e entrega
- **Parragh et al. (2008)**: Survey abrangente sobre PDPTW
- **Cordeau & Laporte (2007)**: Modelos e algoritmos para DARP
- **Cattaruzza et al. (2016)**: Múltiplas viagens com janelas de tempo
- **Molenbruch et al. (2017)**: Tipologia e revisão para dial-a-ride

Contribuição

Adaptação e combinação de técnicas estabelecidas para o contexto específico de embarque remoto em aeroportos

Aspectos Únicos do Modelo

- **Reabastecimento obrigatório**: Ônibus devem retornar à garagem após cada viagem
- **Pares acoplados**: Coleta e entrega da mesma requisição pelo mesmo ônibus
- **Janelas de tempo**: Embarques/desembarques têm horários específicos
- **Múltiplas viagens**: Mesmo ônibus pode fazer várias viagens
- **Limite de autonomia**: Restrição de distância máxima por viagem
- **Múltiplas requisições por voo**: Desmembramento baseado na capacidade

Complexidade

Assim como o Problema de Roteamento de Veículos é NP-Completo, este problema também é NP-Completo devido à sua natureza combinatória e às restrições envolvidas.

Considerações Finais

Outras Aplicações Potenciais

- Otimização de operações aeroportuárias
- Sistemas de transporte público
- Logística de distribuição urbana
- Serviços de transporte sob demanda

Extensões Possíveis da Formulação

- Diferentes tipos de aeronaves (capacidades variadas)
- Ônibus com capacidades distintas
- Múltiplos depósitos de reabastecimento
- Restrições de manutenção programada
- Consideração de custos de combustível