

IMPACTO COMPUTACIONAL DA ELASTICIDADE DE JANELAS DE TEMPO NO IRPTW COM VEÍCULO ÚNICO¹

Bruno Eckwert Demantova^{a*}, Cassius Tadeu Scarpin^a

^aGrupo de Tecnologia Aplicada à Otimização (GTAO)
Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba-PR, Brasil

Recebido 23/01/2019, aceito 02/04/2020

RESUMO

Certas cadeias de suprimentos requerem planejamentos operacionais focados especialmente no atendimento de padrões de qualidade, estes diretamente ligados aos tempos e horários de entrega dos produtos. O problema de roteamento de estoque com janelas de tempo (IRPTW) tem como objetivo a otimização de cadeias logísticas deste tipo, muito presentes na distribuição de alimentos perecíveis e de combustíveis a granel. Este trabalho desenvolve, a partir de um modelo IRPTW exato, análises sobre parâmetros determinantes na operação destas cadeias, como tamanhos de janela de tempo, custos de estoque e estrutura da função objetivo. Um grupo de 600 novas instâncias foi avaliado, sendo observada uma relação entre a elasticidade das janelas de tempo e o esforço computacional para a resolução dos problemas. Uma maior dificuldade de resolução para problemas contendo janelas de tempo de duração de 50% do tempo total do período foi observada. Possíveis causas para este fenômeno são abordadas e discutidas no trabalho.

Palavras-chave: Roteamento de estoque, Algoritmo exato, Janelas de tempo.

ABSTRACT

Some supply chains are designed to achieve predetermined quality standards, which are directly dependent on delivery schedules and delivery times. The Inventory Routing Problem with Time Windows (IRPTW) goal is to optimize supply chains with these requirements, like the ones found in the food and fuel delivery industries. This paper considers an IRPTW exact model in order to analyze key parameters that influence the operation of these supply chains, like time windows sizes, inventory cost levels and objective function structures. A group of 600 new instances was tested, providing results where a relationship between the time windows elasticity and the computational effort is observed. Higher computational efforts were observed for the optimization of problems with time windows corresponding to 50% of the total period time. Possible causes for this behavior are addressed and discussed in this paper.

Keywords: Inventory routing, Exact algorithm, Time windows.

*Autor para correspondência. E-mail: brunoeckdema@gmail.com
DOI: 10.4322/PODes.2020.002

¹Todos os autores assumem a responsabilidade pelo conteúdo do artigo.

1. Introdução

O problema de roteamento de estoque (*Inventory Routing Problem - IRP*) tem sua origem no artigo seminal de Bell et al. (1983), no qual o controle de estoque da empresa *Air Products and Chemicals, Inc.* foi integrado ao serviço de roteamento de veículos, de modo a minimizar o custo total de uma cadeia de suprimentos por meio da aplicação de políticas de controle de estoque. A combinação do problema de roteamento de veículos (*Vehicle Routing Problem - VRP*) com o problema de controle de estoque (*Inventory Control Problem - ICP*), usando uma filosofia que busca o ganho comum de fornecedores e clientes por meio da otimização do estoque de ambos, chamada *Vendor Managed Inventory (VMI)*, origina o IRP em sua forma clássica.

Grande parte das extensões do IRP foram elaboradas a partir de adaptações do VRP (Coelho et al., 2014). Dentre essas extensões, destaca-se alterações no número de períodos de tempo de planejamento do problema, número de fornecedores e clientes da cadeia de suprimentos, tipo de roteamento, política de estoque e homogeneidade da frota de veículos (Andersson et al., 2010). Atualmente outras variações mais complexas já vêm sendo estudadas, como: Maior quantidade de elos na cadeia de suprimentos, frotas heterogêneas, velocidade de deslocamentos dos veículos dependendo do instante de tempo que passa por uma determinada via, consideração de trânsito e integração com o carregamento do veículo (Guimarães et al., 2019).

Outros autores também elaboraram novos problemas a partir do IRP. Coelho et al. (2014) cita alguns desses novos problemas, como o problema de roteamento de produção (*Production Routing Problem - PRP*), o IRP com múltiplos produtos, o IRP com entregas diretas e transbordo (*Inventory Routing Problem with Transshipment - IRPT*) e o IRP com demandas probabilísticas (*Stochastic Inventory Routing Problem - SIRP*).

Uma dessas variantes é o problema de roteamento de estoque com janelas de tempo (*Inventory Routing Problem with Time Windows - IRPTW*), que visa a minimização dos custos de uma cadeia de suprimentos por meio de decisões em conjunto de estoque e roteirização, respeitando também restrições de janelas de tempo relacionadas ao tempo de atendimento de clientes e fornecedores (Júnior e Oliveira, 2012).

A adição das janelas de tempo na formulação de problemas clássicos de roteamento denota uma evolução natural destes modelos, integrando as operações diárias de entrega com o planejamento tático do roteamento de veículos. Na literatura há modelos matemáticos, principalmente heurísticos, capazes de resolverem problemas com cadeias de suprimento contendo 100 ou mais clientes (Alves et al., 2018). Na prática, restrições de atendimento comuns, como horários de funcionamento de empresas/clientes ou de jornada de trabalho, poderiam inviabilizar muitas das soluções obtidas para estes casos, isso sem mesmo levar em conta aspectos relacionados aos tempos de viagem não-estáticos entre os pontos.

Produtos perecíveis como frutas, legumes e até mesmo alguns tipos de medicamentos, impõem uma necessidade de consumo mais imediata devido à sua perecibilidade. O planejamento de entregas tem um papel essencial nesses casos, pois a garantia da viabilidade dos produtos durante seu período de armazenamento e entrega aos clientes é essencial. Osvald e Stirn (2008) utilizaram um modelo IRPTW para reduzir em cerca de 30% o número de produtos estragados dentro de uma cadeia logística de alimentos e este valor atingiu aproximadamente 40% quando também consideraram a variação dos tempos de viagem no decorrer do período.

Outro fator associado ao emprego de janelas de tempo e controle de horários de atendimento são indicadores de qualidade de atendimento. Clientes podem, por exemplo, possuir restrições de horário devido à sua localização geográfica, ou solicitar seu atendimento dentro de uma faixa de horário específica. A violação dessas preferências não inviabiliza necessariamente o funcionamento da cadeia logística, mas traria níveis de satisfação maiores aos clientes da mesma. Rahimi et al. (2017) desenvolveram um modelo IRPTW multi-objetivo capaz de balancear custos de roteamento com índices de qualidade de atendimento e emissões poluentes dentro de uma cadeia de suprimentos alimentícia. O nível de qualidade de atendimento é dependente do atendimento dos clientes dentro de suas restrições de horário e de

entregas que permitam a manutenção de seus estoques sem que os produtos acabem se tornando inviáveis para consumo.

Ao contrário da roteirização de veículos com janelas de tempo (*Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW*), que possui diversos estudos acerca de algoritmos exatos (Baldacci et al., 2012) e heurísticos de resolução (El-Sherbeny, 2010), assim como instâncias referência para testes (Solomon, 1987), o IRPTW começou a ser abordado com mais intensidade nos últimos anos.

Lau et al. (2000) apresentaram um dos primeiros trabalhos a propor uma metodologia para o IRPTW que obtêm, com consistência, resultados factíveis com eficiência computacional para o problema. É proposto a decomposição do problema maior em dois subproblemas (distribuição e roteamento) e uma interface que possibilite a iteração em conjunto de dois diferentes algoritmos de resolução, utilizando conceitos de programação inteira e mista, programação de restrições e busca tabu.

Lau et al. (2002) propõem um modelo simples, com um fornecedor distribuindo um produto para um conjunto de clientes com janelas de tempo específicas e penalizações associadas ao atraso de entregas (*backlog*). Uma combinação de modelos de fluxo de rede e busca local foi utilizada para a resolução do problema de controle de estoque, para em seguida ser executada a resolução do roteamento associado, solucionando o problema de forma integrada.

Lau et al. (2003) propuseram o IRPTW como um problema multiobjetivo e determinaram uma solução a partir de sua decomposição em subproblemas com objetivos únicos, com a aplicação de um algoritmo híbrido com colônia de formigas e busca tabu.

Liu e Lee (2011), considerando a escassez de modelos presentes na literatura, propuseram um modelo exato para o IRPTW com base no VRPTW e no ICP, em que um fornecedor com múltiplos veículos deve atender um conjunto de clientes sujeito a janelas de tempo não-rígidas, usando o conceito de tempo de ciclo de pedidos para determinar a periodicidade das entregas. Foi proposta uma metaheurística de duas fases, primeiro formando uma solução inicial e depois melhorando-a por meio de um algoritmo de busca local com busca tabu. Como o modelo admite que todos os clientes devem ser atendidos a cada período de ciclo de pedido, os autores apresentaram resultados a partir das instâncias de Solomon (1987), com soluções exatas para exemplos de menor escala e soluções heurísticas para casos maiores.

Li et al. (2014) desenvolveram um modelo matemático para o IRP multiveículo com o objetivo de minimizar o tempo total de viagem, baseado no sistema de entrega de combustível de uma grande empresa petroquímica da China. Um modelo matemático foi empregado em conjunto com um algoritmo de busca tabu e técnicas de relaxação lagrangeana. Os autores elaboraram instâncias próprias e apresentaram resultados exatos para exemplos de menor escala, enquanto problemas maiores foram solucionados com o uso de técnicas de relaxação e de uma metaheurística.

Lappas et al. (2017) propuseram um modelo multiperíodo contendo um fornecedor e um conjunto de clientes que possuem janelas de tempo de funcionamento. São considerados um produto, uma frota de veículos homogênea e uma política *order-up-to-level* (OU). Uma metaheurística de duas fases é proposta, em que a primeira determina os clientes a serem atendidos e as quantidades de produto entregue, enquanto a segunda usa busca local para determinar as rotas e os horários de atendimento aos clientes. Os resultados do algoritmo proposto foram avaliados junto a um conjunto de instâncias elaboradas pelos próprios autores.

Demantova e Scarpin (2018) avaliaram o desempenho de um modelo matemático para o IRPTW com veículo único. Dois tamanhos de janela de tempo foram considerados durante a etapa de testes, sendo observado que com o aumento das opções de roteamento, proporcionado por janelas de tempo mais flexíveis, também aumenta o esforço computacional do modelo para a resolução dos problemas.

Alguns trabalhos exploram características do VRPTW para criar modelos e algoritmos de solução para outras derivações do problema de roteamento com janelas de tempo. O problema de roteamento de estoque com janelas de tempo e demandas estocásticas (*Stochastic Inventory Routing Problem with Time Windows - SIRPTW*) serviu como base para o trabalho de Zeng e

Zhao (2010), que otimizou um problema IRP com janelas de tempo não-rígidas com o uso de um processo de decisão de Markov. Alves et al. (2018) desenvolveram um modelo SIRPTW que visa otimizar janelas de tempo de atendimento, capacidades de estoque nos clientes e fornecedor e níveis de confiança de atendimento individuais a cada cliente, ao mesmo tempo que considera demandas estocásticas para cada período de tempo.

Qiu et al. (2018) apresentam uma formulação aplicada ao roteamento de produção com janelas de tempo (*Production Routing Problem with Time Windows - PRPTW*), com um algoritmo *branch-and-cut* e desigualdades válidas. Uma metaheurística é usada em instâncias maiores, que combina conceitos de busca local, busca tabu e *Simulated Annealing*.

Por ser uma combinação dos problemas de controle de estoque e de roteamento de veículos, o IRPTW possui uma estrutura *NP-Hard* (Liu e Lee, 2011). Usualmente aplicam-se heurísticas para a aceleração do processo de otimização e convergência dos modelos, o que acaba gerando uma escassez de resultados para abordagens exatas. A formulação do problema entre os autores também é bastante variada. Enquanto alguns autores admitem o IRPTW como uma variação do problema de roteamento com janelas de tempo, em que o principal foco é a roteirização eficaz dos veículos de entrega por meio da minimização dos caminhos percorridos, outros já integram aspectos de controle de estoque com maior relevância, porém o número restrito de trabalhos na área e as diferentes abordagens tomadas entre os autores tornam o problema geral bastante variado.

De maneira a elaborar um problema em que ambos esses focos – roteamento e controle de estoque - sejam considerados e possuam relevância similar, este trabalho propõe uma abordagem exata para o IRPTW considerando um problema de roteamento de estoque com um único veículo capacitado, política de reabastecimento OU, restrições de *stock-out* tanto no fornecedor quanto nos clientes e um planejamento multiperíodo. Para isso, uma adaptação do modelo matemático proposto nos trabalhos de Archetti et al. (2007) e Solomon (1987) foi desenvolvida. A junção destes dois modelos proporciona a tomada de decisão conjunta e um modelo geral e de fácil adaptação para casos mais específicos, aspectos ainda pouco explorados na literatura do IRPTW.

Também são avaliadas a influência do tamanho da cadeia de suprimentos e de parâmetros relacionados a janela de tempo nos tempos computacionais dos modelos. Tomando como base a análise elaborada por Demantova e Scarpin (2018), um modelo matemático reformulado é apresentado junto de um grupo de instâncias contendo configurações adicionais, considerando diferentes números de clientes na cadeia, diferentes tamanhos de janelas de tempo, diferentes estruturas de custos e presença ou não de penalizações de tempo de utilização do veículo na função objetivo. Foi observado que problemas com custos de estoque alto obtiveram em média *gaps* finais menores, e uma maior dificuldade de resolução para instâncias com janelas de tempo de 12 horas, que corresponde a 50% do tempo total do período.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 deste artigo é apresentada a descrição do problema estudado. Na seção 3 é apresentado o modelo matemático do IRPTW, assim como considerações e comentários referentes às restrições do problema. A seção 4 mostra os resultados computacionais obtidos e a seção 5 apresenta as conclusões referentes ao trabalho.

2. Descrição do Problema

Considera-se, dentro de uma dada cadeia logística, um fornecedor que deve realizar entregas de um produto único para um conjunto de c clientes em um período de planejamento pré-estabelecido de H períodos.

Para cada instante de tempo deste período, todos os clientes estarão sujeitos a demandas de produto conhecidas previamente (demandas determinísticas). Estes clientes poderão apenas ser atendidos dentro de intervalos específicos de tempo (janelas de tempo *hard*), enquanto o fornecedor opera durante a totalidade de cada período. Os clientes deverão atender suas demandas, não sendo permitido então *backlog*.

Ambos, o fornecedor e os clientes, possuem um nível de estoque máximo e custos de armazenamento. Uma política de reabastecimento do tipo OU é admitida, que implica que, se

um cliente é designado para ser visitado por um veículo do armazém, ele deverá receber uma quantidade de produto suficiente para maximizar sua capacidade de armazenamento. Um veículo estará disponível para a realização das entregas e sua carga não poderá ser violada.

Os custos de transporte e tempos de deslocamento entre pontos são proporcionais às distâncias euclidianas entre eles. Além da minimização dos custos de armazenamento dos clientes e do fornecedor, tem-se como objetivo também a minimização de custos de roteamento e de tempo de operação do veículo, de maneira que o veículo saia do depósito para a realização das entregas e retorne para o mesmo o mais rápido possível.

3. Modelo Matemático

Os conjuntos considerados na modelagem são:

- Conjunto de pontos do problema: $V = \{0, 1, \dots, c + 1\}$;
- Conjunto de clientes: $M = \{1, 2, \dots, c\}$;
- Conjunto de períodos: $T = \{1, 2, \dots, H\}$.

Os índices considerados são:

- Cliente/ponto considerado: i e j ;
- Período de tempo considerado: t .

As variáveis de decisão do modelo são:

- $I_i^t \in Z^+ =$ estoque do fornecedor/cliente $i \in V \setminus \{c + 1\}$ no início do período $t \in T \cup \{H + 1\}$;
- $x_i^t \in Z^+ =$ quantidade de produto entregue ao cliente $i \in M$ no período $t \in T$;
- $y_{ij}^t \in B = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } ij, i \neq j \text{ é percorrido em } t \in T \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $z_i^t \in B = \begin{cases} 1, & \text{se o } i \in V \text{ é atendido em } t \in T \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $s_i^t \in R^+ =$ horário de início de atendimento do ponto $i \in V$ no período $t \in T$.

Os parâmetros são:

- $h_i \in R^+$: custo de armazenamento do fornecedor/cliente $i \in V \setminus \{c + 1\}$;
- $c_{ij} \in Z^+$: custo de transporte do arco com início em i e fim em j , sendo $i, j \in V, i \neq j$;
- $m \in Z^+$: custo de operação por hora do veículo;
- $r_i \in Z^+$: taxa de reabastecimento/consumo de produto do fornecedor/cliente $i \in V \setminus \{c + 1\}$;
- $B0_i \in Z^+$: estoque inicial do fornecedor/cliente $i \in V \setminus \{c + 1\}$;
- $U_i \in Z^+$: estoque máximo do fornecedor/cliente $i \in V \setminus \{c + 1\}$;
- $C_v \in Z^+$: capacidade máxima do veículo;
- $t_{ij} \in R^+$: tempo de percurso do arco com início em i e fim em j , sendo $i, j \in V, i \neq j$;
- $ET_i \in Z^+$: horário de abertura do fornecedor/cliente $i \in V$;
- $LT_i \in Z^+$: horário de fechamento do fornecedor/cliente $i \in V$;
- $Ta_i \in R^+$: tempo de atendimento do fornecedor/cliente $i \in V$;
- $M_{ij} \in R^+$: big M correspondente ao arco ij , sendo $i, j \in V, i \neq j$.

O modelo matemático para o problema proposto pode ser representado pelo conjunto de expressões disposto abaixo.

$$Z = \sum_{t=1}^{H+1} h_0 I_0^t + \sum_{i=1}^c \sum_{t=1}^{H+1} h_i I_i^t + \sum_{i=0}^{c+1} \sum_{j=0}^{c+1} \sum_{t=1}^H c_{ij} y_{ij}^t + \sum_{t=1}^H m (s_{c+1}^t - s_0^t) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$I_0^t = I_0^{t-1} + r_0 - \sum_{i=1}^c x_i^{t-1}, \forall t \in T \cup \{H+1\}, \quad (2)$$

$$I_i^t = I_i^{t-1} - r_i + x_i^{t-1}, \forall i \in M, \forall t \in T \cup \{H+1\}, \quad (3)$$

$$I_i^0 = B0_i, \forall i \in V \setminus \{c+1\}, \quad (4)$$

$$I_0^t \geq \sum_{i=1}^c x_i^t, \forall t \in T, \quad (5)$$

$$x_i^t \geq U_i z_i^t - I_i^t, \forall i \in M, \forall t \in T, \quad (6)$$

$$x_i^t \leq U_i - I_i^t, \forall i \in M, \forall t \in T, \quad (7)$$

$$x_i^t \leq U_i z_i^t, \forall i \in M, \forall t \in T, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^c x_i^t \leq C_v z_0^t, \forall t \in T, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{c+1} y_{ij}^t = \sum_{j=0}^c y_{ji}^t, \forall i \in M, \forall t \in T, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{c+1} y_{ij}^t = z_i^t, \forall i \in V \setminus \{c+1\}, \forall t \in T, \quad (11)$$

$$s_i^t + t_{ij} + T a_i - s_j^t \leq M_{ij}(1 - y_{ij}^t), \forall i \in V \setminus \{c+1\}, \forall j \in V \setminus \{0\}, \forall t \in T, \quad (12)$$

$$s_i^t \leq L T_i z_i^t, \forall i \in V, \forall t \in T, \quad (13)$$

$$s_i^t \geq E T_i z_i^t, \forall i \in V, \forall t \in T, \quad (14)$$

$$I_i^t \geq 0, \forall i \in V \setminus \{c+1\}, \forall t \in T \cup \{H+1\}, \quad (15)$$

$$x_i^t \geq 0, \forall i \in M, \forall t \in T, \quad (16)$$

$$y_{ij}^t \in \{0,1\}, \forall i, j \in V, \forall t \in T, \quad (17)$$

$$z_i^t \in \{0,1\}, \forall i \in V, \forall t \in T, \quad (18)$$

$$s_i^t \geq 0, \forall i \in V, \forall t \in T, \quad (19)$$

Para a modelagem proposta, o fornecedor é representado pelos pontos 0 e $c+1$, sendo estes correspondentes ao ponto de partida do veículo e o ponto de retorno, respectivamente. Exceção aos seus horários de início de atendimento, estes dois pontos apresentam valores idênticos para variáveis/parâmetros de controle de estoque e coordenadas geográficas, sendo apenas as variáveis referentes ao ponto 0 consideradas na função objetivo e em determinadas restrições do modelo. Em adição aos H períodos de planejamento, um período extra $H+1$ é considerado de maneira a levar em conta as decisões de controle de estoque tomadas no último período planejamento do problema.

A equação (1) determina a função objetivo de minimização, em que o primeiro termo representa os custos associados ao estoque do fornecedor, o segundo representa os custos associados ao estoque dos clientes, o terceiro representa os custos associados ao transporte fornecedor-clientes (onde $i \neq j$) e o último termo representa os custos associados às horas de operação do veículo de entrega.

As restrições (2) e (3) garantem o balanceamento de entrada e saída no estoque do fornecedor e dos clientes ao longo dos períodos de planejamento. As restrições (4) determinam os estoques iniciais para o fornecedor e para os clientes da cadeia.

As restrições (5) evitam a ruptura ou *stock-out* (falta de produto) no fornecedor, enquanto que as restrições (6), (7) e (8) representam a política OU aplicada aos clientes. As restrições (9) garantem que a capacidade do veículo não seja violada ao longo do problema.

As restrições (10) e (11) são referentes ao roteamento veicular. Enquanto as restrições (10) garantem que quando um veículo chegue em um ponto ele necessariamente parta do

mesmo, as restrições (11) fazem a ligação entre variáveis de uso de arco com as variáveis de designação.

As restrições (12) foram adaptadas do modelo de Solomon (1984) e são referentes às janelas de tempo, impondo que um ponto j visitado imediatamente após um ponto i deverá possuir um horário de atendimento condizente com o horário de atendimento do ponto anterior e com o tempo de transporte entre os dois pontos. Esta formulação admite tempos de espera na porta de clientes enquanto eles não abrem. A constante M_{ij} refere a um valor positivo suficientemente grande, calculada individualmente para cada restrição de acordo com a seguinte equação:

$$M_{ij} = LT_i + t_{ij} + Ta_i \quad (20)$$

As restrições (13) e (14) conectam as variáveis de designação com as limitações de janela de tempo, impondo que um ponto deverá ser visitado dentro dos limites de horário inferior e superior estabelecidos.

As restrições (15) a (19) são referentes aos limites inferiores e ao domínio das variáveis.

Considerando o modelo IRPTW com veículo único descrito nesta seção, pode-se destacar que a função objetivo (1) e as restrições (2) a (11) foram baseadas no modelo IRP clássico de Archetti et al. (2007), enquanto as restrições (12) a (14) no modelo VRPTW clássico de Solomon (1987). O termo de custo de tempo de operação do veículo, incluso na função objetivo do problema, foi feito de modo a avaliar o impacto computacional do mesmo no desempenho do *solver* empregado para a resolução do problema.

4. Resultados e Discussão

Os testes foram realizados utilizando como base as instâncias disponibilizadas no artigo de Archetti et al. (2007). Essas instâncias contêm: valores de coordenadas para os clientes/fornecedor, demandas, entrada de produtos no fornecedor, estoques iniciais, capacidade do veículo, custos e capacidades de armazenamento para cada cliente/fornecedor. Os conjuntos de instâncias *lowcost* e *highcost* foram utilizados, representando respectivamente cadeias logísticas com baixos e altos custos de armazenagem de produtos. As instâncias apresentam cadeias contendo 5, 10, 15, 20, 25 e 30 clientes, com cinco classes diferentes (abs1, abs2, abs3, abs4 e abs5) para cada um destes tamanhos.

Em conjunto com os valores pré-determinados desses exemplos, janelas de tempo para cada cliente foram geradas a partir de uma distribuição uniforme, com a semente desta distribuição determinada a partir da soma das coordenadas x e y do fornecedor. Para um dado período e um determinado tamanho de janela TW , as janelas de tempo podem ser determinadas da seguinte maneira.

$$ET_i = U(0,24 - TW) \quad (21)$$

$$LT_i = ET_i + TW \quad (22)$$

Assume-se que o fornecedor opera ao longo de todo o período, possuindo então $ET_0 = ET_{c+1} = 0$ e $LT_0 = LT_{c+1} = 24$. A faixa de valores foi escolhida de modo que cada instante de planejamento ilustrasse a operação diária de uma cadeia de suprimentos fictícia.

O tempo de percurso de um arco ij e o tempo de atendimento de cada cliente são dependentes do número de clientes presentes no sistema e podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$t_{ij} = \frac{c_{ij}}{20(c + 1)} \quad (23)$$

Este cálculo é realizado de modo a garantir a factibilidade dos problemas gerados, já que um número de clientes maior na cadeia logística impõe um número maior de atendimentos por parte do veículo do fornecedor, sendo a comum consideração $c_{ij} = t_{ij}$ não válida para este caso. Na equação (23), c_{ij} é o valor da distância euclidiana entre os pontos i e j arredondado para o valor inteiro mais próximo.

Um conjunto total de 600 instâncias foi testado, representando possíveis condições de operação de uma cadeia de suprimentos. Dentre os parâmetros alterados e testados, encontram-se:

- Número de clientes (5, 10, 15, 20, 25 e 30);
- Estrutura de custos de estoque (baixo e alto);
- Tamanhos de janela de tempo (3h, 6h, 12h, mista e irrestrita);
- Custo por tempo de utilização do veículo (com e sem).

A configuração considerando janelas de tempo irrestritas são equivalentes à formulação original proposta por Archetti et al. (2007). A única diferença se dá na forma na qual as subrotas são eliminadas: enquanto a formulação original utiliza restrições baseadas no trabalho de Fischetti et al. (1998), a formulação atual se aproveita das restrições de sequenciamento de Solomon (1987) para tal. Os valores estipulados de Ta_i para cada cliente foram calculados pela expressão (24) para cada um dos casos. Assume-se que o tempo de atendimento no fornecedor é igual a 0 em todos os casos.

Tabela 1: Valor do parâmetro a para as diferentes configurações.

TW	3h	6h	12h	Mista	Irrestrita
a	0	1	2	3	0

Fonte: Elaborada pelos autores.

$$Ta_i = \frac{a}{c + 1} \quad (24)$$

Além de estabelecer uma base de testes extensa, o grupo de instâncias adaptado permite avaliar aspectos pouco explorados em outros modelos IRPTW presentes na literatura, como: diferentes tamanhos de janela de tempo e diferentes estruturas de custo. Este aspecto de estrutura de custos (baixo e alto) também é um aspecto pouco abordado em problemas IRPTW que, geralmente, admitem custos fixos nas cadeias logísticas consideradas. Já em relação à penalização de tempo associada ao uso do veículo, foram analisados casos com e sem a presença do termo na função objetivo. Quando presente, o termo m teve seu valor igualado a 10.

Os testes foram realizados no software *Gurobi* 8.0.1 em um PC Intel Core i7-6500 2.6GHz com 8gb de RAM, sendo imposto um tempo limite de otimização de 1h para os testes. Os resultados estão incluídos na seção Apêndices, contendo dados de função objetivo, *gap* e tempo de execução. Destaca-se que testes que não encontraram soluções incumbentes dentro do tempo determinado tiveram seu *gap* calculado como 100% para fins de análise.

A Tabela 2 mostra um comparativo entre os resultados obtidos para a formulação original do IRP, que não considera janelas de tempo para o atendimento dos clientes. A tabela apresenta, para cada um dos diferentes tamanhos de cadeia de suprimentos, valores médios considerando as cinco diferentes classes de instâncias proposta por Archetti et al. (2007). Dado que todos os pontos do grafo possuem janelas de tempo de tamanhos idênticas e iguais ao tamanho total do período (24h), as soluções ótimas obtidas se diferenciam das obtidas pela formulação original do problema nos horários de atendimento escolhidos.

Quando existe uma imposição na função objetivo decretando a minimização do tempo de operação do veículo, existe uma piora no desempenho do *solver* de aproximadamente 14%. Uma piora no *gap* pode ser observada na formulação com penalização de tempo, que passa de 8,15% para 18,40% em problemas com custos baixos de estoque, e de 3,86% para 8,49% para problemas com custos altos de estoque. Os tempos médios também foram bastante afetados,

como observado nas instâncias com 5 clientes, no caso de 9,5s para 1041,8s em casos com custos baixos de estoque e de 5,78s para 1144,3s em casos com custos altos de estoque.

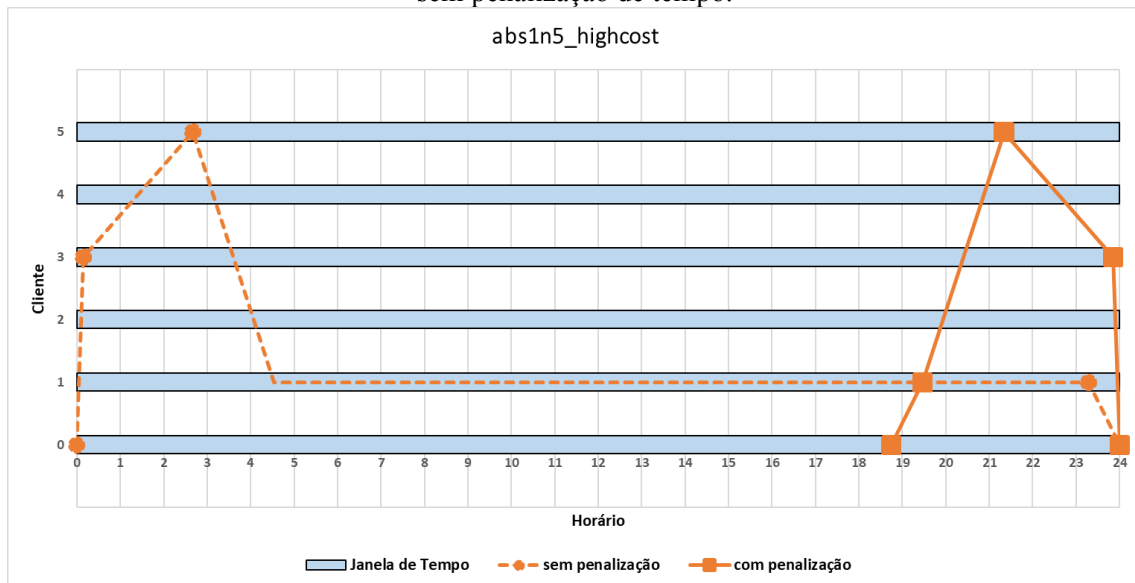
O impacto do número de clientes presente na cadeia se mostrou gradativamente crescente com o aumento do valor, havendo uma estagnação na faixa de 20 – 25 clientes e até mesmo uma pequena redução nos casos com 30 clientes.

Tabela 2: Comparativo entre *gaps* e tempos de execução para instâncias sem janelas de tempo.

Número de clientes (c)	Sem penalização de tempo				Com penalização de tempo			
	<i>lowcost</i>		<i>highcost</i>		<i>lowcost</i>		<i>highcost</i>	
	<i>gap</i>	t	<i>gap</i>	t	<i>gap</i>	t	<i>gap</i>	t
5	0,00%	9,50	0,00%	5,78	0,00%	1041,76	0,01%	1144,32
10	4,24%	2429,27	2,27%	2413,66	18,37%	3600	9,83%	3600
15	7,50%	3600	4,76%	3600	23,44%	3600	11,85%	3600
20	11,97%	3600	5,74%	3600	23,64%	3600	10,54%	3600
25	13,72%	3600	6,40%	3600	22,04%	3600	10,07%	3600
30	11,45%	3600	4,03%	3600	22,90%	3600	8,66%	3600
Médio (5 – 30)	8,15%	2806,51	3,86%	2803,28	18,40%	3173,66	8,49%	3190,75

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 1: Rotas para o primeiro período de planejamento da instância “abs1n5_highcost” com e sem penalização de tempo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 1 mostra as rotas determinadas para o veículo considerando a modelagem original do IRP. As duas rotas contidas na figura contêm o mesmo conjunto de pontos, representando uma mesma rota na solução ótima da instância original, devido à formulação simétrica do problema ($y_{ij} = y_{ji}$). A partir do momento em que janelas de tempo são adicionadas ao problema, o sequenciamento da rota começa a ser relevante, que pode ser controlado por meio das variáveis de horário de atendimento.

Cada ponto sólido no gráfico representa o início do atendimento em um determinado cliente. Como os tempos de atendimento são igualados a zero neste caso, as retas podem ser referentes tanto ao tempo de percurso entre dois pontos quanto a esse tempo somado a um tempo de espera na porta do cliente, resultante das considerações tomadas na formulação do modelo matemático. É possível observar na figura que existe um grande tempo de espera na

porta do cliente 1, que tem seu atendimento iniciado apenas após às 23h, para o caso sem penalização de tempo.

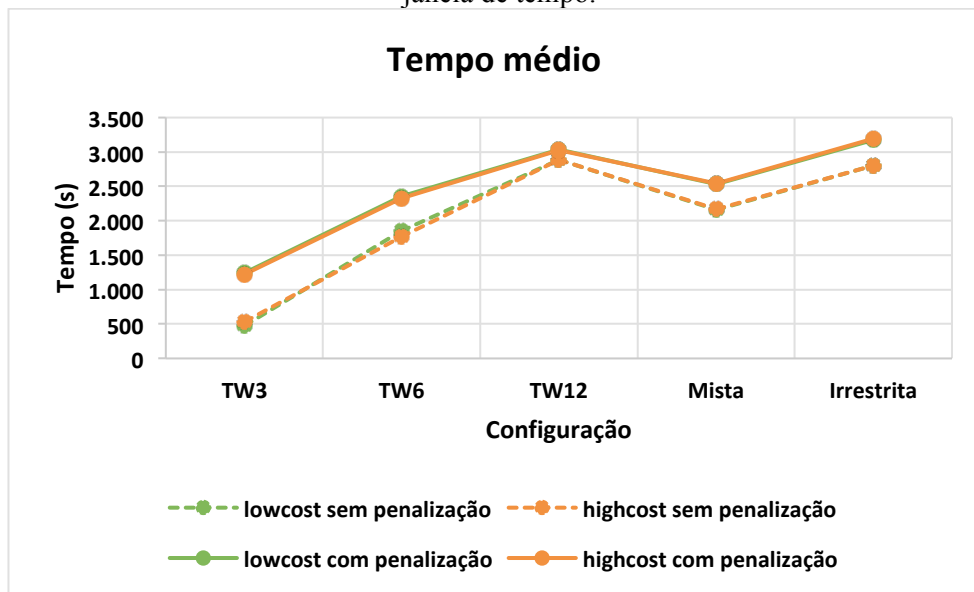
Como observado, a rota com penalização de tempo é consideravelmente mais rápida que sem penalização, já que os tempos de espera nas portas dos clientes acabam sendo minimizados ou até mesmo eliminados. Quando esta consideração é adicionada ao problema, o veículo prioritariamente gasta seu tempo no trajeto entre pontos, esperando na porta de clientes em apenas situações em que isto realmente é vantajoso – ou necessário - no planejamento de entregas.

Tabela 3: Comparativo entre valores médios de *gaps* e tempos de execução para instâncias com diferentes configurações de janela de tempo.

Configuração	Sem penalização de tempo				Com penalização de tempo			
	<i>lowcost</i>		<i>highcost</i>		<i>lowcost</i>		<i>highcost</i>	
	<i>gap</i>	<i>t</i>	<i>gap</i>	<i>t</i>	<i>gap</i>	<i>t</i>	<i>gap</i>	<i>t</i>
TW3	0,33%	475,69	0,14%	529,82	1,67%	1243,74	0,85%	1223,45
TW6	3,87%	1852,63	1,92%	1771,91	11,13%	2352,96	4,03%	2323,89
TW12	9,55%	2885,64	4,52%	2885,74	26,29%	3033,43	22,78%	3027,26
Mista	5,53%	2158,88	3,39%	2169,28	19,67%	2534,22	17,59%	2541,74
Irrestrita	8,15%	2806,46	3,86%	2803,24	18,40%	3173,63	8,49%	3190,72

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 2: Comparativo entre os tempos médios de execução para as diferentes configurações de janela de tempo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados obtidos para as diferentes configurações de janela de tempo e custos de estoque propostas. Dado o tempo limite de execução designado, percebe-se que com o aumento do tamanho da janela de tempo, existe também um aumento no tempo médio necessário para a resolução do problema. Este tempo médio é bastante influenciado pelos tempos obtidos para os grupos de instâncias com 5 e 10 clientes, que foram os dois grupos que conseguiram atingir soluções ótimas dentro do tempo estipulado. Todos os dados utilizados para a composição destas médias podem ser verificados nos Apêndices 3 a 10.

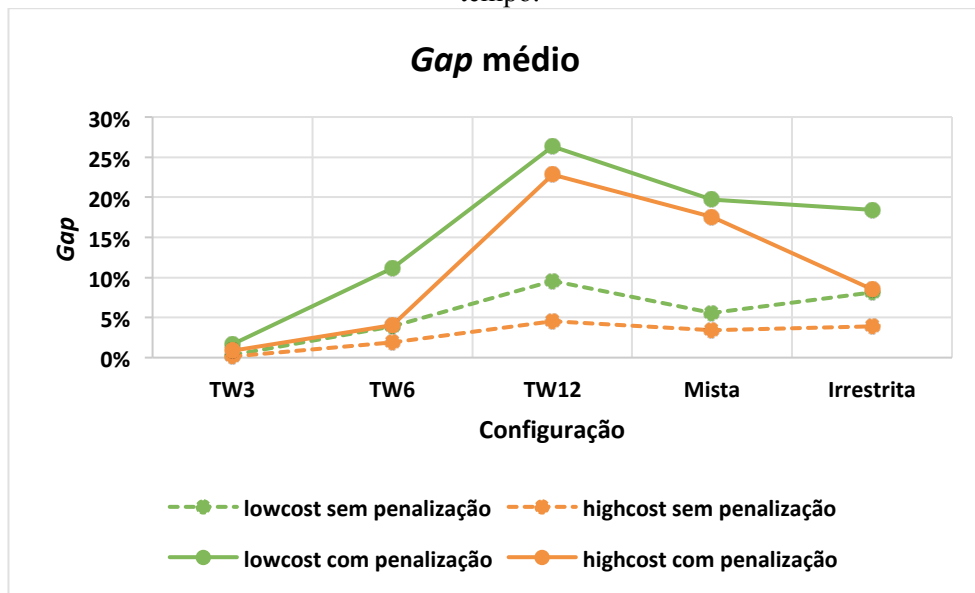
Em contraste, observa-se que o aumento do tamanho da janela de tempo acaba aumentando a dificuldade de resolução do problema de forma quase que linear até o tamanho de

janela igual a 12. As diferenças nos tempos médios aparentam não estar ligadas com a estrutura de custos considerada, mas sim a existência do termo de penalização.

Quando analisado os valores de *gaps* médios para as diferentes configurações, observa-se um comportamento diferente. As estruturas de custo apresentam diferentes pesos no procedimento de cálculo dos limites superiores e inferiores, proporcionando menores valores de *gap* para problemas com baixos custos de estoque. O termo de penalização também influencia em desempenhos diferentes entre os casos testados. A configuração mista apresenta novamente um comportamento intermediário, possuindo complexidade situada entre as configurações com janelas de tempo de 6 e 12 horas.

É interessante notar que o problema sob janelas de tempo irrestritas apresenta *gaps* médios iguais ou menores que a configuração de janela de tempo de 12 horas, não seguindo a tendência estabelecida anteriormente. Considerando este último fato, unido aos dados da Figura 3 e da Tabela 4, o comportamento de busca da solução tende a encontrar uma solução incumbente inicial, uma vez que o espaço de busca é maior, convergindo de forma mais lenta, porém contínua, dos limitantes da árvore do B&B.

Figura 3: Comparativo entre os *gaps* médios para as diferentes configurações de janela de tempo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 4: Soluções ótimas encontradas e problemas sem solução incumbente identificados.

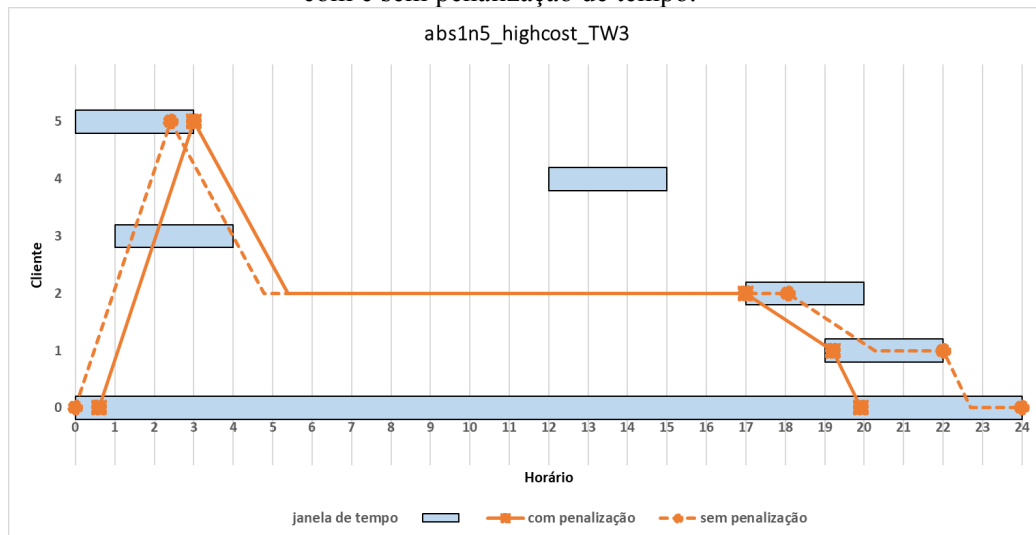
Configuração	Soluções ótimas		Não encontrou incumbente	
	Sem penalização	Com penalização	Sem penalização	Com penalização
TW3	56	42	0	0
TW6	33	24	0	1
TW12	12	10	0	9
Mista	26	20	0	7
Irrestrita	14	10	0	0

Fonte: Elaborada pelos autores.

Como apresentado na Tabela 4, o problema com janelas irrestritas, embora possua tempos médios de execução mais altos, não registra nenhuma ocorrência de problemas sem solução incumbente, enquanto problemas com janelas mistas e de duração de 12 horas apresentam o maior número de ocorrências. Também verifica-se a tendência decrescente no número de

soluções ótimas encontradas com o aumento da duração do intervalo de operação dos clientes, sendo que configurações com janelas de 3 horas só falham em encontrar a solução ótima em 4 dos 60 casos.

Figura 4: Rotas para o primeiro período de planejamento da instância “abs1n5_highcost_TW3” com e sem penalização de tempo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Uma possível razão para este bom desempenho pode estar relacionada ao tamanho do espaço de busca, desta vez mais restrito em problemas com janelas menores. A Figura 4 descreve rotas encontradas para o primeiro período da instância *abs1n5_highcost_TW3*. A rota determinada atende clientes diferentes da rota ótima ilustrada pela Figura 1, isso devido à disposição de janelas de tempo dos clientes. Ao contrário do problema original, a rota $0 - 5 - 2 - 1 - 0$ escolhida é diferente da rota $0 - 1 - 2 - 5 - 0$, pois neste caso as restrições de janela de tempo impedem que o cliente 5 seja atendido posteriormente aos clientes 1 e 2. Este tipo de fenômeno restringe consideravelmente o número de rotas factíveis para o problema, gerando um espaço de busca que, mesmo sendo bastante restrito, pode facilitar a determinação da solução ótima do problema. Esse fator, porém, deve ser avaliado em conjunto com o tamanho de janela considerado, pois como observado na Tabela 4, determinados tamanhos podem dificultar a obtenção da primeira solução incumbente.

Além disso, outro fator que possibilita a existência de múltiplas soluções é a possibilidade de espera na porta de clientes. A rota presente na Figura 1 poderia apresentar inúmeras configurações diferentes deste aspecto respeitando as restrições correntes do problema, assim como qualquer problema contendo janelas de tempo. Porém, neste segundo caso, os intervalos de tempo restritos diminuem a possibilidade da ocorrência de esperas, sendo praticamente eliminadas, se possível de acordo com a instância, quando a penalização de tempo é adicionada.

Este raciocínio pode ser observado dentro de cada uma das configurações de função objetivo testadas. A exceção se dá no caso do problema com janelas irrestritas que, como já mencionada, tem a característica de encontrar mais facilmente soluções incumbentes e, a partir delas, iniciar o processo de otimização da árvore *branch-and-bound*.

Em suma, a inclusão de janelas de tempo em problemas de roteamento e a consideração de tempos de trajeto entre trechos é responsável por criar assimetria no problema. Embora esta não seja necessariamente aplicada aos custos de transporte entre os pontos do grafo, uma assimetria implicitamente ligada à existência de parâmetros de tempo de trajeto e de intervalos de atendimento impacta na resolução do modelo. Os diferentes intervalos de funcionamento dos clientes, que podem automaticamente determinar alguns arcos do problema como infactíveis, podem ser a diferença entre a existência ou não de rotas duplas, como mostrado na Figura 4. Obviamente isto está limitado as características gerais das instâncias factíveis.

Algumas estratégias podem ser consideradas para melhorar a busca por soluções viáveis. Ascheuer et al. (2001) apresentam uma estratégia de pré-processamento para problemas de caixeiro viajante assimétrico (*Asymmetric Traveling Salesman Problem - ATSP*), no qual os horários de abertura e fechamento dos clientes são recalculados a partir do conhecimento dos intervalos de funcionamento de todos os clientes da cadeia de suprimento. Com isso, rotas infactíveis podem ser determinadas e previamente excluídas do problema, assim como pode-se reduzir a soma total dos horários de atendimento dos clientes, gerando um espaço de busca menor.

A utilização do termo de penalização de tempo também deve ter seu uso na função objetivo avaliado, já que esta incorre em uma carga computacional adicional no processo de resolução. Em casos em que um limite de horário já é previamente estabelecido – por exemplo, 8 horas de trabalho diário - talvez seja mais interessante inserir esta dinâmica no problema em forma de uma restrição. Uma análise mais refinada e testes mais específicos são necessários para a comprovação da eficácia dessas considerações e fica como sugestão para trabalhos futuros.

5. Conclusão

Neste trabalho foi proposto um modelo matemático para a resolução de um problema IRPTW com veículo único. O objetivo do trabalho consistiu da elaboração de um grupo de instâncias para o IRPTW que possibilitasse a avaliação do desempenho de modelos exatos para o problema, considerando diferentes tamanhos de janelas de tempo, estruturas de custos e formulação da função objetivo.

Um total de 600 instâncias foram testadas, sendo observado, consistentemente, uma maior facilidade de resolução para casos com altos custos de armazenamento e sem penalização de tempo para o uso do veículo. Em relação ao tamanho das janelas de tempo, uma tendência similar foi observada, em que problemas com valores menores de janela de tempo apresentam tempos e *gaps* médios melhores, reforçando a tendência observada em Demantova e Scarpin (2018). Por outro lado, foi observado que as configurações com janelas mistas e irrestritas apresentaram um desempenho igual ou melhor aos casos com janelas de 12 horas. Isto indica a existência de um *trade-off* entre os tamanhos de janela de tempo e o desempenho computacional resultante do modelo, sendo este não necessariamente proporcional ao tamanho de janela de tempo considerado. Desigualdades válidas podem ser desenvolvidas tendo isto em mente, de modo a deixar o modelo mais amplo e acelerando a convergência da busca de solução. O desenvolvimento dessas desigualdades válidas fica como sugestão para trabalhos futuros.

Dentre alguns dos motivos que poderiam afetar o desempenho do modelo estão o tamanho do espaço de busca resultante do problema e da assimetria implícita adicionada ao problema. Problema com janelas de tempo menores possuem tempos mais limitados para a execução dos atendimentos, limitando muitas das possíveis opções de roteamento do veículo e consequentemente o espaço de busca resultante. Mais testes poderiam ser realizados com tamanhos na faixa de 12-24h, de modo a confirmar ou não a tendência observada na etapa de testes e possivelmente parametrizar a complexidade do problema em termos de tamanho de janela de tempo em relação ao período total (12,5%, 25%, 50% e 100% foram abordados neste trabalho). Esses testes são outras sugestões para continuidade desta pesquisa.

Os tempos computacionais deixaram evidente o motivo de heurísticas e meta-heurísticas serem um dos principais artifícios de resolução para o IRPTW. Técnicas de pré-processamento e a substituição de termos na função objetivo, como por exemplo, troca de termos de penalização por restrições de tempo máximo de serviço, podem acarretar em melhorias consideráveis na obtenção da solução desses problemas abordados, sendo este mais um direcionamento para futuros desenvolvimentos.

Outras variações do problema poderiam realizar as análises elaboradas neste trabalho. A variação multi-veículo poderia se beneficiar de análises propostas, principalmente pelo fato de possuir maior flexibilidade que o caso com veículo único. Outra versão do problema que fornece uma flexibilidade similar é o IRPTW com *backorder*, assim como o problema com

janelas violáveis (*soft*). A consideração dos custos de estoque na formulação poderia ser mantida e aprofundada por meio da adaptação de outras instâncias bem estabelecidas para o IRP multi-veículos, como as apresentadas em Coelho e Laporte (2013). Em adição as estruturas de custos baixos e altos, impactos computacionais relacionados à outras estratégias de reabastecimento poderiam ser abordadas, como por exemplo políticas de lote econômico e de nível máximo.

Agradecimentos. Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

Andersson, H., Hoff, A., Christiansen, M., Hasle, G. e Løkketangen, A. Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. *Computers & Operations Research*, v. 37, n. 9, p. 1515-1536, 2010.

Alves, P. Y. A. L., Delgado, K. V. e da Silva, V. F. Inventory routing problem with time windows: A systematic review of the literature. In: *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, Caxias do Sul. ACM Press, 2018. p. 215-222.

Archetti, C., Bertazzi, L., Laporte, G. e Speranza, M. G. A branch-and-cut algorithm for a vendor-managed inventory-routing problem. *Transportation Science*, v. 41, n. 3, p. 382-391, 2007.

Ascheuer, N., Fischetti, M. e Grötschel, M. Solving the asymmetric travelling salesman problem with time windows by branch-and-cut. *Mathematical Programming*, v. 90, n. 3, p. 475-506, 2001.

Baldacci, R., Mingozzi, A. e Roberti, R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*, v. 218, n. 1, p. 1-6, 2012.

Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L., Greenfield, A. J., Jaikumar, R., Kedia, P., Mack, R. G. e Prutzman, P. J. Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. *Interfaces*, v. 13, n. 6, p. 4-23, 1983.

Coelho, L. C., Cordeau, J.-F. e Laporte, G. Thirty years of inventory routing. *Transportation Science*, v. 48, n. 1, p. 1-19, 2014.

Coelho, L. C. e Laporte, G. The exact solution of several classes of inventory-routing problems. *Computers & Operations Research*, v. 40, n. 2, p. 558-565, 2013.

Demantova, B. E. e Scarpin, C. T. Modelagem exata para o problema de roteamento de estoque com janelas de tempo. In: *VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, Ponta Grossa. Abepro, 2018.

El-Sherbeny, N. A. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University - Science*, v. 22, n. 3, p. 123-131, 2010.

Fischetti, M., González, J. J. S. e Toth, P. Solving the orienteering problem through branch-and-cut. *INFORMS Journal on Computing*, v. 10, n. 2, p. 133-148, 1998.

Guimarães, T. A., Coelho, L. C., Schenekemberg, C. M. e Scarpin, C. T. The two-echelon multi-depot inventory-routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 101, p. 220-233, 2019.

Júnior, E. F. F. e Oliveira, H. C. B. Adaptação da meta-heurística GRASP na resolução do problema de roteamento de veículos com janela de tempo. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, v. 4, n. 3, p. 271-287, 2012.

Lappas, P. Z., Kritikos, M. N. e Ioannou. A two-phase solution algorithm for the inventory routing problem with time windows. *Journal of Mathematics and System Science*, v. 7, n. 9, p. 237-247, 2017.

Lau, H. C., Lim, A. e LIU, Q. Z. Solving a supply chain optimization problem collaboratively. In: *Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence*, Austin Texas. AAAI, 2000.

Lau, H. C., Liu, Q. e Ono, H. Integrating local search and network flow to solve the inventory routing problem. In: *Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence*, Alberta, Canada. AAAI, 2002.

Lau, H. C., Lim, M. K., Wan, W. C., Wang, H. e Wu, X. Solving multi-objective multi-constrained optimization problems using hybrid ants system and tabu search. In: *Proceedings of the Fifth Metaheuristics International Conference*, Kyoto, Japan. 2003.

Li, K., Chen, B., Sivakumar, A. I. e Wu, Y. An inventory-routing problem with the objective of travel time minimization. *European Journal of Operational Research*, v. 236, n. 3, p. 936-945, 2014.

Liu, S.-C. e Lee, W.-T. A heuristic method for the inventory routing problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 10, p. 13223-13231, 2011.

Osvald, A. e Stirn, L. Z. A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. *Journal of Food Engineering*, v. 85, n. 2, p. 285-295, 2008.

Rahimi, M., Baboli, A. e Rekik, Y. Inventory routing problem for perishable products by considering customer satisfaction and green criteria. In: Freitag, M., Kotzab, H. e Pannek, J. (eds.), *Dynamics in Logistics. Lecture Notes in Logistics*, p. 445-455. Springer, Cham, 2017.

Solomon, M. M. *Vehicle routing and scheduling with time window constraints: Models and algorithms*. 187 f. Thesis (Ph.D.) University of Pennsylvania, 1984.

Solomon, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, v. 35, n. 2, p. 254-265, 1987.

Qiu, Y., Wang, L., Fang, X., Pardalos, P. M. e Goldengorin, B. Formulations and branch-and-cut algorithms for production routing problems with time windows. *Transportmetrica A: Transport Science*, v. 14, n. 8, p. 669-690, 2018.

Zeng, W. e Zhao, Q. Study of stochastic demand inventory routing problem with soft time windows based on MDP. In: Zeng, Z. e Wang, J. (eds.), *Advances in Neural Network Research and Applications*, v. 67, p.193-200. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

Apêndice

Apêndice 1: Resultados para instâncias com janelas de tempo irrestritas e sem penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5	3335,24	0,00%	1,77	5942,82	0,00%	1,11
abs2n5	2722,33	0,00%	1,35	5045,91	0,00%	1,54
abs3n5	4776,00	0,00%	5,50	6956,28	0,00%	5,32
abs4n5	3246,66	0,00%	2,11	5163,42	0,00%	2,21
abs5n5	2419,67	0,00%	36,76	4581,66	0,00%	18,74
abs1n10	4525,62	8,55%	3600	8870,15	4,10%	3600
abs2n10	5248,10	10,49%	3600	8569,73	6,31%	3600
abs3n10	4652,53	2,14%	3600	8509,81	0,90%	3600
abs4n10	5104,91	0,00%	1033,67	8792,29	0,00%	964,10
abs5n10	4670,76	0,00%	312,57	9620,07	0,00%	304,09
abs1n15	5462,68	2,23%	3600	12122,80	1,19%	3600
abs2n15	5537,74	9,36%	3600	12097,10	5,39%	3600
abs3n15	6060,38	2,50%	3600	13554,10	0,94%	3600
abs4n15	5581,99	12,57%	3600	10945,40	8,89%	3600
abs5n15	5415,51	10,83%	3600	10695,70	7,39%	3600
abs1n20	6591,84	12,67%	3600	14826,00	5,61%	3600
abs2n20	6095,73	9,13%	3600	14686,50	3,40%	3600
abs3n20	7054,20	6,28%	3600	14589,50	2,83%	3600
abs4n20	7533,10	12,53%	3600	14635,60	6,54%	3600
abs5n20	7505,62	19,25%	3600	16448,90	10,33%	3600
abs1n25	7405,86	17,11%	3600	16051,30	8,66%	3600
abs2n25	7728,44	14,00%	3600	17004,30	5,97%	3600
abs3n25	7808,28	12,87%	3600	18416,10	6,69%	3600
abs4n25	7588,26	4,50%	3600	16338,30	1,75%	3600
abs5n25	7622,02	20,12%	3600	19434,10	8,91%	3600
abs1n30	9189,70	20,44%	3600	23637,20	6,23%	3600
abs2n30	8129,52	13,54%	3600	20460,00	5,42%	3600
abs3n30	8292,87	4,54%	3600	23428,30	1,48%	3600
abs4n30	7707,80	6,34%	3600	18002,10	3,98%	3600
abs5n30	7807,91	12,40%	3600	19021,60	3,01%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 2: Resultados para instâncias janelas de tempo irrestritas e com penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5	3589,49	0,00%	1430,31	6197,07	0,00%	969,50
abs2n5	2927,41	0,00%	869,97	5250,99	0,00%	1088,34
abs3n5	5153,83	0,00%	514,63	7334,11	0,00%	594,39
abs4n5	3499,58	0,00%	734,26	5416,42	0,00%	1264,17
abs5n5	2601,09	0,00%	1659,62	4763,08	0,00%	1805,20
abs1n10	4681,98	20,79%	3600	9052,88	10,74%	3600
abs2n10	5469,74	17,71%	3600	8791,23	11,06%	3600
abs3n10	4844,44	18,45%	3600	8701,72	10,08%	3600
abs4n10	5318,00	15,78%	3600	9005,38	8,67%	3600
abs5n10	4857,94	19,15%	3600	9807,25	8,60%	3600
abs1n15	5610,49	25,59%	3600	12340,00	12,41%	3600
abs2n15	5688,39	22,65%	3600	12082,40	10,57%	3600
abs3n15	6223,88	17,38%	3600	13717,60	7,61%	3600
abs4n15	5658,93	26,77%	3600	10889,40	15,54%	3600
abs5n15	5480,29	24,80%	3600	10609,10	13,14%	3600
abs1n20	6634,43	24,85%	3600	14836,30	10,81%	3600
abs2n20	6209,59	27,11%	3600	14879,30	11,77%	3600
abs3n20	7211,47	22,22%	3600	14754,80	10,60%	3600
abs4n20	7925,81	24,13%	3600	14712,20	10,84%	3600
abs5n20	7424,20	19,88%	3600	16046,40	8,71%	3600
abs1n25	7475,22	24,90%	3600	15891,30	11,44%	3600
abs2n25	7807,75	28,19%	3600	17103,60	11,68%	3600
abs3n25	7854,95	18,70%	3600	18259,90	8,10%	3600
abs4n25	7634,54	17,22%	3600	16513,80	8,49%	3600
abs5n25	7570,90	21,20%	3600	19614,20	10,64%	3600
abs1n30	8737,51	24,14%	3600	23563,90	8,65%	3600
abs2n30	8013,98	21,17%	3600	20265,50	7,94%	3600
abs3n30	8666,64	22,17%	3600	23535,40	6,84%	3600
abs4n30	7867,95	21,40%	3600	17834,40	8,82%	3600
abs5n30	7575,41	25,64%	3600	19394,70	11,05%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 3: Resultados para instâncias com janelas de tempo de 3 horas e sem penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5_TW3	3456,67	0,00%	0,06	6066,83	0,00%	0,08
abs2n5_TW3	2971,29	0,00%	0,14	5293,36	0,00%	0,09
abs3n5_TW3	5018,42	0,00%	0,50	7202,27	0,00%	0,16
abs4n5_TW3	3388,66	0,00%	0,16	5298,16	0,00%	0,22
abs5n5_TW3	2521,67	0,00%	0,42	4683,09	0,00%	0,31
abs1n10_TW3	5935,19	0,00%	2,92	10293,8	0,00%	1,52
abs2n10_TW3	5854,99	0,00%	0,86	9178,31	0,00%	0,97
abs3n10_TW3	5879,25	0,00%	0,57	9750,84	0,00%	0,52
abs4n10_TW3	6096,91	0,00%	0,51	9792,21	0,00%	0,58
abs5n10_TW3	6075,94	0,00%	0,57	11028,6	0,00%	0,48
abs1n15_TW3	6923,66	0,00%	16,16	13594,8	0,00%	15,44
abs2n15_TW3	7893,74	0,00%	8,21	14335,6	0,00%	6,45
abs3n15_TW3	7992,38	0,00%	1,37	15486,1	0,00%	1,23
abs4n15_TW3	7825,35	0,00%	6,10	12955	0,00%	4,60
abs5n15_TW3	6018,51	0,00%	1,16	11092,7	0,00%	1,42
abs1n20_TW3	9588,26	0,00%	76,72	17815,9	0,00%	85,32
abs2n20_TW3	7430,97	0,00%	152,76	15994,8	0,00%	93,68
abs3n20_TW3	9713,52	0,00%	34,78	17304,6	0,00%	48,75
abs4n20_TW3	11371,2	0,00%	177,50	18473,4	0,00%	196,85
abs5n20_TW3	9956,35	0,00%	15,75	18633,4	0,00%	16,03
abs1n25_TW3	9978,1	0,00%	1075,34	18453,3	0,00%	820,10
abs2n25_TW3	10522,7	0,00%	2851,69	19858,2	0,00%	3190,56
abs3n25_TW3	12589,7	0,00%	110,98	23000,7	0,00%	113,12
abs4n25_TW3	11234,2	0,00%	91,03	20057,1	0,00%	98,91
abs5n25_TW3	10841,2	0,00%	515,19	22420,7	0,00%	1649,39
abs1n30_TW3	13549	0,00%	1126,65	28424,7	0,00%	1300,75
abs2n30_TW3	12841,3	1,64%	3600	25263,6	1,20%	3600
abs3n30_TW3	13343,8	8,27%	3600	28369,3	2,94%	3600
abs4n30_TW3	10946	0,00%	88,38	21023,3	0,00%	45,11
abs5n30_TW3	10792,6	0,00%	714,34	22409,4	0,00%	1001,97

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 4: Resultados para instâncias com janelas de tempo de 3 horas e com penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5_TW3	4078,17	0,00%	0,15	6688,33	0,00%	0,12
abs2n5_TW3	3459,21	0,00%	0,58	5781,28	0,00%	0,56
abs3n5_TW3	5435,09	0,00%	0,28	7618,94	0,00%	0,23
abs4n5_TW3	3854,51	0,00%	0,37	5771,41	0,00%	0,19
abs5n5_TW3	2833,59	0,00%	1,58	4995,01	0,00%	1,94
abs1n10_TW3	6410,46	0,00%	2,45	10769,1	0,00%	4,12
abs2n10_TW3	6323,28	0,00%	1,22	9651,66	0,00%	1,31
abs3n10_TW3	6586,39	0,00%	6,36	10458	0,00%	5,79
abs4n10_TW3	6736,55	0,00%	1,11	10431,8	0,00%	1,22
abs5n10_TW3	6751,44	0,00%	2,81	11704,1	0,00%	0,89
abs1n15_TW3	7454,19	0,00%	574,85	14125,4	0,00%	544,54
abs2n15_TW3	8559,36	0,00%	336,38	15001,3	0,00%	314,99
abs3n15_TW3	8797,79	0,00%	12,54	16291,6	0,00%	13,54
abs4n15_TW3	8654,22	0,00%	17,88	13783,9	0,00%	17,44
abs5n15_TW3	6592,85	0,00%	3,20	11667	0,00%	4,23
abs1n20_TW3	10394,6	0,00%	102,58	18622,2	0,00%	121,79
abs2n20_TW3	8223,21	4,09%	3600	16774,5	1,85%	3600
abs3n20_TW3	10630,9	0,00%	211,36	18222	0,00%	220,69
abs4n20_TW3	12127,5	0,00%	619,20	19233,1	0,00%	558,91
abs5n20_TW3	10735,3	0,00%	49,89	19412,4	0,00%	29,06
abs1n25_TW3	11118,7	7,20%	3600	19462	3,35%	3600
abs2n25_TW3	11282,7	7,69%	3600	20514,2	3,74%	3600
abs3n25_TW3	13725,6	1,12%	3600	24136,6	1,00%	3600
abs4n25_TW3	12213,7	0,00%	948,63	21036,5	0,00%	1094,74
abs5n25_TW3	11646,1	3,92%	3600	23184,6	1,55%	3600
abs1n30_TW3	14450,6	4,89%	3600	29327,3	2,75%	3600
abs2n30_TW3	13785,8	5,50%	3600	26157,5	3,06%	3600
abs3n30_TW3	14105,9	10,78%	3600	29326,5	5,56%	3600
abs4n30_TW3	11805,8	0,00%	2018,84	21883,2	0,00%	1367,24
abs5n30_TW3	11684,1	4,85%	3600	23313,9	2,57%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 5: Resultados para instâncias com janelas de tempo de 6 horas e sem penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5_TW6	3348,24	0,00%	0,30	5955,82	0,00%	0,33
abs2n5_TW6	2971,29	0,00%	0,19	5293,36	0,00%	0,33
abs3n5_TW6	5067,42	0,00%	0,19	7253,76	0,00%	0,19
abs4n5_TW6	3390,27	0,00%	0,17	5298,16	0,00%	0,19
abs5n5_TW6	2523,67	0,00%	1,48	4685,66	0,00%	1,48
abs1n10_TW6	5020,62	0,00%	228,57	9383,96	0,00%	258,06
abs2n10_TW6	6291	0,00%	12,55	9618,88	0,00%	9,22
abs3n10_TW6	5126,25	0,00%	17,23	8997,84	0,00%	15,61
abs4n10_TW6	6122,91	0,00%	130,06	9814,25	0,00%	42,04
abs5n10_TW6	5094,71	0,00%	7,94	10053,5	0,00%	12,64
abs1n15_TW6	6024,36	0,00%	100,75	12695,8	0,00%	95,37
abs2n15_TW6	6616,11	0,00%	227,85	13056,3	0,00%	224,32
abs3n15_TW6	7406,38	0,00%	68,96	14903	0,00%	66,97
abs4n15_TW6	5669,81	3,39%	3600	10796,8	1,70%	3600
abs5n15_TW6	6335,51	0,00%	28,75	11409,7	0,00%	33,57
abs1n20_TW6	8058,83	0,00%	3077,45	16248,6	0,00%	1848,12
abs2n20_TW6	7444,55	0,00%	1276,35	16011	0,00%	1314,95
abs3n20_TW6	8663,52	7,94%	3600	16250,7	4,28%	3600
abs4n20_TW6	9621,51	7,13%	3600	16778,5	4,58%	3600
abs5n20_TW6	9103,31	2,29%	3600	17845,9	1,41%	3600
abs1n25_TW6	10140,8	13,89%	3600	18431,2	6,50%	3600
abs2n25_TW6	9312,01	3,97%	3600	18797,9	3,24%	3600
abs3n25_TW6	10059,2	13,27%	3600	20096	4,57%	3600
abs4n25_TW6	9208,1	2,08%	3600	17905,8	0,00%	2433,81
abs5n25_TW6	9496,28	11,50%	3600	20904,7	4,33%	3600
abs1n30_TW6	11615,8	11,32%	3600	26885	6,27%	3600
abs2n30_TW6	10804,3	11,03%	3600	23340,8	5,92%	3600
abs3n30_TW6	10525,6	4,28%	3600	25693,7	1,95%	3600
abs4n30_TW6	11085,8	12,55%	3600	21388,8	7,90%	3600
abs5n30_TW6	10218,4	11,52%	3600	21806,1	5,08%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 6: Resultados para instâncias com janelas de tempo de 6 horas e com penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5_TW6	3703,91	0,00%	0,78	6311,49	0,00%	0,81
abs2n5_TW6	3410,87	0,00%	1,53	5732,94	0,00%	1,78
abs3n5_TW6	5553,25	0,00%	0,27	7739,59	0,00%	0,27
abs4n5_TW6	3814,51	0,00%	0,39	5731,41	0,00%	0,58
abs5n5_TW6	2841,84	0,00%	5,47	5003,83	0,00%	2,83
abs1n10_TW6	5342,52	0,00%	1202,69	9713,42	0,00%	1091,99
abs2n10_TW6	6777,5	0,00%	17,30	10105,4	0,00%	11,56
abs3n10_TW6	5527,75	0,00%	54,44	9398,67	0,00%	76,35
abs4n10_TW6	6504,77	0,00%	443,42	10196,1	0,00%	497,24
abs5n10_TW6	5518,3	0,00%	59,59	10477,1	0,00%	249,98
abs1n15_TW6	6503,06	4,81%	3600	13186,2	2,70%	3600
abs2n15_TW6	7044,64	4,70%	3600	13484,9	2,55%	3600
abs3n15_TW6	7889,97	0,00%	3464,87	15386,6	0,00%	2578,11
abs4n15_TW6	6063,88	8,54%	3600	11236,7	5,27%	3600
abs5n15_TW6	6732,88	0,00%	537,96	11807,1	0,00%	405,33
abs1n20_TW6	8486,27	4,03%	3600	16680,9	1,91%	3600
abs2n20_TW6	8006,86	8,15%	3600	16619,7	3,81%	3600
abs3n20_TW6	9429,71	16,89%	3600	16989,1	9,09%	3600
abs4n20_TW6	10574,5	18,49%	3600	17298,1	9,13%	3600
abs5n20_TW6	9734,5	10,77%	3600	18235,4	4,53%	3600
abs1n25_TW6	10739,7	17,48%	3600	19417,1	10,57%	3600
abs2n25_TW6	9962,73	15,10%	3600	19112,3	6,18%	3600
abs3n25_TW6	10322,4	15,81%	3600	21019,5	9,03%	3600
abs4n25_TW6	9652,63	8,02%	3600	18611,3	4,89%	3600
abs5n25_TW6	10338,1	21,22%	3600	21996	9,94%	3600
abs1n30_TW6	0	100,00%	3600	26899,3	7,47%	3600
abs2n30_TW6	11699,1	20,69%	3600	23890,2	8,59%	3600
abs3n30_TW6	11382,3	15,87%	3600	26341,2	6,11%	3600
abs4n30_TW6	11822,9	22,13%	3600	21690,2	10,08%	3600
abs5n30_TW6	10688,9	21,07%	3600	22085,6	9,21%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 7: Resultados para instâncias com janelas de tempo de 12 horas e sem penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5_TW12	3335,24	0,00%	1,44	5942,82	0,00%	1,37
abs2n5_TW12	2722,33	0,00%	1,53	5045,91	0,00%	1,78
abs3n5_TW12	4776	0,00%	7,03	6956,28	0,00%	6,92
abs4n5_TW12	3246,66	0,00%	0,39	5163,42	0,00%	0,41
abs5n5_TW12	2419,67	0,00%	9,36	4581,66	0,00%	9,55
abs1n10_TW12	4525,62	7,96%	3600	8888,96	4,06%	3600
abs2n10_TW12	5236,98	10,19%	3600	8576,48	6,55%	3600
abs3n10_TW12	4652,53	0,77%	3600	8509,81	0,71%	3600
abs4n10_TW12	5540,41	3,30%	3600	9236,29	3,00%	3600
abs5n10_TW12	5000,71	0,00%	149,54	9959,52	0,00%	152,27
abs1n15_TW12	5463,36	2,29%	3600	12118,8	0,93%	3600
abs2n15_TW12	5537,74	9,09%	3600	12334,2	7,40%	3600
abs3n15_TW12	6085,38	1,97%	3600	13582	0,67%	3600
abs4n15_TW12	5785,65	16,51%	3600	10625,8	6,36%	3600
abs5n15_TW12	5588,63	14,80%	3600	10564,7	6,27%	3600
abs1n20_TW12	6613,68	12,82%	3600	14876,9	6,17%	3600
abs2n20_TW12	6217,75	13,59%	3600	14707,4	3,24%	3600
abs3n20_TW12	7047,2	6,44%	3600	15463,3	8,53%	3600
abs4n20_TW12	8174,15	17,16%	3600	15104,6	8,31%	3600
abs5n20_TW12	7886,46	23,37%	3600	16115	8,59%	3600
abs1n25_TW12	7573,74	19,46%	3600	16031,7	9,67%	3600
abs2n25_TW12	7789,87	14,89%	3600	17043	6,38%	3600
abs3n25_TW12	8591,01	19,47%	3600	19194,4	9,54%	3600
abs4n25_TW12	7849,78	7,92%	3600	16503,7	2,76%	3600
abs5n25_TW12	8344,48	27,12%	3600	19437,1	9,05%	3600
abs1n30_TW12	9039,76	19,71%	3600	23888,8	7,44%	3600
abs2n30_TW12	7884,02	11,61%	3600	20212,2	4,52%	3600
abs3n30_TW12	8718,16	9,51%	3600	24052,6	4,24%	3600
abs4n30_TW12	7676,8	6,25%	3600	18601,2	7,30%	3600
abs5n30_TW12	7515,19	10,21%	3600	19100,2	3,77%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 8: Resultados para instâncias com janelas de tempo de 12 horas e com penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5_TW12	3589,49	0,00%	308,96	6197,07	0,00%	247,21
abs2n5_TW12	2927,41	0,00%	278,72	5250,99	0,00%	223,98
abs3n5_TW12	5153,83	0,00%	211,29	7334,11	0,00%	192,02
abs4n5_TW12	3499,58	0,00%	9,67	5416,42	0,00%	9,01
abs5n5_TW12	2601,09	0,00%	194,24	4763,08	0,00%	145,62
abs1n10_TW12	4681,98	16,58%	3600	9090,69	9,60%	3600
abs2n10_TW12	5493,03	15,52%	3600	8791,23	9,93%	3600
abs3n10_TW12	4844,44	10,32%	3600	8701,72	5,99%	3600
abs4n10_TW12	5773,23	13,59%	3600	9482,03	7,70%	3600
abs5n10_TW12	5217,48	10,85%	3600	10161,7	5,57%	3600
abs1n15_TW12	5610,49	16,17%	3600	12287,9	7,47%	3600
abs2n15_TW12	5689,43	16,54%	3600	12125,4	7,91%	3600
abs3n15_TW12	6317,99	13,25%	3600	14035,1	7,86%	3600
abs4n15_TW12	5814,44	23,21%	3600	11143,6	14,27%	3600
abs5n15_TW12	5535,85	18,81%	3600	10617,4	9,88%	3600
abs1n20_TW12	6730,04	22,49%	3600	14947,3	9,51%	3600
abs2n20_TW12	6405,13	22,99%	3600	14886,3	8,46%	3600
abs3n20_TW12	7211,47	16,40%	3600	14798,8	7,74%	3600
abs4n20_TW12	8296,2	24,56%	3600	15476,4	13,00%	3600
abs5n20_TW12	7359,4	17,91%	3600	16450,8	10,45%	3600
abs1n25_TW12	0	100,00%	3600	15807	12,19%	3600
abs2n25_TW12	7771,04	21,77%	3600	17383,7	11,40%	3600
abs3n25_TW12	9197,38	27,41%	3600	0	100,00%	3600
abs4n25_TW12	8006,07	17,73%	3600	0	100,00%	3600
abs5n25_TW12	7762,25	22,53%	3600	19416,1	9,31%	3600
abs1n30_TW12	0	100,00%	3600	0	100,00%	3600
abs2n30_TW12	8277,65	19,19%	3600	0	100,00%	3600
abs3n30_TW12	0	100,00%	3600	24172,8	8,17%	3600
abs4n30_TW12	8282,35	20,84%	3600	17915,1	7,03%	3600
abs5n30_TW12	0	100,00%	3600	0	100,00%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 9: Resultados para instâncias com janelas de tempo mistas e sem penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5_TWMIX	3344,24	0,00%	0,31	5951,82	0,00%	0,34
abs2n5_TWMIX	3052,29	0,00%	0,22	5374,36	0,00%	0,36
abs3n5_TWMIX	4802	0,00%	0,34	6982,28	0,00%	0,23
abs4n5_TWMIX	3467,66	0,00%	0,12	5385,08	0,00%	0,11
abs5n5_TWMIX	2451,67	0,00%	0,44	4613,66	0,00%	0,47
abs1n10_TWMIX	5044,62	0,00%	29,50	9407,66	0,00%	17,17
abs2n10_TWMIX	5263,98	0,00%	166,70	8598,52	0,00%	192,63
abs3n10_TWMIX	4956,99	0,00%	173,79	8810,05	0,00%	151,95
abs4n10_TWMIX	6805,91	0,00%	1,59	10497,3	0,00%	2,36
abs5n10_TWMIX	4979,76	0,00%	11,45	9929,07	0,00%	7,84
abs1n15_TWMIX	5846,36	0,00%	204,90	12514,2	0,00%	168,39
abs2n15_TWMIX	6122,74	0,00%	1369,81	12562,2	0,00%	1539,16
abs3n15_TWMIX	7200,38	0,00%	1607,20	14697	0,00%	1797,46
abs4n15_TWMIX	5837,47	5,83%	3600	10902,3	1,52%	3600
abs5n15_TWMIX	5618,51	14,26%	3600	10653,7	7,04%	3600
abs1n20_TWMIX	7396,34	10,15%	3600	15582,9	4,44%	3600
abs2n20_TWMIX	7285,14	2,59%	3600	15815,2	1,11%	3600
abs3n20_TWMIX	8874,2	7,95%	3600	16308,1	3,59%	3600
abs4n20_TWMIX	9690,51	11,39%	3600	16831,9	6,72%	3600
abs5n20_TWMIX	8830,62	8,10%	3600	17661	5,29%	3600
abs1n25_TWMIX	8323,11	17,41%	3600	17491,3	12,78%	3600
abs2n25_TWMIX	9320,28	5,01%	3600	18685,4	3,22%	3600
abs3n25_TWMIX	9698,04	8,18%	3600	20309,9	6,74%	3600
abs4n25_TWMIX	9353,02	3,17%	3600	18157,7	2,82%	3600
abs5n25_TWMIX	9898,28	15,22%	3600	21831,4	9,08%	3600
abs1n30_TWMIX	11489,3	9,28%	3600	26762,3	6,73%	3600
abs2n30_TWMIX	11562,1	14,07%	3600	23953,9	7,72%	3600
abs3n30_TWMIX	11260,5	7,54%	3600	26337,7	3,87%	3600
abs4n30_TWMIX	11560,8	11,28%	3600	21825,4	7,91%	3600
abs5n30_TWMIX	9282,27	14,64%	3600	21863,7	11,19%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apêndice 10: Resultados para instâncias com janelas de tempo mistas e com penalização de tempo.

Instância	Custo de estoque baixo			Custo de estoque alto		
	F.O.	gap	t	F.O.	gap	t
abs1n5_TWMIX	3599,24	0,00%	5,92	6206,82	0,00%	7,44
abs2n5_TWMIX	3442,04	0,00%	1,03	5764,11	0,00%	1,25
abs3n5_TWMIX	5222,17	0,00%	1,12	7408,51	0,00%	1,14
abs4n5_TWMIX	3901,16	0,00%	0,17	5822,38	0,00%	0,23
abs5n5_TWMIX	2815,25	0,00%	4,13	4977,24	0,00%	4,75
abs1n10_TWMIX	5372,8	0,00%	174,02	9736,14	0,00%	177,57
abs2n10_TWMIX	5709,03	0,00%	789,72	9043,57	0,00%	771,75
abs3n10_TWMIX	5332,97	0,00%	2719,61	9195,19	0,00%	2995,20
abs4n10_TWMIX	7503,5	0,00%	13,46	11198,8	0,00%	13,32
abs5n10_TWMIX	5393,35	0,00%	317,44	10342,7	0,00%	279,67
abs1n15_TWMIX	6296,33	8,99%	3600	12948,7	4,16%	3600
abs2n15_TWMIX	6799,58	8,60%	3600	13234	4,21%	3600
abs3n15_TWMIX	7508,9	4,04%	3600	15004,2	1,90%	3600
abs4n15_TWMIX	6035,19	9,00%	3600	11263,5	5,92%	3600
abs5n15_TWMIX	6197,6	27,04%	3600	11214,5	14,61%	3600
abs1n20_TWMIX	8032,76	21,49%	3600	16395,1	11,68%	3600
abs2n20_TWMIX	7895,43	19,88%	3600	16514,8	9,39%	3600
abs3n20_TWMIX	9619,27	14,83%	3600	17184,7	8,40%	3600
abs4n20_TWMIX	10470,6	19,46%	3600	17689,4	11,96%	3600
abs5n20_TWMIX	9261,51	9,63%	3600	18139,8	5,43%	3600
abs1n25_TWMIX	9219,14	27,67%	3600	0	100,00%	3600
abs2n25_TWMIX	0	100,00%	3600	0	100,00%	3600
abs3n25_TWMIX	10212,3	16,65%	3600	20510,6	6,67%	3600
abs4n25_TWMIX	10075,3	16,13%	3600	18893,9	8,91%	3600
abs5n25_TWMIX	10743,6	22,20%	3600	21728,1	8,15%	3600
abs1n30_TWMIX	0	100,00%	3600	27506,9	9,33%	3600
abs2n30_TWMIX	0	100,00%	3600	0	100,00%	3600
abs3n30_TWMIX	12009,7	17,32%	3600	27214,1	7,74%	3600
abs4n30_TWMIX	12423,5	14,25%	3600	22881,6	9,11%	3600
abs5n30_TWMIX	10633	32,92%	3600	0	100,00%	3600

Fonte: Elaborada pelos autores.