



DECISÕES INTEGRADAS DE SEQUENCIAMENTO E ROTEAMENTO DE CAMINHÕES EM CENTROS DE *CROSSDOCKING*

Renan Pereira Rezende

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte – MG – CEP 31270-901
renanprezende@gmail.com

Priscila Mara Cota

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte – MG – CEP 31270-901
priscila.maracota@gmail.com

Martín Gómez Ravetti

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte – MG – CEP 31270-901
martin.ravetti@dep.ufmg.br

RESUMO

Com o aumento da população em áreas urbanas e o crescimento das cidades, a coordenação de entregas e fretes em áreas densamente povoadas é um desafio presente no dia-a-dia das empresas. Soluções eficientes e eficazes são necessárias. Este trabalho aborda o problema de sequenciamento e roteamento de caminhões em centros de *Crossdocking*, visando minimizar o atraso na entrega aos clientes. É proposto um modelo de programação linear inteira mista, e este é testado, apresentando bom desempenho para pequenas e médias instâncias, porém não sendo viável para instâncias maiores. Possíveis abordagens em trabalhos futuros são discutidas.

PALAVRAS CHAVE. *Crossdocking*, Sequenciamento, Roteamento de veículos.

Tópicos: PM, L&T, AD&GP.

ABSTRACT

With the increase of population in urban areas and cities growth, the coordination of deliveries and freights in highly populated areas is a challenge faced by many companies these days. Efficient and effective solutions are needed. This paper addresses the problem of truck scheduling and routing in Crossdocking centers, aiming to minimize the delay on customer service. A mixed integer linear programming model is proposed and tested, showing satisfactory performance for small and medium sized instances. However, it becomes not viable with large instances. Possible future approaches for the problem are discussed at the end.

KEYWORDS. *Crossdocking*, Truck scheduling, Vehicle routing.

Paper topics: PM, L&T, AD&GP.



1. Introdução

Atualmente, 54% de toda população vive em áreas urbanas e estima-se que em 2050, esse número se aproxime de 70%. A coordenação de entregas e fretes em áreas densamente povoadas é um desafio presente no dia a dia de empresas de transporte de cargas. Este é o desafio que a área de Logística Urbana se dispõe a debater. A Logística Urbana, como Savelsbergh e Woensel [2016] discutem, trata de encontrar formas eficientes e eficazes de transportar mercadorias em áreas urbanas, levando em consideração os impactos negativos no tráfego, na segurança e no meio ambiente que essas atividades causam.

O recente aumento do comércio eletrônico, que gerou um aumento significativo das entregas em áreas urbanas, as crescentes ofertas de serviços de diferenciação de mercado, como entregas no mesmo dia ou até em algumas horas, e regras como as que regulam o trânsito de determinados veículos em zonas centrais, são fatores que tornam o problema da logística urbana ainda mais complexo.

Diversas soluções são propostas por Savelsbergh e Woensel [2016], como utilizar veículos menores para o transporte de cargas, permitindo maior flexibilidade e mobilidade, e realizar entregas fracionadas, bem como, entregas no período noturno. Os autores também apresentam propostas que visam reorganizar e repensar toda a cadeia logística, com o objetivo de reduzir custos com estocagem e transporte e aumentar a eficiência do processo de distribuição. A abordagem de *Crossdocking* é uma destas alternativas.

Crossdocking é uma abordagem que visa eliminar os principais problemas em centros de distribuição tradicionais, estocagem e coleta dos produtos. Os centros de *Crossdocking* (CCD) praticamente não realizam as operações de armazenagem e coleta, pois todas as cargas recebidas dos diversos fornecedores são consolidadas e prontamente carregadas em veículos de entrega que atenderão os clientes. Em alguns casos, há a necessidade de armazenar produtos por certo período de tempo, por um motivo qualquer, como atrasos de outros produtos que farão parte da carga, ou atrasos dos caminhões de entrega, ou pela impossibilidade de serem carregadas no momento. É possível ter um pequeno estoque para lidar com essas variações, porém o objetivo dos CCD é trabalhar com estoque zero ou o mais próximo disso possível.

Este artigo trabalha com dois problemas importantes da literatura, o sequenciamento dos caminhões de descarregamento e carregamento em centros de *Crossdocking*, e a roteirização dos caminhões de entrega que irão atender os diversos clientes da empresa. Para isso, um modelo de programação inteira é testado para diferentes cenários e tamanhos de instâncias.

2. Fundamentação Teórica

O aumento do interesse de empresas na abordagem de *Crossdocking* para suas operações tem motivado diversas pesquisas na área durante os últimos anos. As decisões a serem tomadas em CCD consistem em decisões operacionais, como sequenciamento dos caminhões, roteamento das entregas, alocação dos produtos a cada caminhão, designação das docas, etc., e de decisões táticas e estratégicas, como *layout* do galpão, estrutura da rede de suprimentos e localização das instalações [Agustina et al., 2010].

Apesar dos inúmeros trabalhos em vários dos temas mencionados, são poucos os que reúnem mais de um problema em uma mesma solução. Schmid e Laporte [2013] mostram diversos problemas em redes de distribuição, e como poderia ser feita a integração dos diferentes problemas encontrados (roteamento, sequenciamento, *lotsizing*, dimensionamento de inventário, etc.). Boysen e Fliedner [2010] fazem uma revisão dos problemas em *Crossdocking*, citando vários trabalhos realizados. Também nesta revisão, os autores citam que problemas onde o sequenciamento e roteamento são ambos tratados não são ainda muito explorados, mas que seria uma abordagem interessante de ser feita. Os autores propõem um modelo de sequenciamento, onde as datas de conclusão dos *jobs* já são pré-determinadas, e tem por objetivo minimizar o atraso ponderado dessas datas de conclusão.

Vahdani e Zandieh [2010] apresentam formulações para o problema de sequenciamento em CCD, apresentando diversas heurísticas e meta-heurísticas para resolvê-lo. Cota [2015] propõe uma formulação indexada no tempo que sequencia os caminhões de chegada e saída em



um centro de *Crossdocking*. Já em Cota et al. [2016] os autores propõem 2 heurísticas para resolver o problema de sequenciamento com múltiplas docas, que apresentam resultados superiores as heurísticas propostas por Chen e Lee [2009], nesses trabalhos a função objetivo minimiza o tempo total necessário para processar todos veículos. Laporte [2016] mostra diferentes aplicações em que o sequenciamento em CCD tem papel importante no roteamento de veículos.

Eksioglu et al. [2009] fazem uma revisão da literatura sobre problemas de roteamento de veículos no geral, e os classificam em diversas categorias. Yu et al. [2016], Lee et al. [2006] e Santos et al. [2013] abordam o problema de roteamento de veículos com *pick-up* e *delivery* em sistemas de *Crossdocking*. El-Sherbeny [2010] aborda o mesmo problema, porém são consideradas janelas de tempo no atendimento aos clientes.

Como dito anteriormente, abordagens que reúnem mais de um problema não são muito exploradas. Problemas que abordam simultaneamente o sequenciamento e o roteamento em sistemas de *Crossdocking* são escassos na literatura. Agustina et al. [2010] escreveram um dos poucos trabalhos disponíveis na literatura sobre o tema. Neste trabalho, eles propõe um modelo para redes de distribuição de alimentos que utilizam *Crossdocking*, onde consideram os tempos de descarregamento, carregamento, transporte, os tempos de movimentação dos caminhões nos pátios, o tempo de movimentação das cargas dentro do CCD e o tempo para montar as cargas. As demandas dos clientes são dadas em número de *pallets*. Os clientes tem uma janela de tempo associada ao seu atendimento, e a entrega fora desta janela (seja atrasada ou adiantada) é penalizada pelo tempo decorrido. O modelo proposto visa minimizar o custo das penalidades por não cumprimento da janela de tempo, o custo por manter produtos no depósito e o custo de transporte das entregas. Por considerar tantas questões, é um modelo complexo, e isso se reflete na resolução de instâncias grandes. Instâncias pequenas são resolvidas, porém à medida que o número de caminhões, docas e clientes aumenta, a aplicação do modelo se torna limitada.

O clássico problema de roteamento do veículo (VRP) consiste em determinar rotas de veículos para um conjunto de clientes geograficamente dispersos, sujeito a várias restrições. O problema é muito estudado na área de otimização combinatória e pertence à classe NP-difícil. Este problema foi primeiro estudado por Dantzig e Ramser [1959], os autores estudaram o roteamento de veículos na distribuição de gasolina para postos revendedores de combustível, para isso propuseram uma formulação de programação linear.

A revisão da literatura nos mostra que abordagens exclusivamente de sequenciamento ou de roteamento são comuns e muito exploradas na literatura. Porém, são poucos os trabalhos que tentam resolver os dois problemas concomitantemente. O artigo apresentado que utilizou essa abordagem conjunta considerou diversos fatores que acabam por comprometer seu desempenho. Assim, o objetivo desse trabalho é trabalhar de forma conjunta os dois problemas a fim de possibilitar sua utilização de maneira simples e eficaz.

Possuindo por base os trabalhos citados nesta sessão, é proposto um modelo que aborda os problemas de sequenciamento e roteamento em CCD, com simplificações de alguns aspectos, de forma a viabilizar sua aplicação em situações reais.

3. Descrição do problema

Dois problemas serão tratados nesse estudo, dessa forma, o modelo proposto visa sequenciar os descarregamentos e carregamentos dos caminhões nas docas de entrada e saída, além de rotear os caminhões de entrega.

A programação de chegada dos caminhões de entrada é conhecida previamente, esses caminhões são sequenciados nas múltiplas docas de entrada existentes no centro. Já os caminhões de entrega, são sequenciados nas múltiplas docas de saída. Esses caminhões irão atender um certo número de clientes, cada um com sua demanda própria. Cada caminhão de entrega só pode ser carregado após os caminhões de entrada – que compõe a demanda dos clientes que o caminhão de entrega irá atender - serem descarregados no centro de distribuição. Assume-se que os caminhões de entrada têm a quantidade exata que os clientes daquele dia demandaram. Caso um cliente não seja atendido, a quantidade que não foi entregue fica estocada no CCD. Os caminhões de entrega são idênticos, e há um número limitado deles. A utilização de um caminhão de entrega não gera um custo fixo. Um mesmo caminhão de entrega pode atender diversos clientes, contando



que sua capacidade (dada pelo número máximo de clientes que cada caminhão consegue visitar em um dia) permita. Porém, cada cliente atendido é visitado por somente um caminhão. Uma vez que um caminhão começa a ser processado a operação deve ser finalizada, não sendo permitidas interrupções. É importante ressaltar que o sequenciamento da operação leva em conta somente o dia atual.

Para o problema de roteirização, as distâncias dos clientes entre si e dos clientes ao depósito é dada pelo tempo de viagem. O prazo de entrega de cada cliente é dado por uma janela de tempo - com um horário inicial e final - que ele pode receber suas mercadorias. É permitido tempo de espera, onde um caminhão aguarda para atender um cliente se sua janela de tempo ainda não se iniciou. Um cliente pode ou não ser atendido. Quando um cliente não é atendido, gera-se uma penalização, sendo que esta penalização varia de acordo com a importância do cliente.

3.1 Formulação matemática

Para facilitar o entendimento do modelo, a notação utilizada é resumida abaixo.

Parâmetros de entrada:

- I : estágios de processamento (1: entrada, 2: saída);
- m_i : número de docas no estágio i , $i \in I$
- n_i : número de caminhões no estágio i , $i \in I$
- p_{ik} : tempo de processamento do caminhão k no estágio i , $i \in I, k \in \{1, \dots, n_i\}$
- g_k : horário que o caminhão k fica disponível para processamento no estágio 1, $k \in \{1, \dots, n_1\}$
- nc : número de clientes
- V : conjunto com todos clientes e o centro de *Crossdocking* (representado pelos índices 0 e $nc + 1$)
- C : conjunto com apenas os clientes
- D : conjunto com apenas o centro de *Crossdocking* (início: 0 e fim: $nc + 1$)
- s_i : tempo de atendimento do cliente i , $i \in V$
- t_{ij} : tempo de viagem entre clientes i e j , $i \in V, j \in V, i \neq j$
- ps_i : peso (importância) do cliente i , $i \in V$
- Q : número máximo de clientes atendidos por caminhão
- ho_i : horário inicial da janela de tempo do cliente i , $i \in V$
- hf_i : horário final da janela de tempo do cliente i , $i \in V$
- M : número grande. Utilizou-se $M = hf_{nc+1}$
- S_i : subconjuntos de caminhões do estágio 1 que devem ser descarregados antes que o caminhão que atendará o cliente i inicie seu carregamento no estágio 2, $i \in C$. São os caminhões de entrada que fazem parte da demanda do cliente i .

Variáveis de decisão:

- c_{ik} : período de término do carregamento ou descarregamento do caminhão k no estágio i , $i \in I, k \in \{1, \dots, n_i\}$
- $z_{iak} = 1$, se o caminhão k é alocado à doca a no estágio i ; senão $z_{iak} = 0$, $i \in I, a \in \{1, \dots, m_i\}, k \in \{1, \dots, n_i\}$
- $r_{ikf} = 1$, se o caminhão k precede o caminhão f na ordem de processamento do estágio i ; senão $r_{ikf} = 0$, $i \in I, k \in \{1, \dots, n_i\}, f \in \{1, \dots, n_i\}$
- $x_{ijk} = 1$, se o caminhão k percorre o trajeto entre i e j ; senão $x_{ijk} = 0$, $i \in V, j \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}$
- $y_{ik} = 1$, se o caminhão k atende o cliente i ; senão $y_{ik} = 0$, $i \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}$
- w_{ik} : horário que o veículo k inicia o atendimento do cliente k , $i \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}$.

3.2 Modelo matemático

A partir da notação e variáveis de decisão descritas, segue o Modelo de Programação Inteira Mista proposto:



$$\min fo = 1 + \sum_{i \in V} (1 - \sum_{k \in K} (y_{ik} * ps_i)) \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{a=1}^{m_1} z_{1ak} = 1; \quad \forall k \in \{1, \dots, n_1\}; \quad (2)$$

$$\sum_{a=1}^{m_2} z_{2ak} = 1 - x_{0,nc+1,k}; \quad \forall k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (3)$$

$$c_{1k} \geq p_{1k} + g_k; \quad \forall k \in \{1, \dots, n_1\}; \quad (4)$$

$$c_{2k} + M * (1 - y_{ik}) \geq c_{1j} + p_{2k}; \quad \forall k \in \{1, \dots, n_2\}, i \in C, j \in S_i; \quad (5)$$

$$c_{ik} + M * (2 + r_{ikf} - z_{iak} - z_{iaf}) \geq c_{if} + p_{ik}; \quad \forall i \in I, k \in \{1, \dots, n_i\}, f \in \{1, \dots, n_i\}, a \in \{1, \dots, m_i\}, k \neq f; \quad (6)$$

$$c_{if} + M * (3 - r_{ikf} - z_{iak} - z_{iaf}) \geq c_{ik} + p_{if}; \quad \forall i \in I, k \in \{1, \dots, n_i\}, f \in \{1, \dots, n_i\}, a \in \{1, \dots, m_i\}, k \neq f; \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} y_{ik} \leq Q + 2; \quad \forall k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} \leq 1; \quad i \in C; \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = n_2; \quad \forall i \in D; \quad (10)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ijk} = y_{jk}; \quad \forall j \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}, j \neq 0; \quad (11)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = y_{ik}; \quad \forall i \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}, i \neq nc + 1; \quad (12)$$

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} \leq w_{jk} + M * (1 - x_{ijk}); \quad \forall i \in V, j \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}, i \neq j; \quad (13)$$

$$w_{ik} \leq hf_i + M * (1 - y_{ik}); \quad \forall i \in C, k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (14)$$

$$w_{ik} + M * (1 - y_{ik}) \geq ho_i; \quad \forall i \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (15)$$

$$x_{jjk} = 0; \quad \forall j \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (16)$$

$$w_{ik} \leq M * y_{ik}; \quad \forall i \in C, k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (17)$$

$$c_{2k} \leq w_{jk} - t_{0j} + M * (1 - x_{0jk}); \quad \forall j \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (18)$$

$$c_{2k} \leq M * \sum_{a=1}^{m_2} z_{2ak}; \quad \forall k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (19)$$

$$w_{ik} \geq 0; \quad \forall i \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (20)$$

$$c_{ik} \geq 0; \quad \forall i \in I, k \in \{1, \dots, n_i\}; \quad (21)$$

$$z_{iak}, r_{ikf} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in I, k \in \{1, \dots, n_i\}, f \in \{1, \dots, n_i\}, a \in \{1, \dots, m_i\}; \quad (22)$$

$$x_{ijk}, y_{ik} \in \{0, 1\}; \quad \forall i \in V, j \in V, k \in \{1, \dots, n_2\}; \quad (23)$$

A função objetivo (1) visa minimizar a quantidade de atrasos ponderados pela importância de cada cliente. As restrições (2) garantem que cada caminhão no estágio 1 seja alocado a somente uma doca de recebimento. No conjunto de restrições (3), é garantido que cada caminhão no estágio 2 seja alocado a somente uma doca de expedição, e caso ele não seja utilizado no roteamento, então não será alocado a nenhuma doca. Em (4), se assegura que o tempo de processamento de cada caminhão no estágio 1 seja respeitado e que estes estarão disponíveis para processamento apenas após sua chegada ao CCD. As restrições em (5) certificam que cada caminhão no estágio 2 só seja processado após todos os caminhões no estágio 1, precedentes, serem descarregados. Os conjuntos (6) e (7) garantem a não interferência no sequenciamento de caminhões, ou seja, não permitem que haja processamento simultâneo em uma mesma doca. Em (8), assegura-se que nenhum caminhão ultrapasse seu limite de clientes visitados. As restrições em (9) permitem que um cliente seja atendido ou não, enquanto em (10) garante-se que todos os



caminhões devem ter início e fim do trajeto no depósito (caso não visitem nenhum cliente, eles fazem o trajeto “depósito-depósito”). A conservação do fluxo no roteamento é garantida em (11) e (12). O conjunto (13) garante a viabilidade em relação aos tempos. As restrições (14) e (15) asseguram que janelas de tempo são respeitadas, caso o cliente seja atendido, e as restrições em (16) impedem o trajeto de um nó para ele mesmo. O conjunto de restrições em (17) garantem que se um cliente não é atendido, o valor para seu tempo de atendimento é igual a zero. Em (18), garante-se que o primeiro cliente de cada caminhão só será atendido após este caminhão ser carregado e percorra o trajeto do depósito até o cliente. O conjunto em (19) garante que se um caminhão no estágio 2 não é alocado a nenhuma doca, ele não é processado. Por fim, as restrições (20), (21), (22) e (23) especificam os domínios das variáveis de decisão do modelo.

4. Experimentos computacionais

Os experimentos computacionais foram realizados em um computador com processador Intel Core i7-4700HQ, 2.40GHz, 12 GB RAM, no sistema operacional Windows 10 de 64 bits, versão 1607. A linguagem de programação utilizada foi o AMPL e o software de otimização CPLEX 12.6.3.0.

4.1. Geração de Instâncias

As instâncias foram geradas utilizando a linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA), do software Excel versão 2013. O gerador de números pseudoaleatórios utilizado foi o de *Mersenne Twister*.

As instâncias foram geradas tendo em mente um dia de operações. Cada unidade de tempo em uma instância corresponde a 5 minutos reais. Para se aproximar de uma situação mais realística, tratou-se um centro de distribuição e clientes cujas operações só podem ocorrer entre as 6:00, no mínimo, e as 18:00 horas, no máximo. Em unidades de tempo nas instâncias, correspondem a 0 e 144, respectivamente.

As propriedades das instâncias geradas foram:

- O tempo de processamento dos caminhões segue uma distribuição uniforme entre 10 e 40 minutos. $p_{ik} \sim U[2,8]$.
- O número máximo de caminhões precedentes de um determinado cliente segue uma distribuição uniforme entre 1 e metade do número total de caminhões de entrada. Dessa maneira, o número de caminhões precedentes de cada caminhão de saída será um valor aleatório. $S_i \sim U[1, n_1/2]$.
- O horário que um caminhão de entrada fica disponível para ser descarregado segue uma distribuição uniforme entre 0 e 2 horas. Isso significa que ele pode já estar disponível quando as operações começam (às 6:00) ou então ficar disponível até no máximo 8:00. $g_k \sim U[0,24]$.
- Uma vez que a velocidade dos caminhões é assumida como constante, gerou-se o tempo entre duas coordenadas, que seguiu uma distribuição uniforme entre 5 e 50 minutos.
 $t_{ij} = \text{distância euclidiana entre nó } i (x_i, y_i) \text{ e nó } j (x_j, y_j).$
- O tempo de atendimento em um cliente segue uma distribuição uniforme entre 5 e 20 minutos. $s_i \sim U[1,4]$.
- O peso de um cliente pode ser baixo (1), médio (2) ou alto (3). $ps_i \sim U[1,3]$.
- O número máximo de clientes que um caminhão pode atender segue uma distribuição uniforme entre o número total de clientes dividido pelo número de caminhões de entrega (arredondado sempre para cima), acrescido de 2.

$$Q \sim U[x, x + 2], \text{ sendo } x = \frac{nc}{n_2}.$$

- O horário inicial da janela de tempo de cada cliente segue uma distribuição normal de 6:00 e 9:00. $ho_i \sim U[0,36]$.
- O horário final da janela de tempo de cada cliente é dado pelo seu horário inicial mais sua duração. A duração segue uma distribuição normal entre $6*\alpha$ e $9*\alpha$ horas. O α diz



respeito a qual dos cenários de janelas de tempo está sendo testado. Neste trabalho, as instâncias foram testadas, além de outras variações discutidas mais adiante, em cenários com janelas de tempo “apertadas” e “folgadas”, com $\alpha = 0,7$ e $\alpha = 1,0$, respectivamente. Portanto, as durações variam entre 4,2 e 6,3 horas no caso de janelas apertadas e 6 e 9 horas com janelas folgadas.

$$duração \sim U[72 * \alpha, 108 * \alpha];$$

$$hf_i = ho_i + duração.$$

As instâncias foram geradas para três cenários distintos. Como este trabalho é composto da união de dois problemas (sequenciamento e roteamento), que usualmente são tratados de forma independente, considerou-se necessária a realização de testes em situações em que ambos os problemas tivessem uma importância equivalente na resolução da instância, quanto situações em que uma das partes do problema tivesse um impacto maior na solução.

- Cenário Normal: o sequenciamento e o roteamento têm, a princípio, o mesmo impacto na solução. Portanto, não há importância maior de nenhuma das partes do problema.

- Foco no roteamento: há um número consideravelmente maior de caminhões de saída do que de entrada. O número de clientes também é maior que nos outros cenários. Com um sequenciamento simples de ser resolvido, o foco na solução do problema se encontra em solucionar o roteamento dos caminhões. A dificuldade da solução se encontra em como realizar as entregas e não na ordem de processamento dos caminhões.

- Foco no sequenciamento: o número de caminhões é substancialmente maior que o número de docas. O número de clientes é o mesmo do número de caminhões de entrega. Isso se dá para que o roteamento dos caminhões seja uma solução simples, fazendo assim com que o sequenciamento seja a etapa mais crítica da solução.

A fim de trabalhar diferentes instâncias dentro de cada cenário, cada um deles contou com quatro subdivisões, essas subdivisões testaram os dois tipos de janela de tempo (folgada e apertada) em 10 instâncias para teste cada, totalizando 240 instâncias testadas. A Tabela 4.1 simplifica as instâncias testadas.

Tabela 4.1: Variação das instâncias de teste.

Cenário	Subdivisão	Caminhões		Docas		Clientes
		Entrada	Saída	Entrada	Saída	
Normal	1.1	10	4	4	2	10
	1.2	30	10	8	4	30
	1.3	50	10	8	4	50
	1.4	80	10	8	4	70
Foco: Roteamento	2.1	2	4	2	4	10
	2.2	4	8	4	8	20
	2.3	4	8	4	8	50
	2.4	4	10	4	10	100
Foco: Sequenciamento	3.1	10	2	4	1	2
	3.2	20	4	5	2	4
	3.3	50	8	8	3	8
	3.4	100	20	8	5	20

4. 2. Resultados dos experimentos computacionais

Os resultados obtidos para os testes dos cenários Normal, com foco no Roteamento e com foco no Sequenciamento, são expostos nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente. São apresentados resultados de média, melhor caso, pior caso e desvio padrão para os tempos computacionais e para os *Gaps*. Os tempos computacionais são apresentados para a resolução do modelo completo (inteiro) e para a sua relaxação linear. O *Gap* considerado corresponde à diferença entre o valor da função objetivo encontrada pelo modelo inteiro dentro do limite de tempo e o valor encontrado por sua relaxação linear. Ele é calculado pela seguinte fórmula:



$$Gap = \frac{fo(MC) - fo(MR)}{fo(MC)} * 100$$

Onde $fo(MC)$ é a melhor solução encontrada pelo modelo completo e $fo(MR)$ a melhor solução encontrada pelo modelo relaxado, dentro do tempo limite, que foi de 3600 segundos para cada instância.

Tabela 4.2: Resultados para o cenário Normal. São apresentados a média, o melhor caso, o pior caso e o desvio padrão para os tempos de execução do modelo completo e de sua relaxação linear e para os Gaps. A coluna Resol. corresponde à porcentagem de instâncias em que se encontrou a solução ótima dentro do limite de 3600 segundos e n_1 = número de caminhões de entrada, m_1 = número de docas de recebimento, n_2 = número de caminhões de saída, m_2 = número de docas de expedição, nc = número de clientes, e # corresponde às subdivisões dentro do cenário.

Janela	#	Normal					Análise	Modelo Completo		Relaxação Linear		Gap
		n_1	m_1	n_2	m_2	nc		T(s)*	Resol.	T(s)		
Apertada ($\alpha=0.7$)	1.1	10	4	4	2	10	Média	0,41	100%	0,02	0,00	
							Melhor caso	0,27		0,02	0,00	
							Pior caso	1,39		0,03	0,00	
							Desvio padrão	0,35		0,00	0,00	
	1.2	30	8	10	4	30	Média	28,60	100%	0,16	0,00	
							Melhor caso	8,50		0,16	0,00	
							Pior caso	122,73		0,16	0,00	
							Desvio padrão	34,46		0,00	0,00	
	1.3	50	8	10	4	50	Média	2598,94	60%	0,46	0,37	
							Melhor caso	1841,22		0,42	0,00	
							Pior caso	3416,34		0,55	0,98	
							Desvio padrão	593,28		0,04	0,47	
	1.4	80	8	10	4	70	Média	-	0%	1,52	0,88	
							Melhor caso	-		1,28	0,78	
							Pior caso	-		2,42	0,99	
							Desvio padrão	-		0,34	0,07	
Folgada ($\alpha=1.0$)	1.1	10	4	4	2	10	Média	0,30	100%	0,01	0,00	
							Melhor caso	0,25		0,00	0,00	
							Pior caso	0,34		0,02	0,00	
							Desvio padrão	0,03		0,01	0,00	
	1.2	30	8	10	4	30	Média	19,91	100%	0,16	0,00	
							Melhor caso	7,89		0,14	0,00	
							Pior caso	64,72		0,17	0,00	
							Desvio padrão	16,74		0,01	0,00	
	1.3	50	8	10	4	50	Média	726,68	90%	0,44	0,10	
							Melhor caso	110,31		0,41	0,00	
							Pior caso	1611,09		0,58	0,96	
							Desvio padrão	504,17		0,05	0,30	
	1.4	80	8	10	4	70	Média	-	0%	1,65	0,87	
							Melhor caso	-		1,36	0,69	
							Pior caso	-		1,92	0,99	
							Desvio padrão	-		0,17	0,10	

(-) As instâncias não foram resolvidas em 3600 segundos.

(*) Os tempos não incluem as instâncias não resolvidas.

Analisando a Tabela 4.2 percebe-se que para as duas primeiras subdivisões 1.1 e 1.2, todas as instâncias foram resolvidas dentro do tempo limite para ambas janelas de tempo. A solução ótima encontrada pelo modelo completo correspondeu sempre à solução ótima do modelo relaxado ($Gap = 0,00\%$). Na subdivisão 1.3, 40% das instâncias na janela de tempo apertada e 10% das instâncias na janela de tempo apertada não foram solucionadas em otimalidade dentro do limite de 3600 segundos. Das que foram solucionadas, percebe-se um aumento considerável do tempo médio de execução em relação às subdivisões anteriores. Para a subdivisão 1.4,



nenhuma instância, seja para janelas de tempo apertadas ou folgadas, foi resolvida em otimalidade dentro do tempo limite.

Tabela 4.3: Resultados para o cenário com foco no Roteamento. São apresentados a média, o melhor caso, o pior caso e o desvio padrão para os tempos de execução do modelo completo e de sua relaxação linear e para os *Gaps*. A coluna Resol. corresponde à porcentagem de instâncias em que se encontrou a solução ótima dentro do limite de 3600 segundos e n_1 = número de caminhões de entrada, m_1 = número de docas de recebimento, n_2 = número de caminhões de saída, m_2 = número de docas de expedição, nc = número de clientes, e # corresponde às subdivisões dentro do cenário.

Janela	Foco: Roteamento						Análise	Modelo Completo		Relaxação Linear	
	#	n_1	m_1	n_2	m_2	nc		T(s)*	Resol.	T(s)	Gap
Apertada ($\alpha=0.7$)	2.1	2	2	4	4	10	Média	0,15	100%	0,01	0,00
							Melhor caso	0,14		0,00	0,00
							Pior caso	0,19		0,02	0,00
							Desvio padrão	0,02		0,01	0,00
	2.2	4	4	8	8	20	Média	1,97	100%	0,04	0,00
							Melhor caso	1,39		0,03	0,00
							Pior caso	3,44		0,05	0,00
							Desvio padrão	0,58		0,01	0,00
	2.3	4	4	8	8	50	Média	60,81	100%	0,20	0,00
							Melhor caso	11,02		0,19	0,00
							Pior caso	156,53		0,22	0,00
							Desvio padrão	47,49		0,01	0,00
2.4	4	4	10	10	100	Média	710,16	50%	0,91	0,16	
						Melhor caso	121,69		0,88	0,00	
						Pior caso	1956,64		0,94	0,54	
						Desvio padrão	751,34		0,02	0,22	
Folgada ($\alpha=1.0$)	2.1	2	2	4	4	10	Média	0,18	100%	0,01	0,00
							Melhor caso	0,14		0,00	0,00
							Pior caso	0,22		0,02	0,00
							Desvio padrão	0,03		0,01	0,00
	2.2	4	4	8	8	20	Média	1,88	100%	0,04	0,00
							Melhor caso	1,48		0,03	0,00
							Pior caso	2,73		0,05	0,00
							Desvio padrão	0,41		0,01	0,00
	2.3	4	4	8	8	50	Média	45,11	100%	0,20	0,00
							Melhor caso	10,94		0,19	0,00
							Pior caso	90,33		0,22	0,00
							Desvio padrão	27,50		0,01	0,00
2.4	4	4	10	10	100	Média	1237,41	70%	0,92	0,01	
						Melhor caso	346,89		0,89	0,00	
						Pior caso	2755,58		0,95	0,05	
						Desvio padrão	802,00		0,02	0,02	

(*) Os tempos não incluem as instâncias não resolvidas.

Na Tabela 4.3, todas instâncias das subdivisões 2.1, 2.2 e 2.3, em janelas de tempo apertadas e folgadas, tiveram sua solução ótima encontrada pelo modelo completo, e corresponderam sempre ao mesmo valor da solução ótima encontrada pelo modelo relaxado. Já na subdivisão 2.4, 50% das instâncias com janelas de tempo apertadas e 30% com janelas de tempo folgadas não obtiveram a solução dentro do tempo limite. Para as instâncias resolvidas, percebe-se um grande aumento do tempo médio de execução.



Tabela 4.4: Resultados para o cenário com foco no Sequenciamento. São apresentados a média, o melhor caso, o pior caso e o desvio padrão para os tempos de execução do modelo completo e de sua relaxação linear e para os *Gaps*. A coluna Resol. corresponde à porcentagem de instâncias em que se encontrou a solução ótima dentro do limite de 3600 segundos e n_1 = número de caminhões de entrada, m_1 = número de docas de recebimento, n_2 = número de caminhões de saída, m_2 = número de docas de expedição, nc = número de clientes, e # corresponde às subdivisões dentro do cenário.

Janela	Foco: Sequenciamento						Análise	Modelo Completo		Relaxação Linear		Gap
	#	n_1	m_1	n_2	m_2	nc		T(s)*	Resol.	T(s)		
Apertada ($\alpha=0.7$)	3.1	10	4	2	1	2	Média	0,08	100%	0,02	0,00	
							Melhor caso	0,05		0,02	0,00	
							Pior caso	0,13		0,02	0,00	
							Desvio padrão	0,03		0,00	0,00	
	3.2	20	5	4	2	4	Média	0,47	100%	0,03	0,00	
							Melhor caso	0,27		0,02	0,00	
							Pior caso	0,61		0,03	0,00	
							Desvio padrão	0,11		0,01	0,00	
	3.3	50	8	8	3	8	Média	68,07	100%	0,17	0,00	
							Melhor caso	32,94		0,16	0,00	
							Pior caso	288,45		0,19	0,00	
							Desvio padrão	78,04		0,01	0,00	
	3.4	100	8	20	5	20	Média	3522,20	10%	0,78	0,74	
							Melhor caso	3522,20		0,70	0,00	
							Pior caso	3522,20		0,83	0,96	
							Desvio padrão	-		0,04	0,32	
Folgada ($\alpha=1.0$)	3.1	10	4	2	1	2	Média	0,06	100%	0,01	0,00	
							Melhor caso	0,05		0,00	0,00	
							Pior caso	0,08		0,02	0,00	
							Desvio padrão	0,01		0,01	0,00	
	3.2	20	5	4	2	4	Média	0,43	100%	0,03	0,00	
							Melhor caso	0,33		0,02	0,00	
							Pior caso	0,50		0,03	0,00	
							Desvio padrão	0,06		0,01	0,00	
	3.3	50	8	8	3	8	Média	22,20	100%	0,16	0,00	
							Melhor caso	8,28		0,16	0,00	
							Pior caso	32,52		0,17	0,00	
							Desvio padrão	8,98		0,01	0,00	
	3.4	100	8	20	5	20	Média	1597,04	80%	0,76	0,12	
							Melhor caso	397,86		0,73	0,00	
							Pior caso	2727,08		0,80	0,67	
							Desvio padrão	773,16		0,02	0,25	

(*) Os tempos não incluem as instâncias não resolvidas.

Na Tabela 4.4, observamos resultados semelhantes aos da Tabela 4.3. Todas as instâncias das primeiras três subdivisões (3.1, 3.2, 3.3) foram resolvidas, com valor ótimo do modelo completo igual ao encontrado pela relaxação linear. Na última subdivisão, 90% das instâncias com janelas de tempo apertadas e 20% das instâncias com janelas de tempo folgadas não encontraram a solução do modelo completo dentro do tempo estabelecido.

Em todas as tabelas percebe-se que o tempo de execução aumenta exponencialmente conforme as instâncias aumentam. Os cenários com focos no roteamento e sequenciamento tiveram um desempenho similar, com o modelo apresentando dificuldades para resolver instâncias maiores. No cenário Normal, por ser demandado do modelo a resolução mais complexa de ambos sequenciamento e roteamento, era esperado que obtivesse um resultado inferior aos outros cenários, com as dificuldades de se resolver instâncias mais rapidamente notadas. Em



suma, a obtenção da solução ótima para instâncias grandes não é completamente viável. Porém, para pequenas e médias instâncias, o modelo apresentou bom desempenho.

5. Conclusões

Esse artigo buscou resolver o problema conjunto de sequenciamento e roteamento de caminhões em centros de *Crossdocking*, uma abordagem em redes de distribuição que se caracteriza por possibilitar baixos custos com armazenagem de produtos e com o transporte dos mesmos.

Foi proposto um modelo de programação inteira mista, e testes computacionais foram feitos para verificar sua viabilidade. Para instâncias pequenas e médias (de aproximadamente até 50 caminhões), o modelo resolveu na otimalidade e em tempo computacional viável. Porém, por se tratar de um problema polinomial, seu tempo de execução cresce exponencialmente com o tamanho das instâncias.

Ao simplificar questões como as quantidades de produtos na demanda de cada cliente e não permitir atendimento aos clientes fora de sua janela de tempo, é possível que a aplicação desta solução em situações reais seja limitada. Considerar não só estas questões, mas também outras - tempos de movimentação internos no depósito e a existência de uma disponibilidade limitada de espaço para estocagem de produtos não entregues - poderiam ser implementações interessantes a serem feitas em trabalhos posteriores.

Além de considerar as questões citadas, outro ponto interessante de ser abordado em trabalhos futuros é a utilização de heurísticas que sejam capazes de resolver instâncias maiores em tempos computacionais viáveis, o que tornaria a aplicação da solução mais adequada e viável em operações reais do dia-a-dia.

O problema abordado é um dos inúmeros problemas em centros de *Crossdocking*, que é apenas um dos temas que a Logística Urbana trata. Existem ainda diversos outros desafios e perguntas a serem respondidas, com inúmeras oportunidades de pesquisa. Encontrar formas inteligentes e sobretudo eficientes de resolver problemas cada vez mais comuns no nosso cotidiano não só melhoraram as operações das empresas, como fazem o meio onde vivemos mais organizado, aproveitado e agradável para todos.

6. Agradecimentos

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG pelo apoio financeiro recebido.

Referências

Agustina, D., C.K.M.Lee, e Piplani, R. (2010). A Review: Mathematical Modles for Cross Docking Planning. *International Journal of Engineering Business Management*, 2(2):47–54.

Agustina, D., RajeshPiplani, e C.K.M.Lee (2014). Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains. *Production Economics*, 152:29–41.

Belle, J. V., Valckenaers, P., e Cattrysse, D. (2012). Cross-docking: State of the art. *Omega*, 40: 827–846.

Boysen, N. e Flidner, M (2010). Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agend. *Omega*, 38:413–422.



- Chen, F. e Lee, C. Y. (2009). Minimizing the makespan in a two-machine cross-docking flow shop problem. *European Journal of Operational Research*, 193:59–72.
- Cota, P. M., Gimenez, B. M., Araujo, D. P., Ravetti, M. G., de Souza, M. C., e Nogueira, T. H. (2016). Time-indexed formulation and polynomial time heuristic for a multi-dock truck scheduling problem in a cross-docking centre. *Computers & Industrial Engineering*, 95:135–143.
- Cota, P. M. (2015). Problema de Sequenciamento de Caminhões em Centros de Crossdocking com multiplas docas. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Dantzig, G. B., and Ramser, J. H. The Truck Dispatching Problem. *Management Science* 6, 1 (1959), 80–91
- Eksioglu, B., Vural, A. V., e Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57:1472–1483.
- El-Sherbeny., N. A. (2010). Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University (Science)*, 22:123–131.
- Laporte, G. (2016). Scheduling issues in vehicle routing. *Ann Oper Res*, 236:463–474. Lee, Y. H., Jung, J. W., e Lee, K. M. (2006). Vehicle routing scheduling for cross-docking in the supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 51:247–256.
- Santos, F. A., Mateus, G. R., e da Cunha., A. S. (2013). The Pickup and Delivery Problem with Cross-Docking. *Computers & Operations Research*, 40:1085–1093.
- Savelsbergh, M. e Woensel, T. V. (2016). City Logistics: Challenges and Opportunities. *Transportation Science*, 50(2):579–590.
- Schmid, V., Doerner, K. F., e Laporte, G. (2013). Rich routing problems arising in supply chain management . *European Journal of Operational Research*, 224:435–448.
- Vahdani, B. e Zandieh, M. (2010). Scheduling trucks in cross-docking systems: Robust metaheuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 58:12–24.
- Yu, V. F., Jewpanya, P., e Redi., A. P. (2016). Open vehicle routing problem with cross-docking. *Computers & Industrial Engineering*, 94:6–17.